Руководство по метеорологическим приборам и методам наблюдений

Издание 2008 г.
Обновлено в 2010 г.

Всемирная Метеорологическая Организация

ВМО-№ 8

Погода • Климат • Вода

Руководство по метеорологическим приборам и методам наблюдений

ВМО-№ 8

Издание 2008 г.

Обновлено в 2010 г.

Всемирная
Метеорологическая
Организация

Погода • Климат • Вода

2014

РЕДАКТОРСКОЕ ПРИМЕЧАНИЕ

Терминологическая база данных ВМО МЕТЕОТЕРМ размещена на веб-сайте: http://www.wmo.int/pages/prog/lsp/meteoterm_wmo_ru.html. Сокращения, используемые в настоящей публикации, см. также по адресу: http://www.wmo.int/pages/themes/acronyms/index_ru.html.

Выражение признательности

ВМО хотела бы отметить неоценимый вклад российской Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды в подготовку (перевод, редактирование и графическое оформление) настоящей публикации на русском языке.

ВМО-№ 8

© Всемирная Метеорологическая Организация, 2008

Право на опубликование в печатной, электронной или какой-либо иной форме на каком-либо языке сохраняется за ВМО. Небольшие выдержки из публикаций ВМО могут воспроизводиться без разрешения при условии четкого указания источника в полном объеме. Корреспонденцию редакционного характера и запросы в отношении частичного или полного опубликования, воспроизведения или перевода настоящей публикации следует направлять по адресу:

Chairperson, Publications Board
World Meteorological Organization (WMO)
7 bis, avenue de la Paix
P.O. Box 2300
CH-1211 Geneva 2, Switzerland

Тел.: +41 (0) 22 730 84 03
Факс: +41 (0) 22 730 80 40
Э-почта: publications@wmo.int

ISBN 978-92-63-40008-6

ПРИМЕЧАНИЕ

Обозначения, употребляемые в публикациях ВМО, а также изложение материала в настоящей публикации не означают выражения со стороны ВМО какого бы то ни было мнения в отношении правового статуса какой-либо страны, территории, города или района, или их властей, а также в отношении делимитации их границ.

Упоминание отдельных компаний или какой-либо продукции не означает, что они одобрены или рекомендованы ВМО и что им отдается предпочтение перед другими аналогичными, но не упомянутыми или не прорекламированными компаниями или продукцией.

ТАБЛИЦА ДЛЯ ОТМЕТОК, КАСАЮЩИХСЯ ВНЕСЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ

Дата	*Часть/глава/раздел*	*Цель внесения изменения*	*Предложено*	*Утверждающая резолюция*
2010 г.	Часть I: главы 1, 3, 5, 6, 7, 14 и 15; часть II: главы 2, 4 и 9; и часть III: главы 1, 4 и 5	Объединение поправок, одобренных Комиссией по приборам и методам наблюдений на ее пятнадцатой сессии в сентябре 2010 г., Исполнительным Советом и Шестнадцатым конгрессом	КПМН-XV	Резолюция 10 (ИС-LIX), Резолюция 7 (Кг-XVI)

ПРЕДИСЛОВИЕ

Одна из задач Всемирной Метеорологической Организации (ВМО) состоит в том, чтобы координировать деятельность ее 188 стран-членов в области производства данных и информации о погоде, климате и водных ресурсах в соответствии с согласованными на международном уровне стандартами. Исходя из этого, Всемирный метеорологический конгресс принимает на каждой из своих сессий Технический регламент, содержащий метеорологические практики и процедуры, которым должны следовать страны — члены ВМО. Этот Технический регламент дополняется рядом наставлений и руководств, в которых более детально описываются практики, процедуры и технические условия, которые странам-членам рекомендуется выполнять. В то время как наставления содержат обязательные для исполнения практики, руководства, такие как настоящее Руководство, содержат рекомендуемые практики.

Первое издание Руководства по метеорологическим приборам и методам наблюдений было опубликовано в 1954 г. и состояло из двенадцати глав. С того времени стандартизация остается важнейшей задачей деятельности Комиссии по приборам и методам наблюдений (КПМН). КПМН периодически пересматривала содержание Руководства и давала рекомендации по внесению дополнений и изменений, по мере возможности.

В настоящее седьмое издание, представляющее собой полностью переработанную версию, включены дополнительно темы и главы, отражающие новейшие технологические разработки. Его целью, как и предыдущих изданий, является обеспечение пользователей исчерпывающими и отвечающими современным требованиям рекомендациями по наиболее эффективной практике проведения метеорологических наблюдений и измерений. Настоящее издание было подготовлено благодаря совместным усилиям 42 экспертов из 17 стран и принято четырнадцатой сессией КПМН (Женева, декабрь 2006 г.).

В Руководстве описываются наиболее широко используемые приборы, системы и технические приемы — от простейших до самых сложных на уровне современных требований, но нет стремления рассматривать только методы и приборы, применяемые для целей научных исследований или экспериментов. Кроме того, Руководство не является детализированной инструкцией для использования наблюдателями и средним техническим персоналом, а в значительной степени представляет собой основу для подготовки инструктивно-методических документов национальными метеорологическими и гидрологическими службами (НМГС) или другими заинтересованными пользователями, эксплуатирующими наблюдательные системы, в целях удовлетворения их конкретных потребностей. При этом в нем не делается попыток дать полное в деталях описание конструкции приборов, так как это может стать помехой для их дальнейшего совершенствования. Вместо этого предполагается ограничиться рассмотрением преимущественно основных стандартных требований к приборам и дать рекомендации по общим характеристикам различных отдельных приборов или измерительных систем.

Хотя Руководство написано, прежде всего, для НМГС, оно может быть полезным для многих других организаций, научно-исследовательских учреждений и учебных заведений, производящих метеорологические измерения, поскольку их потребности также учитывались при подготовке Руководства. Кроме того, многие производители приборов признали практическую пользу от использования Руководства при разработке и производстве приборов и систем, специально адаптированных к запросам стран-членов. В связи со значительным спросом на данную публикацию было принято решение обеспечить ее доступность для всех заинтересованных пользователей, поместив на веб-сайте ВМО.

В этой связи я хотел бы от имени ВМО выразить свою признательность всем НМГС, техническим комиссиям, группам экспертов и отдельным лицам, которые внесли вклад в подготовку данной публикации.

(М. Жарро)
Генеральный секретарь

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

ЧАСТЬ I. ИЗМЕРЕНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕННЫХ

ГЛАВА 1. Общие положения I.1–1

ГЛАВА 2. Измерение температуры I.2–1

ГЛАВА 3. Измерение атмосферного давления I.3–1

ГЛАВА 4. Измерение влажности I.4–1

ГЛАВА 5. Измерение приземного ветра I.5–1

ГЛАВА 6. Измерение количества осадков I.6–1

ГЛАВА 7. Измерение радиации I.7–1

ГЛАВА 8. Измерение продолжительности солнечного сияния I.8–1

ГЛАВА 9. Измерение видимости I.9–1

ГЛАВА 10. Измерение испарения I.10–1

ГЛАВА 11. Измерение влажности почвы I.11–1

ГЛАВА 12. Аэрологические измерения давления, температуры и влажности I.12–1

ГЛАВА 13. Измерение ветра на высотах I.13–1

ГЛАВА 14. Наблюдения за текущей и прошедшей погодой; состояние поверхности почвы I.14–1

ГЛАВА 15. Наблюдения за облаками I.15–1

ГЛАВА 16. Измерение озона I.16–1

ГЛАВА 17. Измерение атмосферных составляющих I.17–1

Стр.

ЧАСТЬ II. СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЙ

ГЛАВА 1. Измерения на автоматических метеорологических станциях II.1–1

ГЛАВА 2. Измерения и наблюдения на авиационных метеорологических станциях II.2–1

ГЛАВА 3. Самолетные наблюдения II.3–1

ГЛАВА 4. Морские наблюдения II.4–1

ГЛАВА 5. Специальные методы профилирования атмосферного пограничного слоя и тропосферы II.5–1

ГЛАВА 6. Ракетные измерения в стратосфере и мезосфере II.6–1

ГЛАВА 7. Определение координат источников атмосфериков II.7–1

ГЛАВА 8. Спутниковые наблюдения II.8–1

ГЛАВА 9. Радиолокационные измерения II.9–1

ГЛАВА 10. Метеорологические шары-зонды II.10–1

ГЛАВА 11. Метеорологические наблюдения в горах II.11–1

ГЛАВА 12. Метеорологические наблюдения на дорогах II.12–1

ЧАСТЬ III. МЕНЕДЖМЕНТ КАЧЕСТВА И СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЙ

ГЛАВА 1. Менеджмент качества III.1–1

ГЛАВА 2. Дискретные измерения метеорологических переменных III.2–1

ГЛАВА 3. Обработка данных III.3–1

ГЛАВА 4. Испытание, калибровка и взаимное сравнение приборов III.4–1

ГЛАВА 5. Профессиональная подготовка специалистов по приборам III.5–1

СПИСОК ЛИЦ, СОДЕЙСТВОВАВШИХ ПОДГОТОВКЕ РУКОВОДСТВА Прил.–1

ЧАСТЬ I

ИЗМЕРЕНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕННЫХ

ЧАСТЬ I. ИЗМЕРЕНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕННЫХ

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

ГЛАВА 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ I.1–1

1.1 Метеорологические наблюдения I.1–2
1.2 Системы метеорологических наблюдений I.1–2
1.3 Общие требования к метеорологической станции I.1–3
1.4 Общие требования к приборам I.1–7
1.5 Эталоны измерений и их определения I.1–8
1.6 Погрешность измерений I.1–10

Приложение 1.A. Региональные центры I.1–19

Приложение 1.B. Классификации размещения площадок для станций наземных наблюдений на суше I.1–21

Приложение 1.C. Описание установки станции I.1–32

Приложение 1.D. Требования к оперативной погрешности измерений и рабочие характеристики приборов I.1–34

Справочная и дополнительная литература I.1–40

ГЛАВА 2. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ I.2–1

2.1 Общие сведения I.2–1
2.2 Жидкостные стеклянные термометры I.2–4
2.3 Механические термографы I.2–11
2.4 Электрические термометры I.2–12
2.5 Радиационные защиты I.2–17

Приложение. Определение реперных точек международной температурной шкалы, принятой в 1990 г. I.2–19

Справочная и дополнительная литература I.2–21

ГЛАВА 3. ИЗМЕРЕНИЕ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ I.3–1

3.1 Общие сведения I.3–1
3.2 Ртутные барометры I.3–3
3.3 Электронные барометры I.3–8
3.4 Барометры-анероиды I.3–11
3.5 Барографы I.3–12
3.6 Барометры с трубкой Бурдона I.3–14
3.7 Барическая тенденция I.3–14
3.8 Общие требования к размещению I.3–14
3.9 Размещение барометров I.3–15
3.10 Сравнение, калибровка и обслуживание I.3–16
3.11 Приведение показаний барометра к другим уровням I.3–21
3.12 Барическая тенденция и характеристика барической тенденции I.3–22

Приложение 3.A. Приведение показаний барометра к стандартным условиям I.3–23

Приложение 3.B. Региональные стандартные барометры I.3–26

Справочная и дополнительная литература I.3–27

Стр.

ГЛАВА 4. ИЗМЕРЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ I.4–1

4.1 Общие сведения I.4–1
4.2 Психрометр I.4–6
4.3 Волосной гигрометр I.4–14
4.4 Гигрометр точки росы с охлаждаемым зеркалом I.4–17
4.5 Конденсационный гигрометр с подогреваемым раствором хлорида лития (подогреваемый гигрометр точки росы) I.4–20
4.6 Электрические гигрометры сопротивления и емкости I.4–23
4.7 Гигрометры, основанные на поглощении электромагнитного излучения I.4–24
4.8 Техника безопасности I.4–24
4.9 Эталонные приборы и калибровка I.4–25

Приложение 4.A. Водяной пар в атмосфере – термины и определения I.4–30
Приложение 4.B. Формулы для расчета характеристик влажности I.4–33
Справочная и дополнительная литература I.4–35

ГЛАВА 5. ИЗМЕРЕНИЕ ПРИЗЕМНОГО ВЕТРА I.5–1

5.1 Общие сведения I.5–1
5.2 Визуальная оценка ветра I.5–4
5.3 Простые методы инструментальных наблюдений I.5–5
5.4 Чашечные и крыльчатые анемометры I.5–5
5.5 Флюгеры для измерения направления ветра I.5–6
5.6 Другие приборы для измерения ветра I.5–7
5.7 Датчики и их комбинации для измерения составляющих ветра I.5–7
5.8 Методы обработки данных I.5–7
5.9 Размещение приборов для наблюдения за ветром I.5–10
5.10 Калибровка и обслуживание I.5–13

Приложение. Интегральный параметр шероховатости I.5–15
Справочная и дополнительная литература I.5–17

ГЛАВА 6. ИЗМЕРЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА ОСАДКОВ I.6–1

6.1 Общие сведения I.6–1
6.2 Размещение и установка I.6–3
6.3 Нерегистрирующие осадкомеры I.6–4
6.4 Погрешности и поправки при измерении количества осадков I.6–6
6.5 Плювиографы I.6–9
6.6 Измерение росы, отложения льда и осадков в виде тумана I.6–12
6.7 Измерение высоты выпавшего снега и снежного покрова I.6–16

Приложение 6.A. Станции для взаимных сравнений измерений осадков I.6–19
Приложение 6.B. Предлагаемые процедуры коррекции измерений осадков I.6–20
Приложение 6.C. Стандартизированная процедура для лабораторной калибровки приборов накопительного типа, измеряющих интенсивность дождя I.6–21
Справочная и дополнительная литература I.6–24

ГЛАВА 7. ИЗМЕРЕНИЕ РАДИАЦИИ I.7–1

7.1 Общие сведения I.7–1
7.2 Измерения прямой солнечной радиации I.7–5
7.3 Измерение суммарной и рассеянной радиации I.7–11
7.4 Измерение интегральной и длинноволновой радиации I.7–21

Стр.

7.5 Измерение специализированных радиационных параметров I.7–26
7.6 Измерение ультрафиолетового (УФ) излучения I.7–27
Приложение 7.A. Номенклатура актинометрических и фотометрических величин I.7–33
Приложение 7.B. Метеорологические радиационные параметры, их определения I.7–35
Приложение 7.C. Характеристика мировых, региональных и национальных радиационных центров I.7–37
Приложение 7.D. Необходимые формулы I.7–40
Приложение 7.E. Рассеянная радиация – поправка на затеняющее кольцо I.7–42
Справочная и дополнительная литература I.7–43

ГЛАВА 8. ИЗМЕРЕНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ СОЛНЕЧНОГО СИЯНИЯ I.8–1

8.1 Общие сведения I.8–1
8.2 Приборы и датчики I.8–4
8.3 Установка приемников солнечного сияния I.8–7
8.4 Общие источники ошибок I.8–8
8.5 Калибровка I.8–8
8.6 Техническое обслуживание I.8–10
Приложение. Алгоритм вычисления продолжительности солнечного сияния на основе измерений прямой суммарной солнечной радиации I.8–11
Справочная и дополнительная литература I.8–12

ГЛАВА 9. ИЗМЕРЕНИЕ ВИДИМОСТИ I.9–1

9.1 Общие сведения I.9–1
9.2 Визуальная оценка метеорологической оптической дальности I.9–5
9.3 Инструментальные измерения метеорологической оптической дальности I.9–8
Справочная и дополнительная литература I.9–15

ГЛАВА 10. ИЗМЕРЕНИЕ ИСПАРЕНИЯ I.10–1

10.1 Общие сведения I.10–1
10.2 Атмометры I.10–2
10.3 Испарители и испарительные бассейны I.10–3
10.4 Измерители суммарного испарения (лизиметры) I.10–6
10.5 Оценка испарения с естественных поверхностей I.10–8
Справочная и дополнительная литература I.10–11

ГЛАВА 11. ИЗМЕРЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ I.11–1

11.1 Общие сведения I.11–1
11.2 Прямое гравиметрическое измерение содержания влаги в почве I.11–4
11.3 Содержание влаги в почве: косвенные методы I.11–5
11.4 Приборы для измерения потенциала влажности почвы I.11–8
11.5 Дистанционное зондирование влажности почвы I.11–10
11.6 Выбор места и размер пробы I.11–11
Справочная и дополнительная литература I.11–12

ГЛАВА 12. АЭРОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ, ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ I.12–1

12.1 Общие сведения I.12–1
12.2 Радиозондовые электронные средства I.12–7
12.3 Датчики температуры I.12–8

Стр.

12.4 Датчики давления I.12–11
12.5 Датчики относительной влажности I.12–14
12.6 Оборудование наземной станции I.12–17
12.7 Эксплуатация радиозондов I.12–18
12.8 Погрешности радиозондовых измерений I.12–21
12.9 Сравнение, калибровка и обслуживание I.12–33
12.10 Вычисления и результаты измерений I.12–37

Приложение 12.A. Требования к точности (стандартная погрешность) аэрологических измерений для синоптической метеорологии, интерпретированные для оперативных аэрологических и ветровых измерений I.12–39

Приложение 12.B. Пределы допустимых значений при измерениях ветра на высотах и радиозондовых измерениях температуры, относительной влажности и геопотенциальной высоты I.12–40

Приложение 12.C. Рекомендации по организации сравнений радиозондов и учреждению центров проведения испытаний I.12–45

Справочная и дополнительная литература I.12–51

ГЛАВА 13. ИЗМЕРЕНИЕ ВЕТРА НА ВЫСОТАХ I.13–1

13.1 Общие положения I.13–1
13.2 Датчики и приборы для измерения ветра на высотах I.13–5
13.3 Методы измерений I.13–12
13.4 Размещение наземного оборудования I.13–14
13.5 Источники ошибок I.13–15
13.6 Сравнения, калибровка и техническое обслуживание I.13–20
13.7 Поправки I.13–22

Справочная и дополнительная литература I.13–23

ГЛАВА 14. НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ТЕКУЩЕЙ И ПРОШЕДШЕЙ ПОГОДОЙ; СОСТОЯНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ПОЧВЫ I.14–1

14.1 Общие сведения I.14–1
14.2 Наблюдение за текущей и прошедшей погодой I.14–2
14.3 Наблюдение за состоянием поверхности почвы I.14–8
14.4 Наблюдение за особыми явлениями I.14–8

Приложение. Критерии для интенсивности слабых, умеренных и сильных осадков I.14–10

Справочная и дополнительная литература I.14–11

ГЛАВА 15. НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ОБЛАКАМИ I.15–1

15.1 Общие сведения I.15–1
15.2 Оценка и наблюдения за количеством, высотой нижней границы и видами облаков, осуществляемые наблюдателем I.15–3
15.3 Инструментальные измерения количества облаков I.15–5
15.4 Инструментальные измерения высоты нижней границы облаков с помощью облачного прожектора I.15–7
15.5 Инструментальное измерение форм облаков I.15–12
15.6 Другие особенности, связанные с облаками I.15–12

Справочная и дополнительная литература I.15–13

Стр.

ГЛАВА 16. ИЗМЕРЕНИЕ ОЗОНА I.16–1

16.1 Общие сведения I.16–1
16.2 Измерения приземного озона I.16–3
16.3 Измерения общего содержания озона I.16–5
16.4 Определение вертикального распределения озона I.16–12
16.5 Поправки к данным измерения озона I.16–18
16.6 Наблюдения с воздушных судов и спутников I.16–19

Приложение 16.A. Единицы измерения общего и локального содержания озона I.16–20

Приложение 16.B. Теория измерений I.16–22

Справочная и дополнительная литература I.16–24

ГЛАВА 17. ИЗМЕРЕНИЕ АТМОСФЕРНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ I.17–1

17.1 Общие сведения I.17–1
17.2 Измерение атмосферных составляющих I.17–1
17.3 Обеспечение качества I.17–12

Справочная и дополнительная литература I.17–14

ГЛАВА 1

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1 МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ

1.1.1 Общие сведения

Метеорологические (и соответствующие экологические и геофизические) наблюдения проводятся в силу целого ряда причин. Данные таких наблюдений используются для подготовки в режиме реального времени метеорологических анализов, прогнозов и предупреждений о неблагоприятной погоде, для исследования климата, в текущей деятельности отраслей экономики, зависящих от погоды (например, обеспечение полетов воздушных судов с местных аэродромов, строительных работ на суше и на море), для целей гидрологии и сельскохозяйственной метеорологии и для проведения научных исследований в области метеорологии и климатологии. Цель *Руководства по метеорологическим приборам и методам наблюдений* заключается в оказании поддержки этой деятельности посредством предоставления рекомендаций по эффективной практике при проведении метеорологических измерений и наблюдений.

Существует много других источников дополнительных рекомендаций, и пользователям следует обращаться к справочной литературе, помещенной в конце каждой главы, для ознакомления с библиографией теории и практики, связанной с приборами и методами наблюдений. Справочная литература содержит также ссылки на национальные виды практики, на национальные и международные стандарты и на конкретную литературу. Она включает также доклады, опубликованные Всемирной Метеорологической Организацией (ВМО) от Комиссии по приборам и методам наблюдений (КПМН), касающихся технических конференций, приборного обеспечения и международных сравнений приборов. Многие другие наставления и руководства, выпущенные ВМО, посвящены конкретным применениям данных метеорологических наблюдений (см., в частности, публикации, посвященные Глобальной системе наблюдений (ВМО, 2003*a*; 1989), авиационной метеорологии (ВМО, 1990), гидрологии (ВМО, 1994), сельскохозяйственной метеорологии (ВМО, 1981) и климатологии (ВМО, 1983).

Особое значение для инструментальных измерений имеют обеспечение и поддержание качества. Всё настоящее Руководство содержит многочисленные рекомендации с тем, чтобы были удовлетворены заявленные требования к техническим характеристикам. В частности, часть III настоящего Руководства посвящена вопросам обеспечения качества и менеджмента систем наблюдений. Признается, что исключительно важное значение имеют менеджмент качества и профессиональная подготовка специалистов по приборам. В этой связи по рекомендации КПМН[1] несколько региональных ассоциаций ВМО учредили региональные центры по приборам (РЦП) для сохранения стандартов и проведения консультаций по метеорологическим измерениям. Круг обязанностей этих центров и места их нахождения приводятся в приложении 1.A. Кроме того, по рекомендации Совместной технической комиссии ВМО/МОК по океанографии и морской метеорологии[2] (ВМО, 2009) была создана сеть региональных центров по морским приборам (РЦМП) для выполнения аналогичных функций, связанных с морской метеорологией и другими соответствующими океанографическими измерениями. Их круг обязанностей и места их нахождения представлены в части II, глава 4, приложение 4.A.

Определения и стандарты, изложенные в настоящем Руководстве (см. раздел 1.5.1), соответствуют стандартам, принятым на международном уровне. Базовыми документами, к которым необходимо обращаться, является *Международный метеорологический словарь* (ВМО, 1992*a*) и *Международный словарь основных и общих терминов в метрологии* (ИСО, 1993*a*).

1.1.2 Репрезентативность

Репрезентативность данных наблюдений – это та степень точности, с которой они описывают значение переменной величины, требуемой для конкретной цели. В этой связи это не зафиксированное качество любых данных наблюдений, а результаты совместной оценки приборов, интервала измерений и размещения приборов по сравнению с требованиями определенного конкретного применения. Например, данные синоптических наблюдений должны быть, как правило, репрезентативными для района размером до 100 км вокруг станции, однако для мелкомасштабных или местных применений рассматриваемый район может иметь размер соответствующей территории в 10 км или меньше.

---

1 Рекомендовано Комиссией по приборам и методам наблюдений на ее девятой сессии (1985 г.), рекомендация 19.

2 Рекомендовано Совместной технической комиссией ВМО/МОК по океанографии и морской метеорологии на ее третьей сессии (2009 г.), рекомендация 1 (СКОММ-III).

В частности, применения обладают своими собственными предпочтительными временными масштабами и пространственными масштабами для осреднения, плотности станций и разрешающей способности явления – небольшими для сельскохозяйственной метеорологии, большими для глобального долгосрочного прогнозирования. Масштабы прогнозирования тесно связаны с временными масштабами данного явления; таким образом, краткосрочные метеорологические прогнозы требуют проведения более частых наблюдений более плотной сетью на ограниченной территории с тем, чтобы обнаруживать любые мелкомасштабные явления и их быстрое развитие. На основе использования различных источников (ВМО, 2003*a*; 2001; Орлански, 1975) горизонтальные метеорологические масштабы могут быть классифицированы следующим образом, при этом коэффициент погрешности равен двум:

(a) микромасштаб (менее 100 м) для сельскохозяйственной метеорологии, например испарение;
(b) топографический или местный масштаб (100 м – 3 км), например загрязнение воздуха, торнадо;
(c) мезомасштаб (3 – 100 м), например грозы, морской и береговой бриз;
(d) крупный масштаб (100 – 3 000 км), например фронты, различные циклоны, облачные скопления;
(e) планетарный масштаб (более 3 000 км), например длинные волны в верхней тропосфере.

В разделе 1.6 рассматриваются требуемые и достижимые погрешности измерительных систем. Установленные достижимые погрешности могут быть получены с помощью эффективных систем приборов, которые эксплуатируются должным образом, но на практике это происходит не всегда. Надлежащая практика наблюдений требует профессионального мастерства, учебной подготовки, оборудования и поддержки, которые не всегда имеются в достаточной степени. Необходимые интервалы измерений меняются в зависимости от применения: минуты – для авиации, часы – для сельского хозяйства и сутки – для описания климата. Организация хранения данных представляет собой компромисс между имеющимися возможностями и потребностями пользователей.

Трудно выполнимой задачей является правильная установка приборов, которая репрезентативна для масштабов от нескольких метров до 100 км (см. раздел 1.3). Погрешности, связанные с нерепрезентативностью установки приборов, могут быть гораздо более значительными, чем погрешности, ожидаемые от отдельно стоящих приборов. Данные со станции, размещенной в горной или прибрежной местности, являются, вероятно, нерепрезентативными в крупном масштабе или мезомасштабе. Однако хорошая однородность данных наблюдений во времени может позволить пользователям применять для целей климатических исследований данные, полученные даже от нерезепрентативных станций.

В приложении 1.B рассматривается более подробно вопрос о репрезентативности места размещения и даются руководящие указания относительно классификации наземных наблюдательных площадок на суше, с тем чтобы указать их репрезентативность для измерения различных переменных величин.

1.1.3 Метаданные

Целью настоящего Руководства и соответствующих публикаций ВМО является обеспечение надежности данных наблюдений посредством стандартизации. Однако местные ресурсы и обстоятельства могут являться причиной отклонений от согласованных стандартов средств измерений и их установки. Характерным примером является пример регионов с обильными снегопадами, где приборы устанавливаются выше, чем обычно, с тем чтобы они могли быть полезными зимой, а также летом.

Пользователям данных метеорологических наблюдений часто необходимо знать фактическую установку, тип и состояние оборудования, а также условия его эксплуатации и, вероятно, обстоятельства проведения наблюдений. Это имеет особенно важное значение при изучении климата, когда необходимо подробно изучать историю станций. Следует сохранять метаданные (данные о данных), касающиеся всех вопросов, связанных с созданием и функционированием станций, описанных в разделе 1.3, и происходящих изменениях, включая историю калибровки приборов и их обслуживания, а также изменений в местах их установки и в составе персонала (ВМО, 2003*b*). Метаданные особенно важны для величин, которые особенно чувствительны к установке, таких как осадки, ветер и температура. Одной из основных форм метаданных является информация о доступности, наличии и качестве метеорологических данных и метаданных о них.

1.2 СИСТЕМЫ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

Обеспечение потребностей в результатах наблюдений достигается путем использования измерений в точке или систем дистанционного зондирования

(включая космические системы) в соответствии со способностью различных сенсорных систем проводить измерения необходимых величин. В публикации ВМО (2003*a*) дается описание потребностей с точки зрения глобальных, региональных и национальных масштабов и в соответствии с районом применения. Глобальная система наблюдений, разработанная для удовлетворения этих потребностей, состоит из наземной и космической подсистем.

В наземную подсистему входит множество станций (пунктов наблюдений) различного типа, в зависимости от конкретного применения (например, наземная синоптическая станция, аэрологическая станция, климатологическая станция и т.д.). Космическая подсистема включает ряд космических аппаратов, осуществляющих зондирование из космоса, и связанный с ними наземный комплекс для управления, контроля и приема данных. Последующие пункты и главы настоящего Руководства посвящены наземной подсистеме и, в меньшей степени, космической подсистеме. Для выведения данных в результате определенных космических наблюдений автоматизированными системами, например данных о текущей погоде, необходимо так называемая концепция «мультисенсора», когда используется алгоритм для расчета результата по выходным данным нескольких датчиков.

1.3 ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

В публикации ВМО (2003 а) подробно изложены требования в отношении тех величин, за которыми должны проводиться наблюдения, в соответствии с типом станции наблюдательной сети. В настоящем разделе рассматриваются требования к наблюдениям, проводимым типичной климатологической или синоптической станцией наземной сети наблюдений.

На станции, предназначенной для приземных наблюдений, проводятся наблюдения за следующими величинами (указаны главы части I Руководства):

Текущая и прошедшая погода	(глава 14)
Направление и скорость ветра	(глава 5)
Облачность (количество и форма облаков, высота нижней границы)	(глава 15)
Видимость	(глава 9)
Температура воздуха	(глава 2)
Относительная влажность	(глава 4)
Атмосферное давление	(глава 3)
Осадки	(глава 6)
Снежный покров	(глава 6)
Солнечное сияние и/или солнечное излучение	(главы 7, 8)
Температура почвы	(глава 2)
Испарение	(глава 10)

Существуют приборы, с помощью которых можно измерить все эти величины, за исключением формы облаков. Однако при наличии современной технологии приборы для наблюдения за текущей и прошедшей погодой, количеством и высотой облаков, а также снежным покровом, не могут осуществлять наблюдения за всем спектром данных явлений, в то время как это могут сделать наблюдатели.

На некоторых метеорологических станциях проводятся аэрологические измерения (часть I, главы 12 и 13), измерения влажности почвы (часть I, глава 11), озона (часть I, глава 16) и состава атмосферы (часть I, глава 17), а на некоторых из них используются системы специальных приборов, описанные в части II настоящего Руководства.

Подробные сведения о методах наблюдения и необходимом приборном обеспечении содержатся в последующих главах настоящего Руководства.

1.3.1 Автоматические метеорологические станции

Большинство метеорологических величин, необходимых для синоптических, климатологических и аэронавигационных целей, могут быть измерены при помощи автоматического приборного обеспечения (часть II, глава 1).

По мере расширения возможностей автоматических систем постоянно увеличивается соотношение между полностью автоматизированными метеорологическими станциями и метеорологическими станциями, обслуживаемыми наблюдателями (с автоматическим приборным обеспечением или без него). Изложенные в последующих пунктах рекомендации относительно размещения и установки приборов, замены приборного обеспечения, а также выполнения инспекций и обслуживания, применимы в равной мере как к автоматическим метеорологическим станциям, так и к метеорологическим станциям, обслуживаемым персоналом.

1.3.2 Наблюдатели

Услуги наблюдателей-метеорологов необходимы по ряду следующих причин:

(a) проведение с помощью соответствующих приборов синоптических и/или климатологи-

ческих наблюдений с необходимой степенью неопределенности и репрезентативности;

(b) поддержание в хорошем состоянии приборов, документации метаданных и мест наблюдения;

(c) кодирование и передача результатов наблюдений (при отсутствии автоматических систем кодирования и связи);

(d) обслуживание регистрирующих устройств на местах, включая замену, при необходимости, регистрационных лент;

(e) подготовка или сбор недельных и/или месячных сводок климатологических данных в случае отсутствия или неадекватности автоматических систем;

(f) обеспечение дополнительных или дублирующих наблюдений в тех случаях, когда автоматическое оборудование не позволяет проводить наблюдения за всеми необходимыми величинами или когда оно выходит из строя;

(g) реагирование на запросы населения и специалистов.

Наблюдатели должны пройти профессиональную подготовку и/или быть аттестованы уполномоченной метеорологической службой для констатации их компетенции проводить наблюдения в соответствии с требуемыми стандартами. Они должны быть способны интерпретировать инструкции по использованию приборного обеспечения и ручных методов работы, применяемых к их собственным конкретным системам наблюдений. Руководящие указания относительно требований к профессиональной подготовке наблюдателей в области использования приборного обеспечения будут изложены в главе 5 части III.

1.3.3 Размещение и установка приборов

1.3.3.1 Выбор места размещения

Метеорологические станции организуются таким образом, чтобы репрезентативные измерения (или наблюдения) можно было проводить в соответствии с типом данной станции. Так на станции, входящей в синоптическую сеть, должны проводиться наблюдения для удовлетворения потребностей в данных в синоптическом масштабе, в то время как на авиационной метеорологической наблюдательной станции должны проводиться наблюдения, дающие описания конкретных условий для местного пункта (аэродрома). В тех случаях, когда станции используются для нескольких целей, например для целей авиации, синоптических и климатологических целей, то наиболее строгое требование будет диктовать точное положение места наблюдений и соответствующих средств измерений. Подробное исследование вопроса о размещении и установке приборов содержатся в публикации ВМО (1993*a*).

В качестве примера приводятся следующие соображения, касающиеся требований к выбору места размещения и установки приборов на типичной синоптической или климатологической станции в региональной или национальной сети:

(a) метеорологические приборы следует устанавливать на ровном участке земли желательно размером не менее 25 м x 25 м, на котором имеется множество установок, однако в тех случаях, когда имеется относительно небольшое число установок (как на рис/ 1.1), данная площадь может быть меньшей, например 20 м x 16 м (огороженное место). Участок должен быть покрыт короткой травой или иметь поверхность, характерную для данной местности, и быть окруженным оградой открытого типа или дощатым забором, исключающими проникновение посторонних лиц. Внутри огороженного пространства участок оголенной земли размером примерно 4 м x 6 м резервируется для проведения наблюдений за состоянием поверхности почвы и за ее температурой на глубинах равных или менее 20 см (часть I, глава 2) (температура почвы на глубинах более 20 см измеряется за пределами этого оголенного участка земли). Пример плана подобной станции приводится на рис.1.1 (взято из публикации ВМО, 1989)[3];

(b) поблизости не должно быть крутых склонов и само данное место не должно находиться во впадине. Если эти условия не соблюдаются, то данные наблюдений могут отражать особенности, имеющие только местное значение;

(c) место размещения должно находиться далеко от деревьев, зданий, стен или других препятствий. Расстояние от любого такого препятствия (включая ограждение участка) до осадкомера должно быть как минимум в два раза, а предпочтительно в четыре раза, больше высоты данного объекта над краем осадкомера;

(d) гелиограф, осадкомер и анеморумбометр должны устанавливаться в соответствии с их требованиями, предпочтительно на той же площадке, что и другие приборы;

(e) следует отметить, что огороженный участок может быть не лучшим местом для оценки скорости и направления ветра; желательным может оказаться выбор еще одного пункта для наблюдений, который более открыт для воздействия ветра;

3 Часть 1. Измерение метеорологических переменных 1-4S.

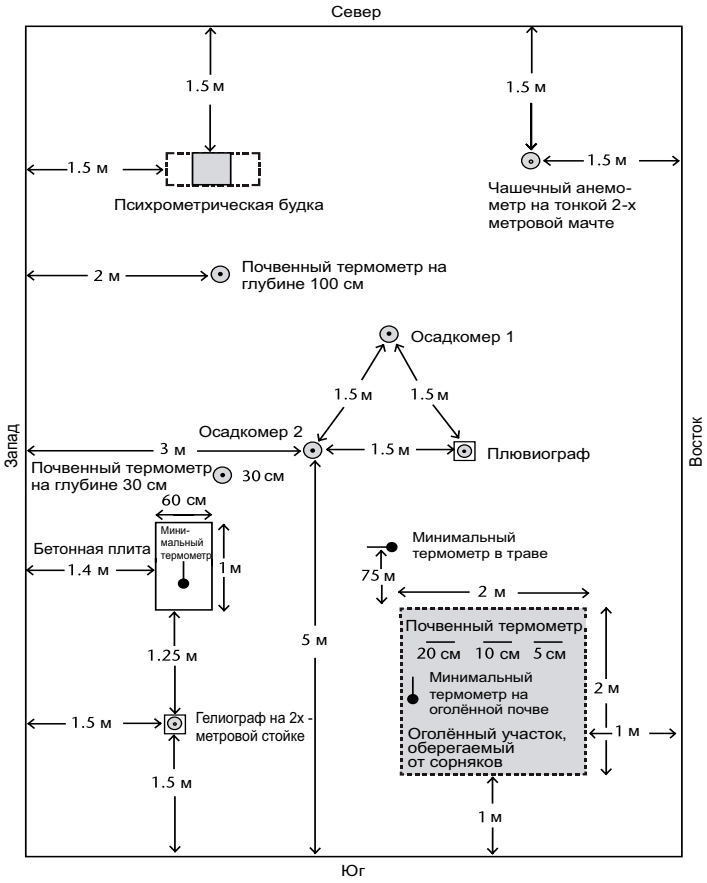


Рис. 1.1. Схема размещения приборов на метеорологической площадке станции северного полушария и минимальные расстояния между установками

(f) очень открытые места, которые являются удовлетворительными для большинства приборов, не подходят для осадкомеров. В таких местах количество попавших в осадкомер осадков уменьшается в условиях иных, нежели слабый ветер, и поэтому необходимо наличие определенной защиты для осадкомера;

(g) если рядом с оградой площадки, на некотором расстоянии расположены такие объекты, как деревья или здания, в значительной мере закрывающие горизонт, следует выбрать альтернативные пункты обзора для проведения наблюдений за солнечным сиянием или излучением;

(h) позиция, используемая для наблюдений за облаками и видимостью, должна быть как можно более открытой и обеспечивать максимально возможный обзор неба и окружающей местности;

(i) в случае прибрежных станций желательно, чтобы на станции обеспечивался обзор открытого моря. Однако станция не должна находиться слишком близко от края обрыва, поскольку завихрения ветра, создаваемые этим обрывом, будут влиять на результаты измерений ветра и количества осадков;

(j) наблюдения за облачностью и видимостью в ночное время лучше всего проводить из места, не затронутого посторонним освещением.

Очевидно, что некоторые из вышеприведенных соображений являются несколько противоречивыми и требуют компромиссных решений. В последующих главах приводится подробная информация, касающаяся конкретных приборов и измерений.

1.3.3.2 Координаты станции

Местоположение станции, ссылка на которое делается в Геодезической модели Земли 1996 г. (ГМЗ96) Всемирной геодезической системы 1984 г. (ВСГ-84), должно быть точно известно и зарегистрировано[4]. Координатами станции являются:

(a) широта в градусах с разрешением 1:1000;

(b) долгота в градусах с разрешением 1:1000;

4 Объяснение ВГС-84 и вопросы регистрации, см. ИКАО, 2002 г.

(c) высота станции над средним уровнем моря[5], т. е. расстояние по вертикали от этого уровня до станции, определенная с точностью до метра.

Эти координаты относятся к тому участку земли, на котором проводятся наблюдения, и они могут не совпадать с координатами города, деревни или аэродрома, по которым названа данная станция.

Высота станции определяется как расстояние по вертикали между средним уровнем моря того участка земли, на котором установлен осадкомер, или, если осадкомер отсутствует, то участком, на котором размещена метеорологическая будка. Если нет ни осадкомера, ни метеорологической будки, то это средний уровень территории вблизи станции. Если со станции поступает информация о давлении, то должна конкретно указываться высота, на которой определяется атмосферное давление на станции. Это тот уровень, к которому относятся значения барометрического давления на станции; такие барометрические величины называются «давление на уровне станции» и означают ссылку на данный уровень с целью сохранения непрерывности рядов данных по атмосферному давлению (ВМО, 1993*b*).

Если станция находится на аэродроме, то должны также указываться другие высоты (см. часть II, глава 2, и ВМО, 1990). Определения мер высоты и среднего уровня моря даны в публикации ВМО (1992*a*).

1.3.4 Замены приборного обеспечения и однородность показаний приборов

Характеристики места для проведения наблюдений, как правило, со временем меняются, например в результате роста деревьев или возведения зданий на соседних участках. Эти места следует выбирать таким образом, чтобы по возможности свести к минимуму эти воздействия. В качестве компонента метаданных следует вести и регулярно обновлять документацию по географии данного места и его подверженности воздействиям (см. приложение 1.C и ВМО, 2003*b*).

Особенно важно свести к минимуму последствия замен приборов и/или изменений в размещении конкретных приборов. Хотя статические характеристики новых приборов могут быть, вероятно, хорошо известны, при оперативном размещении приборов они могут внести очевидные изменения в климатологию места размещения. Для того, чтобы предотвратить подобную возможность, данные наблюдений от новых приборов следует сравнивать в течение длительного периода времени (по меньшей мере не менее одного года; см. Руководство по климатологической практике (ВМО, 1983) с данными старой системы измерений, перед тем как последняя будет снята с эксплуатации. То же правило применяется, когда происходит смена места для проведения наблюдений. В тех случаях, когда практически невозможно осуществить данную процедуру во всех местах проведения наблюдений, весьма важно проводить сравнения в выбранных репрезентативных местах, с тем чтобы попытаться уменьшить погрешности в данных измерений, которые могут быть следствием изменения технологии или вынужденной смены места наблюдений.

1.3.5 Инспекция и обслуживание

1.3.5.1 Инспекция станций

Все синоптические наземные станции и основные климатологические станции следует инспектировать не реже одного раза в два года. Агрометеорологические и специальные станции следует инспектировать с достаточно короткими интервалами, с тем чтобы обеспечить поддержание высокого качества наблюдений и правильного функционирования приборов.

Основная цель таких инспекций заключается в том, чтобы установить следующие факты:

(a) местоположение и установка приборов известны и приемлемы и должным образом документированы;

(b) приборы являются утвержденными образцами, находятся в хорошем состоянии и, при необходимости, регулярно поверяются по соответствующим эталонам;

(c) соблюдается единообразие в методах наблюдений и в процедурах расчета количественных значений данных наблюдений;

(d) наблюдатели обладают соответствующей квалификацией для выполнения своих обязанностей.

Дополнительная информация о стандартизации приборов приведена в разделе 1.5.

1.3.5.2 Обслуживание

Места и приборы для проведения наблюдений должны обслуживаться на регулярной основе, с

5 Средний уровень моря (СУМ) определяется в публикации ВМО, 1992*a*. Фиксированным исходным уровнем СУМ должен быть хорошо определенный геоид, такой как Геодезическая модель Земли 1996 г. ВГВ-84 (ГМ96) [Геоид: эквипотенциальная поверхность гравитационного поля Земли, которая лучше всего совпадает с глобальным СУМ по методу наименьших квадратов].

тем чтобы качество наблюдений заметно не ухудшалось в интервалах между инспекциями станций. Графики планового (профилактического) обслуживания включают регулярную «уборку» в местах проведения наблюдений (например, стрижку травы и очистку подверженных воздействиям поверхностей приборов) и рекомендованные производителем проверки работы автоматических приборов. Плановые проверки в рамках контроля качества, проводимые как на самой станции, так и в центральном пункте, следует проводить таким образом, чтобы дефекты в работе оборудования обнаруживались на самой ранней стадии их появления. В зависимости от характера дефектов или типа станции оборудование должно заменяться или ремонтироваться в соответствии с согласованными приоритетами и временными масштабами. В отношении метаданных особенно важно регистрировать в журнале дефекты приборов, изменения в установке приборов и предпринятые корректирующие действия в тех случаях, когда данные наблюдений используются для климатологических целей.

Дополнительную информацию об инспекции и менеджменте станций можно найти в публикации ВМО (1989).

1.4 ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ПРИБОРАМ

1.4.1 Желательные характеристики

Наиболее важные требования к метеорологическим приборам касаются следующих их характеристик:

(a) погрешность, в соответствии с установленным требованием для конкретной переменной);
(b) надежность и стабильность;
(c) удобство эксплуатации, калибровки и обслуживания;
(d) простота конструкции (в соответствии с требованиями);
(e) долговечность;
(f) приемлемая стоимость прибора, расходных материалов и запчастей.

В отношении первых двух характеристик важно, чтобы прибор обеспечивал заданную точность в течение длительного времени. Это намного лучше, чем высокая исходная точность, которую, однако, невозможно сохранить в условиях последующей длительной эксплуатации.

Первоначальные калибровки приборов выявляют, как правило, отклонения от идеального результата, что ведет к необходимости введения поправок в данные в ходе обычных операций. Важно, чтобы сведения о таких поправках поставлялись вместе с приборами и хранились вместе с ними в пункте наблюдения, а также чтобы для наблюдателей были обеспечены четкие руководящие инструкции по их использованию.

Простота и прочность конструкции, удобство в эксплуатации и обслуживании приборов являются важными их характеристиками, поскольку большинство метеорологических приборов могут использоваться весьма продолжительное время и при этом находиться далеко от мест ремонта. Прочность конструкции особенно желательна для тех приборов, которые полностью или частично находятся под воздействием погодных условий. Обеспечение перечисленных характеристик приборов обычно позволяет уменьшить затраты на проведение качественных наблюдений и компенсировать таким образом первоначальные вложения средств.

1.4.2 Самописцы

Во многих моделях самописцев, применяемых в метеорологии, реакция чувствительного элемента усиливается рычагами, заставляющими перо передвигаться по ленте, закрепленной на барабане с часовым механизмом. При работе таких самописцев следует обеспечивать максимально возможное отсутствие трения, причем не только в подшипниках, но также между пером и бумагой. Следует предусмотреть определенные технические возможности для регулирования давления пера на бумагу, однако это давление должно сводиться к минимуму, обеспечивающему непрерывный четкий след от чернил (пасты) на ленте. Следует также предусмотреть возможность нанесения на лентах самописцев отметок времени. При конструировании самописцев для использования в холодном климате особое внимание следует уделять тому, чтобы на эффективности их работы не сказывалось влияние сильных холодов и влажности и чтобы плановые процедуры (нанесение отметок времени и т. д.) могли бы выполняться наблюдателями в перчатках.

Необходимо регулярное сравнение работы самописцев с работой приборов прямого считывания.

Все шире используются электронные самописцы с магнитной лентой или микросхемами на полупроводниках. Многие из вышеприведенных требований, касающихся подшипников, трения и обслуживания в холодную погоду, относятся и к механическим компонентам таких приборов.

1.5 ЭТАЛОНЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

1.5.1 Определения эталонов измерений

Термин «эталон» и другие аналогичные термины означают различные приборы, методы и шкалы, используемые для установления неопределенности измерений. Номенклатура эталонов измерений приводится в *Международном словаре* основных и общих терминов в метрологии, который был подготовлен одновременно Международным бюро мер и весов, Международной электротехнической комиссии, Международной федерацией клинической химии, Международной организацией стандартизации, Международным союзом чистой и прикладной химии, Международным союзом чистой и прикладной физики и Международной организацией законодательной метрологии, и был опубликован ИСО. Существующим в настоящее время вариантом является публикация Объединенного комитета по руководствам в метрологии 200:2008 (ОКРМ 200:2008), имеющаяся по адресу http://www.bipm.org/en/publications/guides/vim.html. Ниже приводятся некоторые из определений:

Эталон измерения: реализация определения заданного количества с установленной оценкой количества и связанной с ними неопределенностью измерений, служащие в качестве образца.

Пример 1: Эталон измерения массы 1 кг с соответствующей погрешностью измерений эталоном в 3 мг.

Пример 2: Эталонный резистор измерений номиналом в 100 Ом с соответствующей погрешностью эталонного измерения в 1 моМ.

Международный эталон измерений: эталон измерений, признанный документами международного соглашения и предназначенный для использования в мировом масштабе.

Пример 1: Международный прототип килограмма.

Национальный эталон измерений (национальный эталон): эталон измерений, признанный национальным органом в государстве или экономике в качестве основы для установления количественных значений для других эталонов измерений для соответствующего вида количества.

Первичный эталон измерений (первичный эталон): эталон измерений, установленный с использованием процедуры первичных эталонных измерений или созданный в качестве артефакта и выбранный в соответствии с соглашением.

Пример 1: Первичный эталон измерений концентрации количества вещества, подготовленной путём растворения известного количества вещества химического компонента в известном объеме раствора.

Пример 2: Первичный эталон измерений для давления, основанный на отдельных измерениях силы и площади.

Вторичный эталон измерений (вторичный эталон): эталон измерений, установленный путем калибровки относительно первичного эталона измерений для количества того же типа.

Образцовый эталон измерений (образцовый эталон): эталон измерений, предназначенный для калибровки других эталонов измерений для количеств данного типа в конкретной организации или в конкретном месте.

Рабочий эталон измерений (рабочий эталон): эталон измерений, который используется на плановой основе для калибровки или проверки измерительных приборов или измерительных систем.

Примечания:

1. Рабочий эталон измерений обычно калибруется путем сравнения с образцовым эталоном измерений.
2. В отношении верификации также иногда используются термины «проверочный эталон» или «контрольный эталон».

Переходный эталон: эталон, используемый в качестве промежуточного для сравнения эталонов.

Примечание: Термин «переходное средство» следует использовать в тех случаях, когда промежуточное средство не является эталоном.

Переходное средство измерений (переходное средство): средство, используемое в качестве промежуточного для сравнения эталонов измерений.

Примечание: В некоторых случаях эталоны измерений используются в качестве переходных средств.

Транспортируемый эталон: эталон, имеющий иногда специальную конструкцию и предназначенный для транспортировки между различными пунктами.

Групповой эталон: набор аналогичных физических величин или измерительных приборов, выполняющих при их совместном использовании роль эталона.

Пример: Всемирный радиометрический справочник

Примечания:

1. Групповой эталон обычно предназначается для установления единственного значения количества.
2. Величина, определяемая групповым эталоном, является соответствующим результатом усреднения величин, измеренных отдельными приборами.

Прослеживаемость: свойство результата измерений или значения эталона, благодаря которому они могут быть соотнесены с установленными образцами, обычно национальными или международными эталонами, на основе непрерывной цепи сравнений, которые все обладают установленными погрешностями.

Метрологическая прослеживаемость: свойство результата измерений, благодаря которому данный результат может быть соотнесен с образцом благодаря документированной непрерывной цепи калибровок, при этом каждый из них вносит вклад в погрешность измерений.

Калибровка: операция, которая при определенных условиях устанавливает в первую очередь соотношение между количественными величинами с погрешностями измерений, обусловленных эталонами измерений и соответствующими указаниями связанных с этими погрешностями измерений, и, во вторую очередь, использует эту информацию для установления соотношения с целью получения результата измерений из определенного показания.

Примечания:

1. Результат калибровки может быть выражен в виде заявления, функции калибровки, диаграммы калибровки, кривой калибровки или таблицы калибровки. В некоторых случаях она может заключаться в дополнительной или мультипликативной поправке показания с соответствующей погрешностью измерения.
2. Калибровку не следует путать с корректировкой системы измерений, которую часто ошибочно называют «самокалибровкой», а также с верификацией калибровки.

1.5.2 Процедуры стандартизации

Для того чтобы эффективно контролировать стандартизацию метеорологических приборов в национальном и международном масштабах, Всемирной Метеорологической Организацией была принята система национальных и региональных эталонов. Места нахождения региональных эталонов для измерения атмосферного давления и солнечной радиации указаны в главе 3 части I (приложение 3.B) и главе 7 части I (приложение 7.C) соответственно. Как правило, региональные эталоны назначаются региональными ассоциациями, а национальные эталоны – отдельными странами. Если специально не оговорено иное, приборы, принятые в качестве региональных и национальных эталонов, должны сравниваться посредством транспортируемых эталонов сравнения по меньшей мере один раз в каждые пять лет. Приборы, используемые в качестве транспортируемых эталонов сравнения, не обязательно должны обладать погрешностью первичных или вторичных эталонов; они должны быть, тем не менее, достаточно прочными и устойчивыми, чтобы выдерживать транспортировку без изменения своей калибровки.

Аналогичным образом приборы, используемые на оперативной основе в Службе, должны периодически сравниваться, прямо или косвенно, с национальными эталонами. Сравнения приборов внутри Службы проводят по мере возможности в момент поступления приборов на станцию и потом в ходе каждой регулярной инспекции на станции, как это рекомендовано в разделе 1.3.5. Переносные эталонные приборы, используемые инспекторами, должны сличаться с эталонными приборами Службы до и после каждой инспекции.

Оперативные приборы с различными конструкциями (или принципами действия) должны сопоставляться друг с другом, с тем чтобы обеспечить однородность данных измерений по времени и пространству (см. раздел 1.3.4).

1.5.3 Условные обозначения, единицы измерения и константы

1.5.3.1 Условные обозначения и единицы измерения

Результатом приборных измерений являются цифровые величины. Цель этих измерений заключается в получении физических или метеорологических количественных значений, отражающих состояние атмосферы в конкретном месте. Для целей метеорологической практики показания приборов отражают такие переменные величины, как «атмосферное давление», «температура воздуха» или «скорость ветра». Переменная величина с условным обозначением a обычно представляется в виде a = {a}•[a], где {a} означает цифровое значение и [a] – условное обозначение данной единицы. Общие

принципы, касающиеся количеств, единиц измерения и условных обозначений, констатируются ИСО (1993*b*) и Международным союзом чистой и прикладной физики (МСЧПФ) (1987). Международной системой единиц (СИ) следует пользоваться в качестве системы единиц измерения для оценки метеорологических величин, включенных в доклады о международном обмене. Эта система публикуется и обновляется Международным бюро мер и весов (МБМВ) (1998). Руководство по использованию системы СИ выпускаются Национальным институтом стандартов и технологии (НИСТ) (1995) и ИСО (1993*b*). С переменными величинами, не определенными в качестве международного условного обозначения в Международной системе количественных величин (ISQ), но широко применяемых в метеорологии, можно ознакомиться в *Международных метеорологических таблицах* (ВМО, 1966) и соответствующих глава настоящего Руководства.

При проведении метеорологических наблюдений следует использовать следующие единицы:

(a) атмосферное давление, p, в гектопаскалях (гПа);[6]
(b) температура, *t*, в градусах Цельсия (°C) или *T* в кельвинах (К);

Примечание: Шкалы температур в градусах Цельсия и кельвинах должна соответствовать действующему определению Международной шкалы температур (для 2004 г.: МШТ-90, см. МБМВ, 1990).

(c) скорость ветра, как при приземных, так и при аэрологических наблюдениях, в метрах в секунду (м/с);
(d) направление ветра в градусах по часовой стрелке от направления на север или по шкале 0 до 36, где 36 – это ветер северного направления и 09 – это ветер восточного направления;
(e) относительная влажность, *U*, в процентах (%);
(f) осадки (общее количество) в миллиметрах (мм) или килограммах на м$^{-2}$ (кг/м^2);[7]
(g) интенсивность осадков, Ri, в миллиметрах в час (мм/час) или килограммах на м$^{-2}$ в секунду (кг/м^2 · сек$^{-1}$);[8]
(h) эквивалент снеговой воды в килограммах на м$^{-2}$ (кг м$^{-2}$);
(i) испарение в миллиметрах (мм);
(j) видимость в метрах (м);
(k) энергетическая освещенность в ваттах на м$^{-2}$ и энергетическая экспозиция в джоулях на м$^{-2}$ (Вт м$^{-2}$, Дж м$^{-2}$);
(l) продолжительность солнечного сияния в часах (час);
(m) высота облаков в метрах (м);
(n) количество облаков в октантах (баллах);
(o) геопотенциал, используемый в аэрологических наблюдениях, в стандартных геопотенциальных метрах (м).

Примечание: Высота, уровень или расстояние уровня представлены относительно определенного эталона. Характерными эталонами являются средний уровень моря (СУМ), высота станции и уровень давления 1013,2 гПа.

Стандартный геопотенциальный метр определяется как 0,980 665 динамического метра; для уровней в тропосфере геопотенциал примерно соответствует в численном выражении высоте, выраженной в метрах.

1.5.3.2 Константы

Для использования в метеорологии приняты следующие константы:

(a) абсолютная температура замерзания T_0 = 273,15 К (t = 0,00 °C);
(b) абсолютная температура тройной точки воды *T* = 273,16 К (*t* = 0,01 °C), по определению ИТС-90;
(c) ускорение свободного падения *(gn)* = 9,806 65 м сек$^{-2}$;
(d) плотность ртути при 0 °C = 1,359 51 104 Кг м$^{-3}$.

Величины других констант приведены в публикациях ВМО (1973; 1988).

1.6 ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ

1.6.1 Метеорологические измерения

1.6.1.1 Общие сведения

В настоящем разделе рассматриваются определения, относящиеся к оценке точности и неопределённости измерения погрешностей, при физических измерениях, и в заключении в нем излагаются заявления о требуемых и достижимых погрешностях в метеорологии. Прежде всего в нем рассматриваются некоторые вопросы, которые возникают конкретно при метеорологических измерениях.

---

6 Единицы измерения «паскаль» является производной единицей СИ для величины давления. Данная единица и условное обозначение (бар) – это единица измерения вне системы СИ; в любом документе, в котором она используется, эта единица измерения (бар) должна определяться по отношению к системе СИ. Ее постоянное использование не рекомендуется. По определению, 1 мбар (миллибар) = 1 гПа (гектопаскаль).

7 Предполагает, что 1 мм равен 1 кг/м^2 независимо от температуры.

8 Рекомендация 3 (КОС-XII), приложение 1, принята резолюцией 4 (ИС-LIII).

Термин *измерение* подробно определяется в разделе 1.6.2, однако в большинстве случаев в настоящем Руководстве он используется в менее строгом смысле для обозначения процесса измерения или его результата, который может также называться данными «наблюдений». *Примером* является единичное измерение, обычно одно из ряда точечных или мгновенных показаний системы датчиков, из которых получают осредненное или сглаженное значение, используемое в качестве данных наблюдений. Более теоретический подход к настоящему обсуждению см. часть III, главы 2 и 3.

Термины *точность*, ошибка, погрешность и неопределенность подробно определены в разделе 1.6.2, в котором объясняется, что точность является понятием качества, численным выражением которого является погрешность. Это является эффективной практикой и формой, которой придерживаются в настоящем Руководстве. Ранее общепринятое и менее точное понятие точности определялось как «точность ±x», которое следует понимать как «погрешность x».

1.6.1.2 Источники и оценки погрешности

В последующих главах настоящего Руководства рассматриваются конкретно источники погрешностей при различных метеорологических измерениях, однако в целом можно считать, что они накапливаются по всей цепи получения результатов измерений, начиная от приборных ошибок и заканчивая условиями измерения.

Рассматривая вопрос о том, как возникают погрешности, удобно в качестве примера взять температуру воздуха; но при этом нетрудно адаптировать приводимые ниже аргументы к атмосферному давлению, ветру и другим метеорологическим величинам. В случае температуры источниками погрешности при индивидуальных измерениях являются следующие факторы:

(a) погрешности в международных, национальных и рабочих эталонах и при сравнениях между ними. Эти погрешности можно практически не принимать в расчет для метеорологических применений;

(b) погрешности, возникающие в ходе проведения сравнений между рабочими эталонами, транспортируемыми эталонами и/или эталонами проверки и полевыми приборами в лаборатории или в водяных термостатах в полевых условиях (если прослеживаемость обеспечивается именно таким образом). Если все действия производятся надлежащим образом, то эти погрешности незначительны (например, погрешность ±0,1 К при уровне достоверности 95 %, включая погрешности, указанные в пункте (a), однако они могут и легко возрасти в зависимости от квалификации поверителя и качества оборудования;

(c) нелинейность, дрейф, повторяемость и воспроизводимость в используемом термометре и его преобразовательном механизме (в зависимости от типа элемента термометра);

(d) эффективность теплообмена между элементом термометра и воздухом в метеорологической будке, которая должна обеспечивать тепловое равновесие между термометром и воздухом (в зависимости от системы временной константы или коэффициента запаздывания). В хорошо сконструированной, вентилируемой психрометрической будке эта погрешность будет совсем незначительной, однако в противном случае она может быть серьезной;

(e) эффективность психрометрической будки, которая должна обеспечивать равенство температуры воздуха внутри нее и температуры воздуха, непосредственно окружающего будку. В хорошо сконструированной будке эта погрешность невелика, однако в конкретных обстоятельствах разница температур в эффективной и неэффективной будках может достигать 3 °C и даже больше;

(f) установка будки, которая должна обеспечивать ее размещение в репрезентативных температурных условиях того региона, который подлежит мониторингу. Наличие поблизости источников и поглотителей тепла (здания, другие нерепрезентативные поверхности ниже и вокруг будки) и топография (холмы, границы между сушей и водой) могут вызвать значительные погрешности. Метаданные станции должны содержать четкое и регулярно обновляемое описание установки (см. Приложение 1.C) для информирования пользователей данных о возможных погрешностях, связанных с установкой.

Как систематические, так и случайные погрешности, возникают на всех вышеупомянутых этапах. Воздействия источников погрешностей (d) – (f) может быть сведено к минимуму, если операции проводятся весьма осторожно и если имеется подходящая территория для размещения приборов; в противном случае эти источники погрешностей могут способствовать возникновению весьма значительной погрешности. В то же время они иногда упускаются из вида при обсуждении погрешности, как будто при лабораторной калибровке датчика могут быть выявлены все погрешности полностью.

В метеорологии установление действительного значения является трудной задачей (Linacre, 1992).

Хорошо продуманные сравнения приборов в условиях окружающей среды дают возможность определить характеристики приборов, с тем чтобы дать правильную оценку погрешности, возникающей на указанных выше стадиях (a) – (e). Если организация станции была документирована должным образом, последствия неудачного выбора метеорологической площадки могут корректироваться систематически по определенным параметрам (например, ветер; см. ВМО, 2002), и они должны оцениваться для других параметров.

Сравнение результатов наблюдений станций с результатами численного анализа полей, полученных на основе использования данных соседних станций, является эффективной оперативной процедурой контроля качества, если в данном регионе имеются достаточно надежные станции. Расхождения между данными отдельных наблюдений на станции и значениями, полученными путем интерполяции проанализированных полей, объясняются погрешностями интерполяции метеорологических величин, а также эффективностью работы самой станции. Однако для определенного периода средняя погрешность в каждой точке проанализированного поля может считаться равной нулю, если окружающие станции подходят для тщательного анализа. В таком случае может быть рассчитано среднее и стандартное отклонение различий между данными станции и проанализированного поля, и эти данные могут быть приняты в качестве погрешностей измерения станции (включая воздействия в результате установки приборов). В результате этого погрешность в оценке среднего значения измеряемой величины за продолжительный период времени может быть весьма незначительной (если не изменяются условия измерений на данной станции), и эти соображения лежат в основе исследований изменения климата.

1.6.2 Определения измерений и их погрешностей

Нижеследующая терминология, касающаяся точности измерений, взята из публикации ИСО (1993a), в которой содержатся много определений, применимых к практике метеорологических наблюдений. Публикация ИСО (1995) представляет собой очень полезное и подробное практическое руководство по расчету и выражению погрешности в измерениях.

Измерение: совокупность действий, цель которых заключается в определении значения количественной величины.

Примечание: Данные действия могут проводиться автоматически.

Результат измерения: значение, устанавливаемое для измеряемой величины в ходе измерения (физическое количество, которое измеряется).

Примечания:

1. При указании результата следует четко разъяснить, относится ли он к показанию прибора, неоткорректированному или откорректированному результату, и был ли он получен осреднением нескольких значений.
2. Полное сообщение о результате измерения включает информацию о погрешности измерения.

Откорректированный результат: результат измерения после внесения поправки на систематическую ошибку.

Значение (физической величины): значение конкретной физической величины, выраженное, как правило, в виде единицы измерения, умноженной на какое-либо число.

Пример: длина стержня: 5,34 м.

Действительное значение (физической величины): значение, соответствующее определению заданной конкретной физической величины.

< истинное значение> = <измеренное значение> ± <погрешность>

Примечания:

1. Это то значение, которое будет получено при безупречно проведенном измерении.
2. Истинные значения по своему характеру не поддаются определению.

Точность (измерения): степень совпадения результата измерения с действительным значением измеряемой величины.

Примечания:

1. «Точность» является качественной характеристикой.
2. Вместо термина «точность» не следует применять термин «прецизионность».

Прецизионность (результатов измерений): степень совпадения результатов последовательных измерений одной и той же измеряемой величины, проводимых при одних и тех же условиях измерений.

Примечания:

1. Эти условия называются условиями повторяемости.
2. Условия повторяемости включают:
   (a) одну и ту же процедуру измерения;
   (b) одного и того же наблюдателя;
   (c) использование одного и того же измерительного прибора при тех же самых условиях (включая погоду);
   (d) одно и то же местонахождение;
   (e) повторение результатов в течение короткого периода времени.

3. Повторяемость может быть выражена количественно в виде характеристик дисперсии результатов.

Воспроизводимость (результатов измерений): степень совпадения результатов измерений одной и той же измеряемой величины, проводимых при меняющихся условиях измерений.

Примечания:

1. Надлежащая констатация воспроизводимости требует указания на изменившиеся условия.
2. Изменившиеся условия могут включать:
   (a) принцип измерения;
   (b) метод измерения;
   (c) наблюдателя;
   (d) измерительный прибор;
   (e) эталон сравнения;
   (f) местонахождение пункта измерений;
   (g) условия использования (включая погоду);
   (h) время.
3. Воспроизводимость может быть выражена количественно в виде характеристик дисперсии результатов.
4. В данном случае под результатами, как правило, подразумеваются результаты с внесенными поправками.

Неопределённость измерения (погрешность): неотрицательный параметр, характеризующий дисперсию количественных значений, которые могут быть приписаны измеряемой величине на основе используемой информации.

Примечания:

1. Погрешность измерения включает составляющие, являющиеся результатом систематических воздействий, такие как составляющие, связанные с корректировками и присвоенными значениями количества эталонов измерений, а также дефиниционной неопределенности. Иногда оценочные систематические воздействия не корректируются, а вместо этого объединяются соответствующие составляющие погрешности измерения.
2. Составляющей может быть, например, среднее квадратическое отклонение, именуемое среднеквадратической погрешностью измерения (или ее конкретное кратное значение) или половина ширины интервала, характеризуемая установленной вероятностью охвата.
3. Погрешность измерения включает, как правило, многие составляющие. Некоторые из них могут быть определены посредством оценки типа А погрешности измерения на основе статистического распределения количественных значений из ряда измерений, и могут характеризоваться стандартными отклонениями. Другие составляющие, которые могут определяться посредством оценки типа В погрешности измерения, могут также характеризоваться стандартными отклонениями, оцениваемыми на основе функций плотности вероятности, исходя при этом из имеющегося опыта или прочей информации.
4. В целом для данного набора информации понимается, что погрешность измерения связана с заявленным количественным значением, установленным для измеряемой величины. Внесение изменения в это значение приводит к изменению соответствующей погрешности.

Погрешность (измерения): результат измерения за вычетом действительного значения измеряемой величины.

Примечание: Поскольку истинное (действительное) значение не может быть определено, на практике используется условное действительное значение.

Отклонение: значение за вычетом условного действительного значения.

Случайная погрешность: результат измерения за вычетом среднего значения, которое явилось бы результатом бесконечного числа измерений одной и той же измеряемой величины, проводимых в повторяющихся условиях.

Примечания:

1. Случайная погрешность равна погрешности за вычетом систематической погрешности.
2. Поскольку можно провести только конечное число измерений, можно определить лишь оценочное значение случайной погрешности.

Систематическая погрешность: среднее значение, которое явилось бы результатом бесконечного числа измерений одной и той же измеряемой величины, проводимых в повторяющихся условиях, за вычетом действительного значения измеряемой величины.

Примечания:

1. Систематическая погрешность равна погрешности за вычетом случайной погрешности.
2. Как и в случае с действительным значением, невозможно получить полное представление о систематической погрешности и ее причинах.

Поправка: значение, добавляемое алгебраически к неоткорректированному результату измерения с целью компенсации систематической погрешности.

1.6.3 **Характеристики приборов**

Ниже на основании публикации ИСО (1993а) приведены некоторые другие свойства приборов, которые необходимо знать, оценивая их погрешность.

Чувствительность: изменение в показаниях измерительного прибора, вызванное соответствующим изменением измеряемой величины.

Примечание: Чувствительность может зависеть от значения измеряемой величины.

Селективность: способность измерительного прибора реагировать на малые изменения измеряемой величины.

Разрешение: количественное выражение способности индикатора прибора проводить значимое различие между близкими значениями измеряемой физической величины.

Гистерезис: свойство измерительного прибора реагировать на измеряемую величину в зависимости от того, каковы были ее предыдущие значения.

Стабильность (прибора): способность измерительного прибора сохранять свои метрологические характеристики с течением времени.

Дрейф: медленное изменение со временем метрологической характеристики измерительного прибора.

Время ответной реакции: временной интервал между моментом, когда произошло внезапное изменение измеряемой величины, и моментом, когда показания прибора установились в определенных пределах около нового значения измеряемой величины.

В метеорологии также часто используются следующие определения:

Указания на время ответной реакции. Часто приводится период времени, необходимый для 90-процентного ступенчатого изменения. Иногда указывается на период времени, необходимый для 50-процентного ступенчатого изменения, в качестве половины времени.

Расчет времени ответной реакции. В большинстве простых систем ответная реакция на какое-либо ступенчатое изменение рассчитывается следующим образом:

$$Y = A(1 - e^{-t/\tau}) \qquad (1.1)$$

где Y – величина изменения за истекшее время t; A – применяемая амплитуда ступенчатого изменения; t – время, прошедшее после ступенчатого изменения; τ – характеристический параметр системы, имеющий размерность времени.

Параметр τ называют постоянной времени или коэффициентом задержки. Он соответствует периоду времени, необходимому прибору для достижения $1/e$ от конечного постоянного значения после ступенчатого изменения.

В других системах ответная реакция носит более сложный характер и не рассматривается в настоящем документе.

Погрешность задержки: погрешность, которая может быть присуща совокупности измерений в результате того, что для ответной реакции измерительного прибора необходимо определенное ограниченное время.

1.6.4 Погрешности измерения одного прибора

Для выражения и расчета неопределенностей следует воспользоваться публикацией ИСО (1995). Она содержит подробное практическое описание определений и методов представления информации, а также всеобъемлющее описание подходящих статистических методов с многочисленными иллюстративными примерами.

1.6.4.1 Статистические распределения данных наблюдений

Для определения погрешности любого отдельного измерения необходимо в первую очередь решить вопрос о статистическом подходе. С этой целью указываются следующие определения (ИСО, 1993; 1995):

(a) стандартная погрешность;
(b) расширенная погрешность;
(c) дисперсия, стандартное отклонение;
(d) статистический интервал охвата.

Если проведено n сравнений оперативного прибора, при которых измеряемая переменная величина и все другие значимые переменные остаются постоянными, если наилучшая оценка действительного значения устанавливается путем использования образцового эталона, и если измеряемая переменная величина имеет гауссово распределение[9], то результат можно представить в том виде, как это сделано на рис. 1.2.

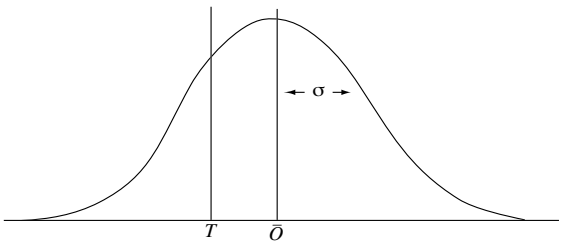


Рис. 1.2 Распределение данных при инструментальных сличениях

На этом рисунке T – это действительная величина; $\bar{O}$ – среднее значение, вычисленное по n значениям

9 Отметим, однако, что несколько метеорологических переменных не соответствуют гауссову распределению. См. раздел 1.6.4.2.3.

величины O, измеренным одним прибором; и σ – среднеквадратическое отклонение наблюдаемых величин от их средних значений.

В данном случае могут быть определены следующие характеристики:

(a) систематическая погрешность, часто именуемая смещением, являющаяся алгебраической разностью $\overline{O} - T$. Систематические погрешности невозможно исключить, но часто их можно уменьшить. Для компенсации систематического воздействия может применяться поправочный коэффициент. Обычно для исключения систематических погрешностей датчиков следует проводить надлежащие калибровки и корректировки. Систематические погрешности, вызванные воздействием окружающей среды или местом размещения, могут быть лишь уменьшены;

(b) случайная погрешность, которая возникает в результате непредсказуемых или стохастических временных и пространственных колебаний. Степень этого случайного воздействия может быть выражена стандартным отклонением σ, определенным после проведения n измерений, где n должно быть достаточно большим. В принципе σ является мерой для неопределенности $\overline{O}$;

(c) точность измерения, которая представляет собой степень совпадения результата измерения и действительного значения измеряемой величины. Точность измеряющего прибора – это способность давать ответы, близкие к правильному значению. Отметим, что понятие «точность» является качественным понятием;

(d) погрешность измерения, которая представляет параметр, связанный с результатом измерения, характеризующая дисперсию значений, которые могли бы быть разумно приписаны измеряемой величине. Неопределенности, связанные со случайными и систематическими воздействиями, которые порождают погрешность, могут оцениваться, с тем чтобы выразить погрешность измерения.

1.6.4.2 Оценка действительного значения

В обычной практике данные наблюдений используются для того, чтобы оценить действительное значение. Если систематическая погрешность отсутствует или была исключена из данных, то оценкой для действительного значения может приблизительно служить среднее значение результатов большого числа правильно выполненных независимых измерений. В случае, когда число выполненных измерений невелико, их среднее значение имеет свое собственное распределение, и можно указать лишь на определенные пределы, внутри которых может находиться действительное значение. Для того чтобы сделать это, необходимо выбрать статистическую вероятность (уровень достоверности) для этих пределов и знать распределение погрешности средних значений.

Очень полезное и четкое описание оценки действительного значения и тесно связанных с ней вопросов представлено в работе Натрелла (1966). Дальнейшее обсуждение этого вопроса содержится в работе Эйзенхарта (1963).

1.6.4.2.1 *Оценка действительного значения при большом n*

В случае когда число наблюдений n велико, распределение средних значений образцов является нормальным (гауссовым), даже если сами погрешности наблюдений таковыми не являются. В этом случае, а также когда известно, что распределение средних значений выборок является нормальным (гауссовым) в силу других причин, пределы, внутри которых может находиться действительное значение средней величины, получают из следующих уравнений:

верхний предел: $$L_U = X + k \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \qquad (1.2)$$

нижний предел: $$L_L = X - k \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \qquad (1.3)$$

где $\overline{X}$ – среднее из наблюдений $\overline{O}$, откорректированное на значение систематической погрешности; σ – среднеквадратическое отклонение для генеральной совокупности; k – коэффициент, соответствующий выбранному уровню достоверности, который может быть рассчитан при помощи функции нормального распределения.

Можно привести некоторые значения k:

Уровень достоверности	*90 %*	*95 %*	*99 %*
k	1,645	1,960	2,575

Уровень достоверности, использованный в приведенной выше таблице, определен для условия, когда действительное значение не превысит по величине ни один из конкретных пределов (верхний или нижний), которые должны быть рассчитаны. При указании уровня достоверности, при котором действительное значение будет находиться в интервале между двумя пределами, необходимо

рассматривать обе зоны, находящиеся за верхним и нижним пределами. Учитывая это, видно, что k принимает значение 1,96 при вероятности 95 %, и что действительное значение средней величины находится между пределами L_U и L_L.

1.6.4.2.2 *Оценка действительного значения при небольшом n*

В случае когда n невелико, средние значения выборок соответствуют t-распределению Стьюдента при условии, что погрешности наблюдений имеют гауссово или близкое к гауссовому распределение. В этом случае, и для выбранного уровня достоверности, можно получить верхний и нижний пределы следующим образом:

верхний предел: $$L_U \approx \bar{X} + t \cdot \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{n}} \qquad (1.4)$$

нижний предел: $$L_L \approx \bar{X} - t \cdot \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{n}} \qquad (1.5)$$

где t – это коэффициент (Стьюдента), который зависит от выбранного уровня достоверности и от числа измерений n; $\hat{\sigma}$ – оценочное значение стандартного отклонения для генеральной совокупности, полученное на основе результатов измерений при помощи следующего уравнения:

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n} (X_i - \bar{X})^2}{n-1} = \frac{n}{n-1} \cdot \sigma_0^2 \qquad (1.6)$$

где X_i – отдельное значение O_i, откорректированное с учетом систематической погрешности.

Ниже приводятся некоторые значения t:

Уровень достоверности	*90 %*	*95 %*	*99 %*
df			
1	6.314	12.706	63.657
4	2.132	2.776	4.604
8	1.860	2.306	3.355
60	1.671	2.000	2.660

где df («degrees of freedom») – это степени свободы, связанные с числом измерений следующим образом: $df = n - 1$.

Уровень достоверности, используемый в данной таблице, определен для случая, когда действительное значение не превосходит по величине ни один из конкретных пределов (ни верхний, ни нижний), которые должны быть рассчитаны. Когда нужно указать доверительный уровень, при котором действительное значение находится между этими двумя пределами, необходимо поступить так же, как и в случае с большим n. С учетом этого становится ясно, что n принимает значение 2,306 при вероятности 95 % того, что действительное значение находится между пределами L_U и L_L, если для получения оценки проведено девять измерений ($df = 8$).

По мере увеличения n значения t приближаются к значениям k, и можно видеть, что значения k очень близки к значениям t, когда df равно 60. По этой причине в случаях когда число измерений среднего значения превышает 60, нередко используются таблицы значений k (предпочтительнее, чем таблицы значений t).

1.6.4.2.3 *Оценка действительного значения — дополнительные замечания*

Исследователям следует учитывать, является распределение погрешностей гауссовым или нет. Распределение самих переменных величин, таких как солнечное сияние, видимость, влажность и высота нижней границы облачности, не является гауссовым, и их математическое описание должно основываться на правилах, действительных для каждого конкретного типа распределения (Brooks и Carruthers, 1953).

На практике данные наблюдений содержат как случайные, так и систематические ошибки. В каждом конкретном случае полученное в результате наблюдений среднее значение должно быть откорректировано с учетом систематической погрешности, если она известна. Когда это сделано, оценка действительного значения все же остается неточной из-за случайных погрешностей, как показано в уравнениях, и из-за неизвестной составляющей систематической погрешности. Для получения общей погрешности необходимо установить пределы для погрешности систематической погрешности и объединить их с пределами для случайных погрешностей. Однако до тех пор, пока неопределенность систематической погрешности не выражена в понятиях вероятности и подходящим образом не скомбинирована со случайной погрешностью, мы не можем знать уровень достоверности. Желательно, следовательно, чтобы систематическая погрешность была определена полностью.

1.6.4.3 Выражение погрешности

Если случайные или систематические воздействия признаются, однако их уменьшение или поправки невозможны или не применяются, следует провести оценку итоговой погрешности измерения. Эта погрешность устанавливается после оценки погрешности, возникающей в результате случайных воздействий и несовершенной поправки результата систематических воздействий. Обычной практикой является выражение погрешности в качестве «суммарной погрешности» в связи со «статистическим интервалом охвата». Для того, чтобы соответствовать общепринятой в метрологии практике, 95-процентный доверительный уровень или $k = 2$ следует использовать для всех типов измерений, а именно:

$$< \text{суммарная погрешность} > = k\ \sigma = 2\ \sigma \qquad (1.7)$$

В результате этого действительные значения, определенные в разделе 1.6.2, будет выражена в следующем виде:

<действительное значение> = <измеряемая величина> ± <суммарная погрешность> = <измеряемая величина> ±2 σ

1.6.4.4 Измерения дискретных значений

Хотя состояние атмосферы может быть хорошо описано при помощи физических переменных или количественных значений, ряд метеорологических явлений выражаются посредством дискретных значений. Характерными примерами подобных значений являются определение солнечного сияния, осадков или молнии, а также переохлажденных осадков. Все эти параметры могут быть выражены только словами «да» или «нет». В отношении ряда параметров, которые все являются членами группы существующих метеорологических явлений, существует несколько возможностей. Например, при передаче сообщений о текущей погоде требуется проведение различия между изморозью, дождем, снегом, градом и их сочетаниями. Для практики подобных видов неприемлемыми являются расчеты погрешности, аналогичные тем, о которых говорилось выше. Некоторые из этих параметров связаны с цифровым пороговым значением (например, обнаружение солнечного сияния с использованием интенсивности прямой радиации) и определение погрешности любой производной переменной (например продолжительность солнечного сияния) можно рассчитать исходя из оценочной неопределенности переменной источника (например интенсивность прямой радиации). Однако этот метод применяется только для производных параметров, а не для типичных явлений текущей погоды. Несмотря на невозможность использования простого численного подхода, имеется целый ряд статистических методов для определения качества данных подобных наблюдений. Подобные методы основаны на сравнениях двух комплектов данных, при этом один комплект определяется в качестве эталона. Результатом подобного сравнения является матрица сопряженности, представляющая перекрестные частоты взаимных явлений. В своей самой простой форме, когда переменная величина представляет собой булевулогическую переменную («да» или «нет»), подобная матрица представляет собой матрицу 2 x 2 с рядом равных событий в элементах по диагональной оси и «промахов» и ложных тревог» в других элементах. Подобная матрица позволяет выводить проверочные показатели или индексы, которые должны отражать качество данных наблюдений. Этот метод описан Мэрфи (Murphy) и Катцом (Katz) (1985 г.). Его обзор дается Коком (Kok) (2000).

1.6.5 Требования к точности

1.6.5.1 Общие сведения

Погрешность, с которой должна измеряться какая-либо метеорологическая величина, зависит от той конкретной цели, для которой требуется измерение. В целом пределы эффективности измерительного устройства или системы будут определяться изменчивостью того параметра, который должен измеряться в пространственном и временном масштабах, подходящих для данного применения.

Результат любого измерения можно разложить на две составляющие – сигнал и шум. Сигнал предстоит определить, а шум – это составляющая, не имеющая отношения к измеряемой величине. Шум может возникать по нескольким причинам: в результате погрешности в данных наблюдений, из-за того, что наблюдения проводятся в неправильный срок и в неподходящем месте, или в связи с тем, что для наблюдаемой физической величины характерны короткопериодные или мелкомасштабные неоднородности, которые не имеют отношения к проводимым наблюдениям и поэтому должны быть сглажены. Если предположить, что ошибка в наблюдениях может быть устранена по желанию, то шум, связанный с другими причинами, обусловит предел для точности измерений. Дальнейшее совершенствование методов наблюдения позволит улучшить измерение шума, однако не приведет к значительному улучшению результатов по сигналу.

С другой стороны, прибор, погрешность которого превышает амплитуду самого сигнала, может дать

мало информации об истинной величине или не дать ее совсем. Таким образом, амплитуды шума и сигнала служат соответственно для того, чтобы определить:

(a) пределы эффективности, вне которых усовершенствование приборов не является необходимым;

(b) пределы эффективности, ниже которых полученные данные не будут приниматься в расчет.

Эта тема о выявлении и определении вышеупомянутых пределов (a) и (b) была подробно рассмотрена для аэрологических данных в публикации ВМО (1970). Однако требования к точности формулируются, как правило, не на основе подобных доводов, а на основе представлений, с одной стороны, о практически достижимой эффективности и, с другой стороны, о потребностях пользователей данных.

1.6.5.2 Требуемая и достижимая эффективность

Понятие эффективности измерительной системы охватывает ее надежность, капитальные и текущие расходы в течение срока ее службы, а также пространственное разрешение, однако рассматриваемая в настоящем документе эффективность ограничивается погрешностью измерений (включая пространственное разрешение) и разрешением по времени.

Существуют различные формулировки требований к эффективности, при этом как потребности, так и возможности изменяются со временем. Приведенные в приложении 1.D формулировки являются наиболее авторитетными на момент написания настоящей работы и могут быть приняты в качестве полезных рекомендаций для дальнейших разработок, хотя и не носят окончательного характера.

Требования в отношении переменных величин, наиболее часто используемых в синоптической, авиационной и морской метеорологии, а также в климатологии, представлены в обобщенном виде в приложении 1.D[10] . Перечисленные в нем требования касаются только приземных измерений, данные которых участвуют в международном обмене. В публикации ВМО (1992b) приводятся подробности о требованиях к данным наблюдений для центров Глобальной системы обработки данных и прогнозирования. Требование к погрешности при измерениях параметров ветра приведено отдельно для скорости и для направления ветра, поскольку в таком виде сообщаются данные о ветре.

Способность отдельных датчиков и систем наблюдения удовлетворять указанные потребности постоянно изменяется по мере развития приборного обеспечения и технологии наблюдений. Характеристики типичных датчиков или систем, которые используются в настоящее время, представлены в приложении 1.D[11] . Следует отметить, что во многих случаях достижимая оперативная погрешность не удовлетворяет указанным требованиям. Для некоторых из физических величин такие показатели погрешности достижимы лишь при наличии высококачественного оборудования и надлежащих процедур. Требования, касающиеся погрешности при аэрологических измерениях, рассматриваются в главе 12 части I.

---

10 Разработано группой экспертов ИС по потребностям в данных с автоматических метеорологических станций (2004) и утверждено президентом КПМН для включения в настоящее издание Руководства после консультации с президентами других технических комиссий.

11 Разработано группой экспертов КПМН по технологии приземных наблюдений и методам измерений (2004) и утверждено президентом КПМН для включения в настоящее Руководство.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1.A

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ЦЕНТРЫ

1. Учитывая необходимость регулярной калибровки и обслуживания метеорологических приборов в целях удовлетворения все возрастающих потребностей в высококачественных метеорологических и гидрологических данных, необходимость создания иерархии прослеживаемости измерений в соответствии со стандартами Международной системы единиц (СИ), потребности стран-членов в стандартизации метеорологических и соответствующих экологических приборов, необходимость в международных сравнениях и оценках приборов в поддержку всемирной совместимости и однородности данных, необходимость в профессиональной подготовке специалистов по приборам, а также ту роль, которую играют региональные центры по приборам (РЦП) в работе Глобальной системы систем наблюдений за Землей, Программе по предотвращению опасности и смягчению последствий стихийных бедствий и других совместных программах ВМО, было рекомендовано следующее:[12]

A. **Региональные центры по приборам, полностью оборудованные и выполняющие все функции**, должны обладать следующими возможностями для выполнения своих соответствующих функций:

Возможности:

(a) РЦП должен иметь необходимые технические средства и лабораторное оборудование и иметь доступ к ним, с тем чтобы выполнять функции, необходимые для калибровки метеорологических и соответствующих экологических приборов;

(b) РЦП должен обслуживать комплект стандартных метеорологических приборов и обеспечивать согласованность своих собственных стандартов измерений и измерительных приборов с системой единиц СИ;

(c) РЦП должен иметь квалифицированный управленческий и технический персонал, обладающий необходимым опытом для выполнения своих функций;

(d) РЦП должен разработать свои индивидуальные технические процедуры для калибровки метеорологических и соответствующих экологических приборов, пользуясь калибровочным оборудованием, применяемым РЦП;

(e) РЦП должен разработать свои индивидуальные процедуры обеспечения качества;

(f) РЦП должен участвовать в межлабораторных сравнениях стандартных калибровочных приборов и методов или организовывать эти сравнения;

(g) РЦП должен, в необходимых случаях, использовать ресурсы и возможности Региона, согласно наивысшим интересам данного Региона;

(h) РЦП должен, по мере возможности, пользоваться международными стандартами, применяемыми для калибровочных лабораторий, такими как ISO/IEC 17025;

(i) авторитетный орган должен оценивать работу РЦП как минимум раз в пять лет для проверки его возможностей и эффективности.

Соответствующие функции:

(j) РЦП должен оказывать помощь странам-членам Региона в проведении калибровки их национальных метеорологических эталонов и соответствующих приборов для экологического мониторинга;

(k) РЦП должен участвовать в проводимых ВМО и/или региональных взаимных сравнениях приборов или организовывать их, следуя соответствующим рекомендациям КПМН;

(l) согласно соответствующим рекомендациям относительно структуры менеджмента качества ВМО РЦП должен вносить позитивный вклад в деятельность стран-членов, связанную с качеством измерений;

(m) РЦП должен консультировать страны-члены по запросам, касающимся эксплуатации и обслуживания приборов, а также наличия соответствующих руководящих материалов;

(n) РЦП должен активно участвовать в организации региональных семинаров по метеорологическим и соответствующим экологическим приборам или оказывать помощь в такой организации;

(o) РЦП должен сотрудничать с другими РЦП в области стандартизации метеорологических и соответствующих экологических измерений;

12 Рекомендовано Комиссией по приборам и методам наблюдений на ее четырнадцатой сессии, проведенной в 2006 г.

(p) РЦП должен регулярно информировать страны-члены и сообщать[13] на ежегодной основе президенту региональной ассоциации и Секретариату ВМО об услугах, предложенных странам-членам, и осуществленной деятельности.

B. **Региональные центры по приборам с базовыми возможностями и функциями** должны обладать следующими возможностями для выполнения своих соответствующих функций:

Возможности:

(a) РЦП должен иметь необходимые технические средства и лабораторное оборудование и иметь доступ к ним, с тем чтобы выполнять функции, необходимые для калибровки метеорологических и соответствующих экологических приборов;
(b) РЦП должен обслуживать комплект стандартных метеорологических приборов[14] и обеспечивать согласованность своих собственных стандартов измерений и измерительных приборов с системой СИ;
(c) РЦП должен иметь квалифицированный управленческий и технический персонал, обладающий необходимым опытом для выполнения своих функций;
(d) РЦП должен разработать свои индивидуальные технические процедуры для калибровки метеорологических и соответствующих экологических приборов, пользуясь калибровочным оборудованием, применяемым РЦП;
(e) РЦП должен разработать свои индивидуальные процедуры обеспечения качества;
(f) РЦП должен участвовать в межлабораторных сравнениях стандартных калибровочных приборов и методов или организовывать эти сравнения;
(g) РЦП должен, в необходимых случаях, использовать ресурсы и возможности Региона, согласно наивысшим интересам данного Региона;
(h) РЦП должен, по мере возможности, пользоваться международными стандартами, применяемыми для калибровочных лабораторий, такими как ИСО/МЭК 17025;
(i) авторитетный орган должен оценивать работу РЦП как минимум раз в пять лет для проверки его возможностей и эффективности.

Соответствующие функции:

(j) РЦП должен оказывать помощь странам-членам Региона в проведении калибровки их национальных метеорологических эталонов и соответствующих приборов для экологического мониторинга;
(k) РЦП должен участвовать в проводимых ВМО и/или региональных взаимных сравнениях приборов или организовывать их, следуя соответствующим рекомендациям КПМН;
(l) согласно соответствующим рекомендациям относительно структуры менеджмента качества ВМО РЦП должен вносить позитивный вклад в деятельность стран-членов, связанную с качеством измерений;
(m) РЦП должен консультировать страны-члены по запросам, касающимся эксплуатации и обслуживания приборов, а также наличия соответствующих руководящих материалов;
(n) РЦП должен активно участвовать в организации региональных семинаров по метеорологическим и соответствующим экологическим приборам или оказывать помощь в такой организации;
(o) РЦП должен сотрудничать с другими РЦП в области стандартизации метеорологических и соответствующих экологических измерений;
(p) РЦП должен регулярно информировать страны-члены и сообщать на ежегодной основе президенту региональной ассоциации и Секретариату ВМО об услугах, предложенных странам-членам, и осуществленной деятельности.

2. Соответствующими региональными ассоциациями были назначены следующие РЦП: Алжир (Алжир), Каир (Египет), Касабланка (Марокко), Найроби (Кения) и Габороне (Ботсвана) для РА I; Пекин (Китай) и Цукуба (Япония) для РА II; Буэнос-Айрес (Аргентина) для РА III; Бриджтаун (Барбадос), гора Вашингтон (Соединенные Штаты Америки) и Сан-Хосе (Коста-Рика) для РА IV; Манила (Филиппины) и Мельбурн (Австралия) для РА V; Братислава (Словакия), Любляна (Словения) и Трапп (Франция) для РА VI.

13 Рекомендуется подход на основе веб-технологии.

14 Для калибровки одной или нескольких следующих переменных: температура, влажность, давление или других переменных, конкретно указанных Регионом.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1.B

КЛАССИФИКАЦИИ РАЗМЕЩЕНИЯ ПЛОЩАДОК ДЛЯ СТАНЦИЙ НАЗЕМНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ НА СУШЕ

Условия окружающей среды на площадке[15] могут быть причинной погрешности в измерениях, превышающие допустимые отклонения, предусмотренные для приборов. Обычно больше внимания уделяется характеристикам приборов, чем условиям окружающей среды, в которых производятся измерения, а зачастую именно условия окружающей среды вызывают искажение результатов, влияя на их репрезентативность, особенно когда площадка должна быть репрезентативной для большого района (например, от 100 до 1 000 км^2).

В публикации ВМО-№ 8 излагаются правила установки для различных датчиков. Но что следует предпринять, когда эти условия не выполняются?

Существуют площадки, которые не отвечают рекомендуемым правилам установки. Поэтому была создана классификация в помощь определению репрезентативности данной площадки на небольшом масштабе (воздействие окружающей среды в непосредственной близости). Таким образом, площадка класса 1 может рассматриваться в качестве эталонной площадки. Площадка, относящаяся к классу 5, это такая площадка, где близко расположенные препятствия создают неподходящую среду для метеорологических измерений, которые должны быть репрезентативными для обширного района (по крайней мере десятки км^2) и где метеорологические измерения проводить не следует. Чем ниже класс площадки, тем выше репрезентативность измерения для обширного района. Площадка неудовлетворительного класса (большой номер) может, тем не менее, представлять ценность с точки зрения конкретного применения, требующего измерения в данном конкретном месте, включая препятствия данной местности.

Для каждого типа измерений на площадке предусматривается отдельная классификация.

Увязывая измерения с соответствующими им уровнями неопределенности, данная классификация может использоваться для определения максимального класса станции для включения в данную сеть или для конкретного применения. В идеальном мире все площадки должны быть класса 1, но реальный мир не идеален, и необходимы некоторые компромиссы. Будет больше пользы, если принять существующую ситуацию и отразить ее документально при помощи данной классификации места размещения.

Судя по опыту МетеоФранс, процесс применения классификации помогает участникам и руководителям сети более успешно учитывать требования к установке приборов и тем самым часто обеспечивает более удачный выбор места размещения. По крайней мере условия окружающей среды вокруг площадки становятся известны и документально фиксируются в метаданных. Разумеется, можно осуществить и рекомендовать полное описание площадки, но при этом существует опасность того, что подробно описанная площадка может привести к усложнению метаданных, что будет во многих случаях ограничивать их оперативное использование. Поэтому данная классификация выбора площадок сформулирована таким образом, чтобы представлять информацию в сжатом виде и способствовать оперативному использованию данной информации из метаданных.

Площадка в целом не имеет одного единственного классификационного номера. Каждый параметр, который измеряется на площадке, имеет свой класс и иногда отличается от других. Если требуется общая классификация площадки, то может использоваться максимальное значение из классов, характеризующих параметры.

Принадлежность каждой площадки к определенному классу должна периодически пересматриваться, поскольку условия окружающей среды могут меняться с течением времени. Рекомендуется систематическая ежегодная визуальная проверка: если некоторые характеристики окружающей среды изменились, то необходимо проведение нового классификационного процесса.

Полный пересмотр классов площадок следует проводить, по меньшей мере, каждые пять лет.

В нижеприведенном тексте классификация проводится (несистематическим образом) вместе с оценкой неопределенности, обусловленной выбором

15 Площадка» определяется как место, где установлен прибор.

места, которая должна прибавляться к общей оценке неопределенности измерения. Данную оценку получают из библиографических исследований и/или некоторых сравнительных тестов.

Основная цель данной классификации – задокументировать наличие препятствий вблизи площадки измерения. По этой причине естественный рельеф местности может не учитываться, если находится на большом расстоянии (например, >1 км). Метод определения того, является ли рельеф репрезентативным для окружающего района, заключается в следующем: изменит ли перемещение станции на 500 м получаемый класс? Если ответ нет, то рельеф является природной характеристикой данного района и не принимается во внимание.

Сложный рельеф местности или городские районы обычно соответствуют высоким значениям классов. В этих случаях дополнительная отметка «S» может быть добавлена к классам 4 или 5 для обозначения специфических условий окружающей среды или применения (например, 4S).

ТЕМПЕРАТУРА ВОЗДУХА И ВЛАЖНОСТЬ

Датчики, расположенные внутри метеорологической будки, должны монтироваться на высоте, определяемой метеорологической службой (от 1,25 м до 2 м, как определено в Руководстве КПМН). Высота никогда не должна быть меньше 1,25 м. Удовлетворение верхнего предела не столь обязательно, поскольку температурный градиент по высоте уменьшается с высотой. Например, разница температуры для датчиков, расположенных на высоте от 1,25 м до 2 м, составляет менее 0,2 °C.

Основные расхождения вызываются неестественными поверхностями и тенью.

(a) препятствия вокруг метеорологической будки влияют на радиационный баланс метеорологической будки. Метеорологическая будка вблизи вертикального препятствия может быть затенена от солнечной радиации или «защищена» от ночного радиационного выхолаживания воздуха вследствие получения более теплого (ИК) излучения от данного препятствия, или может подвергаться воздействию отраженной радиации;
(b) соседние искусственные поверхности могут нагревать воздух, и их необходимо избегать. Степень их воздействия зависит от ветровых условий, поскольку ветер влияет на степень воздушного обмена. К неестественным или искусственным поверхностям, которые принимаются во внимание, относятся источники тепла, отражающие поверхности (например, здания, бетонные поверхности, парковки машин) и водные объекты (например, пруды, озера, орошаемые территории).

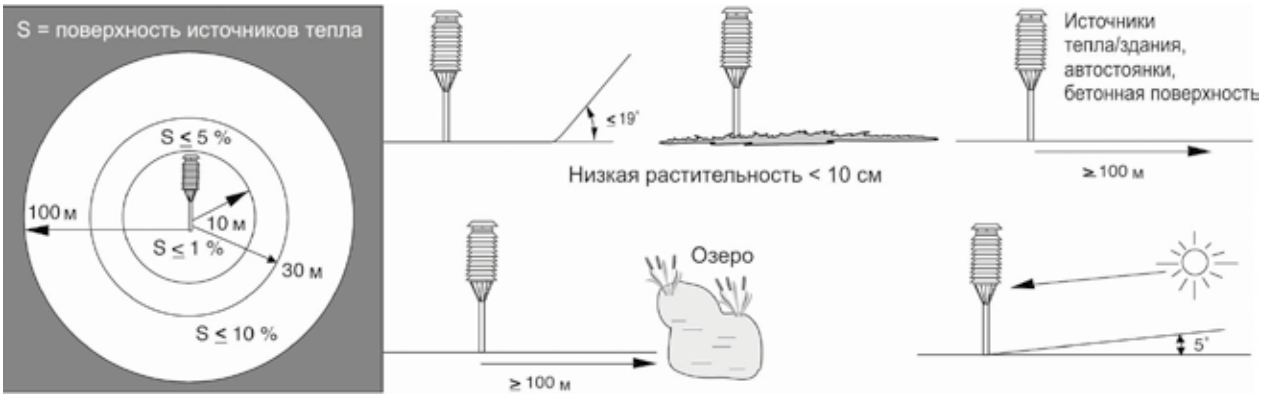
Тени от близлежащих препятствий следует избегать. Тень, обусловленная естественным рельефом, не учитывается в классификации (см. выше).

Указываемой высотой растительного покрова является высота растительности, состояние которой поддерживается обычным способом. Различают структурную высоту растительности (для типа растительности, присутствующей на площадке) и высоту, обусловленную неудовлетворительным уходом за растительностью. Классификация конкретной площадки, таким образом, основывается на допущении регулярного обслуживания (за исключением случаев, когда такое обслуживание не представляется возможным).

Класс 1

(a) Плоский горизонтальный участок на открытой местности, уклон не более ⅓ (19°);
(b) поверхность земли покрыта естественной невысокой растительностью (<10 см), репрезентативной для региона;
(c) точка измерения расположена:
  (i) более чем в 100 м от источников тепла или отражающих поверхностей (здания, бетонные поверхности, парковки машин и т.д.);
  (ii) более чем в 100 м от водного пространства (за исключением случаев, когда оно занимает значительную часть региона);
  (iii) вдали от всякой отбрасываемой тени, когда солнце выше 5°.

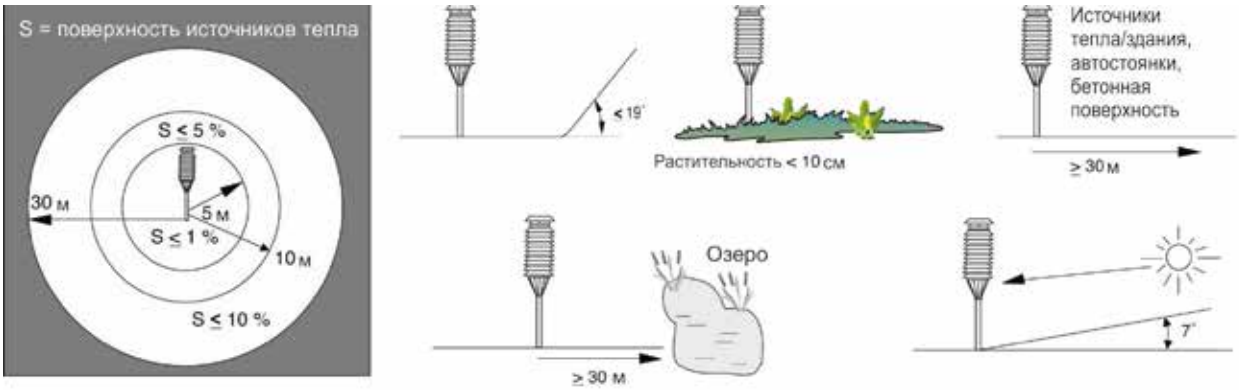
Считается, что источник тепла (или водное пространство) оказывает воздействие, если занимает более 10 % поверхности в круговом районе 100 м вокруг метеорологической будки, составляет 5 % кольцевой зоны 10 м – 30 м или охватывает 1 % десятиметрового круга.



Класс 2

(a) Плоский горизонтальный участок на открытой местности, уклон не более ⅓ (19°);
(b) поверхность земли покрыта естественной невысокой растительностью (<10 см), репрезентативной для региона;
(c) точка измерения расположена:
  (i) более чем в 30 м от источников тепла или отражающих поверхностей (здания, бетонные поверхности, автостоянки машин и т.д.);
  (ii) более чем в 30 м от водного пространства (за исключением случаев, когда оно занимает значительную часть региона);
  (iii) вдали от всякой отбрасываемой тени, когда солнце выше, чем 7°.

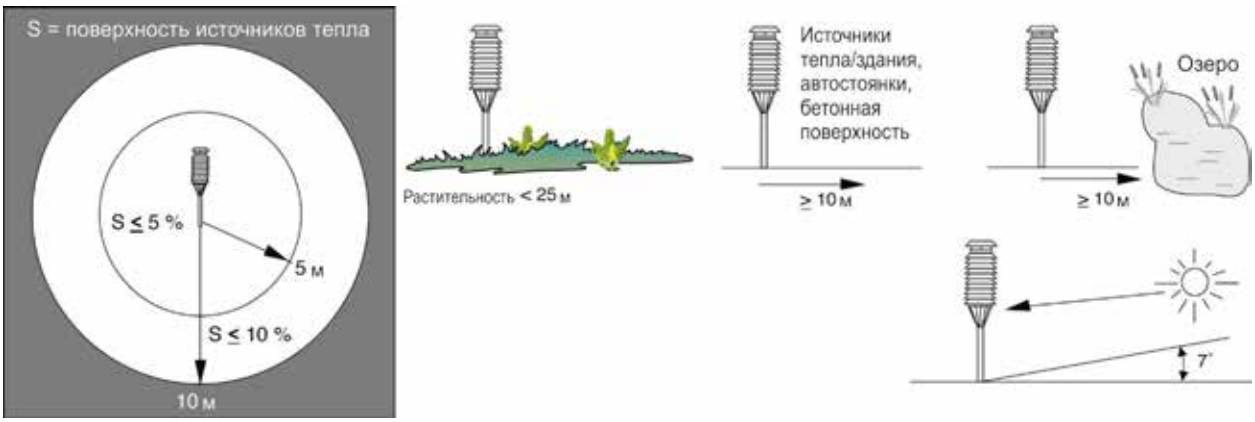
Считается, что источник тепла (или водное пространство) оказывает воздействие, если занимает более 10 % поверхности в круговом районе 30 м вокруг метеорологической будки, составляет 5 % кольцевой зоны 5 м – 10 м или охватывает 1 % пятиметрового круга.



Класс 3 (дополнительная неопределенность, обусловленная выбором места для площадки, составляет до 1 °C)

(a) Поверхность земли покрыта естественной невысокой растительностью (<25 см), репрезентативной для региона;
(b) точка измерения расположена:
  (i) более чем в 10 м от источников тепла или отражающих поверхностей (здания, бетонные поверхности, парковки машин и т.д.);
  (ii) более чем в 10 м от водного пространства (за исключением случаев, когда оно занимает значительную часть региона);
  (iii) вдали от всякой отбрасываемой тени, когда солнце выше, чем 7°.

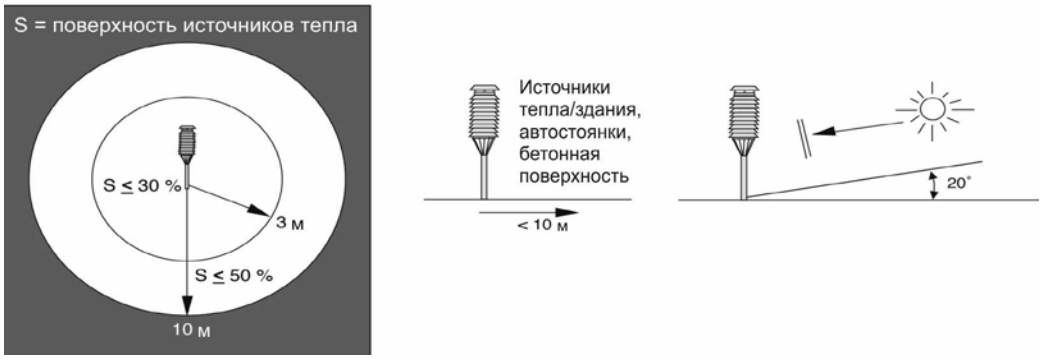
Считается, что источник тепла (или водное пространство) оказывает воздействие, если занимает более 10 % поверхности в круговом районе 10 м вокруг метеорологической будки или составляет 5 % пятиметровой кольцевой зоны.



Класс 4 (дополнительная неопределенность, обусловленная выбором места для площадки, составляет до 2 °C)

(a) Близлежащие искусственные источники тепла или отражающие поверхности (здания, бетонные поверхности, парковки машин и т.д.) или водное пространство (за исключением случаев, когда оно занимает значительную часть региона), занимающие:
   (i) менее 50 % поверхности кругового района 10 м вокруг метеорологической будки;
   (ii) менее 30 % поверхности кругового района 3 м вокруг метеорологической будки;

(b) вдали от всякой отбрасываемой тени, когда солнце выше, чем 20°.



Класс 5 (дополнительная неопределенность, обусловленная выбором места для площадки, составляет до 5 °C)

Площадка, не удовлетворяющая требованиям класса 4.

ОСАДКИ

Ветер является наибольшим источником погрешностей в измерениях осадков вследствие влияния приборов на воздушный поток. Если не обеспечивать искусственную защиту осадкомеров от ветра, например устанавливая ветровую защиту, то наилучшие места для расположения постов часто находятся на лесных полянах или в садах, среди деревьев, в кустарниковом редколесье или там, где другие объекты представляют собой эффективную защиту от ветра всех направлений. Идеальными условиями для установки оборудования являются такие, при которых оборудование установлено в районе, окруженном равномерно препятствиями одинаковой высоты. Препятствием является объект с угловой шириной 10° и более.

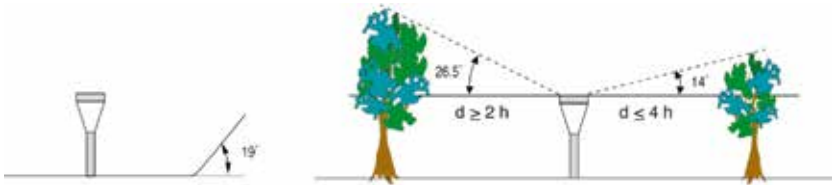
Выбор данного типа площадки не согласуется с ограничениями в отношении высоты другого измерительного оборудования. Такие условия являются практически невыполнимыми. Если препятствия не одинаковы, они имеют тенденцию создавать турбулентность, что дает искажение в результатах измерения; причем

данный эффект более выражен для твердых осадков. Вот почему более реально выполнимые требования по высоте предусматривают определенное расстояние от любых препятствий. Ориентация таких препятствий по отношению к преобладающему ветру сознательно не учитывается. На самом деле, сильные осадки часто связаны с конвективными факторами, в силу которых направление ветра не обязательно совпадает с направлением преобладающего ветра. Препятствия считаются однородными по высоте, если отношение между самой большой и самой малой высотой составляет менее 2.

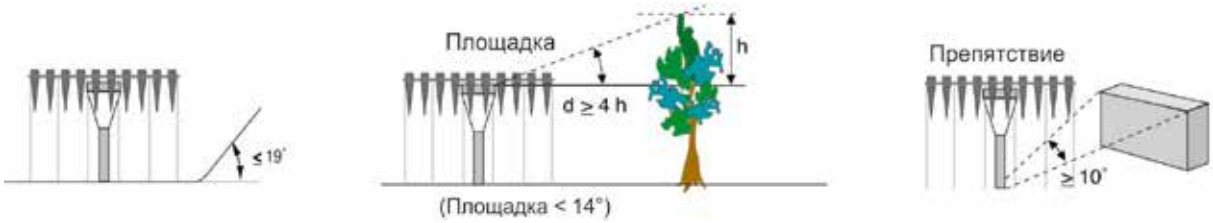
Точкой отсчета для высоты препятствий является высота приемной поверхности осадкомера.

Класс 1

(a) Плоский горизонтальный участок на открытой местности, уклон не более ⅓ (19°). Осадкомер окружен препятствиями одинаковой высоты, которые можно видеть под углом возвышения от 14° до 26° (препятствия на расстоянии, равном их двух-четырехкратной высоте);
(b) плоский горизонтальный участок на открытой местности, уклон не более ⅓ (19°). Для осадкомера, искусственно защищенного от ветра, прибор не обязательно должен быть защищен препятствиями одинаковой высоты. В данном случае любые другие препятствия должны быть расположены на расстоянии, равном, по крайней мере, их четырехкратной высоте.

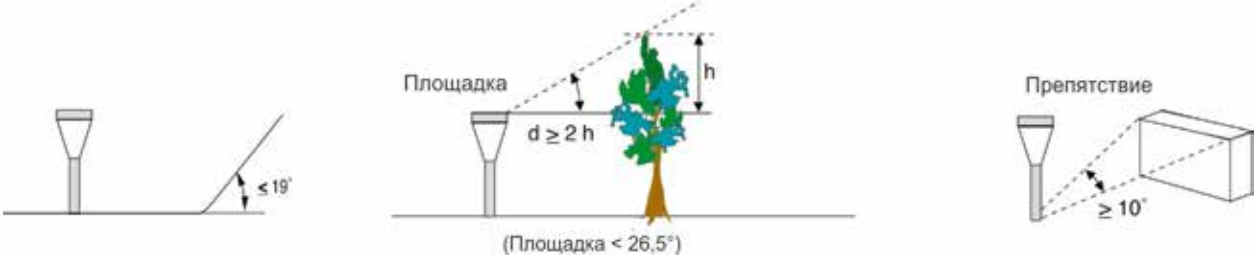


или



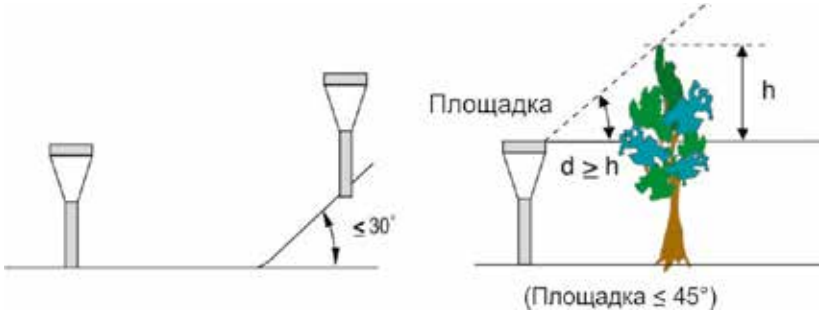
Класс 2 (дополнительная неопределенность, обусловленная выбором места для площадки, составляет до 5 %)

(a) Плоский горизонтальный участок на открытой местности, уклон не более ⅓ (19°);
(b) возможные препятствия должны быть расположены на расстоянии, превышающем, по крайней мере, в два раза высоту препятствия (по отношению к высоте приемной поверхности дождемера).



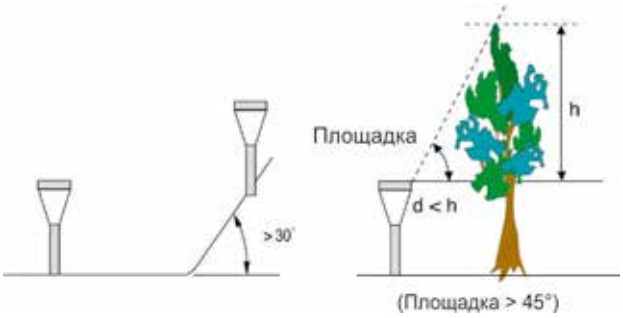
Класс 3 (дополнительная неопределенность, обусловленная выбором места для площадки, составляет до 15 %)

(a) Участок на открытой местности, уклон не более ½ (≤ 30°);
(b) возможные препятствия должны быть расположены на расстоянии, превышающем высоту препятствия.



Класс 4 (дополнительная неопределенность, обусловленная выбором места для площадки, составляет до 25 %)

(a) Участок с крутым уклоном (> 30°);
(b) возможные препятствия должны быть расположены на расстоянии, превышающем половину (½) высоты препятствия.



Класс 5 (дополнительная неопределенность, обусловленная выбором места для площадки, составляет до 100 %)

Препятствия расположены ближе, чем половина (½) их высоты (дерево, крыша, стена и т.д.);

ПРИЗЕМНЫЙ ВЕТЕР

Обычные требования по высоте предусматривают, что датчики должны размещаться на высоте 10 м над уровнем поверхности земли и на открытой местности. Открытая местность в данном случае представляет собой поверхность, на которой препятствия расположены как минимум на расстоянии, равном, по крайней мере, их десятикратной высоте.

ШЕРОХОВАТОСТЬ

Измерениям ветра мешают не только окружающие препятствия, шероховатость поверхности также играет свою роль. По определению ВМО, ветер, дующий на геометрической высоте 10 м и с коэффициентом шероховатости 0,03 м, является приземным ветром для наземных станций.

Такой ветер считается эталонным ветром, для которого точно известны условия (высота 10 м и коэффициент шероховатости 0,03 м).

Следовательно, шероховатость вокруг площадки измерения должна быть зафиксирована документально. Шероховатость необходимо использовать для перевода измеренного ветра в эталонный ветер, но эта процедура может применяться только в том случае, если препятствия не находятся слишком близко. Вопросы, связанные с шероховатостью, и процедуры корректировки описываются в части I, глава 5.

Классификация шероховатости, данная в приложении в части I, глава 5, воспроизводится ниже:

Классификация местности по Davenport (1960), адаптированная Wieringa (1980*b*) применительно к аэродинамическому коэффициенту шероховатости z_0

Класс	*Краткое описание местности*	z_0 *(м)*
2	Плоская грязная поверхность, снег; отсутствие растительности, препятствий	0,005
3	Открытая плоская поверхность; трава, редкие отдельно стоящие препятствия	0,03
4	Невысокие сельскохозяйственные культуры; редкие большие препятствия: x/H > 20	0,10
5	Высокие сельскохозяйственные культуры; разбросанные препятствия: 15 < x/H < 20	0,25
6	Парковые насаждения, кусты; многочисленные препятствия: x/H ~ 10	0,5
7	Зона обычных больших препятствий (окраина, лес)	1,0
8	Городской центр с высокими и низкими зданиями	≥2

Здесь x — типичное расстояние до предмета, препятствующего потоку воздуха, а H — высота соответствующих крупных препятствий. Более подробное и доработанное описание классов см. в Davenport et al. (2000).

КЛАССИФИКАЦИЯ УСЛОВИЙ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Присутствие препятствий (почти всегда) означает снижение средних показаний ветра, однако значительно в меньшей степени сказывается на определении порывов ветра.

Приведенная ниже классификация предусматривает измерение на высоте 10 м, которая является стандартной высотой для метеорологических измерений.

Когда измерения проводятся на более низкой высоте (например, измерения на высоте 2 м, что иногда необходимо для агроклиматологических целей), следует применять класс 4 или 5 (см. ниже) с пометкой S (специфическая ситуация).

Там, где присутствуют многочисленные препятствия выше 2 м, рекомендуется, чтобы датчики устанавливались на 10 м выше средней высоты препятствий. Данный метод позволяет свести к минимуму влияние близлежащих препятствий. Данный метод является неизменным решением для того, чтобы исключить в какой-то степени влияние некоторых препятствий. Для этого, к сожалению, требуются более высокие мачты, которые не являются стандартными и, следовательно, будут более дорогостоящими. Необходимо учитывать для определенных площадок при их использовании, что препятствия, которые должны учитываться, должны быть выше уровня, расположенного на 10 м ниже датчиков (например, для анемометра, установленного на высоте 13 м, исходным уровнем отсчета для препятствий является высота 3 м; а препятствие высотой 7 м будет иметь эффективную высоту 4 м).

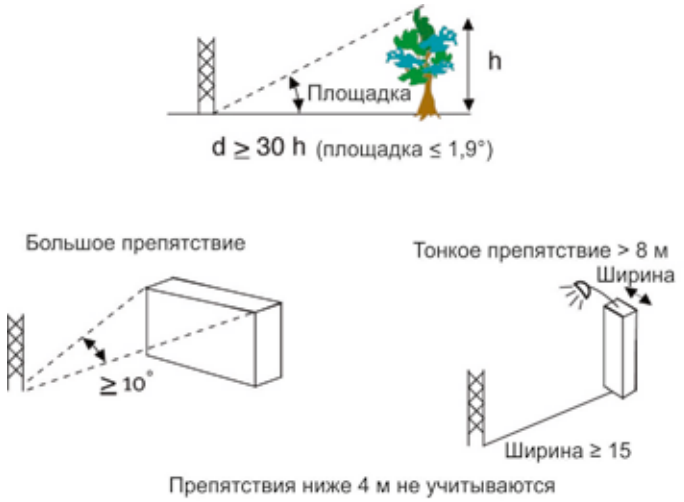
Далее, объект считается препятствием, если его угловая ширина превышает 10°, за исключением высоких тонких препятствий, как указывается ниже.

Изменения высоты (положительные или отрицательные) ландшафта, которые не являются репрезентативными для данной местности, считаются препятствиями.

Класс 1

(a) Мачта должна быть расположена на расстоянии, равном по крайней мере 30-кратной высоте окружающих препятствий;
(b) датчики должны быть расположены как минимум на расстоянии 15-кратной ширины узких препятствий (мачта, тонкие деревья) выше, чем 8 м.

Единичные препятствия ниже 4 м могут не учитываться.

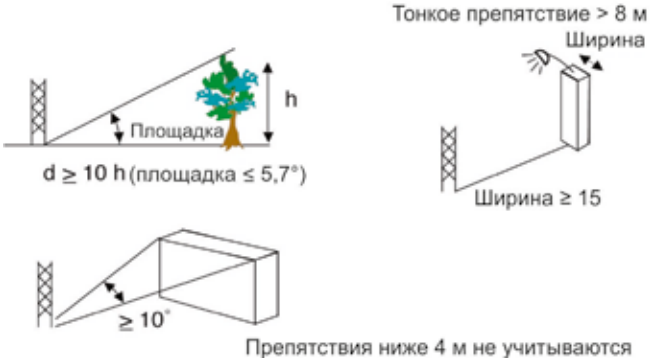


Показатель класса шероховатости составляет от 2 до 4 (коэффициент шероховатости ≤ 0,1 м)

Класс 2 (дополнительная погрешность, обусловленная выбором места для площадки, составляет до 30 %, возможно применение корректировки)

(a) Мачта должна быть расположена на расстоянии, равном по крайней мере 10- кратной высоте окружающих препятствий;
(b) датчики должны быть расположены как минимум на расстоянии 15-кратной ширины узких препятствий (мачта, тонкие деревья) выше, чем высота 8 м.

Единичные препятствия ниже 4 м могут не учитываться.



Показатель класса шероховатости составляет от 2 до 5 (коэффициент шероховатости ≤ 0,25 м).

Примечание: когда мачта расположена на расстоянии, равном по крайней мере 20-кратной высоте близлежащих преград, могут быть применены поправки (см. главу о ветре Руководства КПМН). В случае более близких препятствий поправки могут применяться в некоторых ситуациях.

Класс 3 (дополнительная погрешность, обусловленная выбором места для площадки, составляет до 50 %, корректировка применяться не может)

(a) Мачта должна быть расположена на расстоянии, равном по крайней мере 5-кратной высоте близлежащих препятствий;
(b) датчики должны быть расположены как минимум на расстоянии 10-кратной ширины узких препятствий (мачта, тонкие деревья) выше, чем 8 м.

Единичные препятствия ниже 5 м могут не учитываться.

Класс 4 (дополнительная погрешность, обусловленная выбором места для площадки, составляет до 50 %)

(a) Мачта должна быть расположена на расстоянии, равном по крайней мере 2,5-кратной высоте окружающих препятствий;
(b) отсутствие препятствий с угловой шириной более 60° и высотой более 10 м на расстоянии до 40 м.

Единичные препятствия ниже 6 м могут не учитываться, только для измерений на высоте 10 м или более.

Класс 5 (дополнительную погрешность оценить невозможно)

Площадка, не отвечающая требованиям класса 4.

СУММАРНАЯ И РАССЕЯННАЯ РАДИАЦИЯ

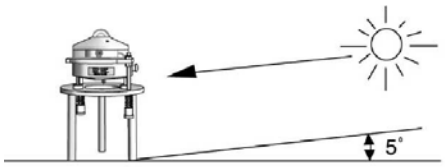
Необходимо избегать близлежащих препятствий. Тень, обусловленная естественным рельефом, не учитывается в классификации. Неотражающие препятствия ниже видимого горизонта могут не учитываться.

Препятствие считается отражающим, если его альбедо выше 0,5.

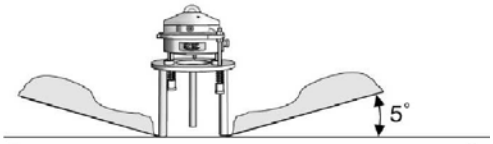
Положением отсчета для углов возвышения является чувствительный элемент прибора.

Класс 1

(a) Отсутствие тени, отбрасываемой на датчик, когда солнце находится на угловой высоте выше 5°. Для регионов на широте ≥ 60° этот предел снижается до 3°;
(b) отсутствие не имеющих тени отражающих препятствий с угловой высотой выше 5° и общей угловой шириной выше 10°.



Тень отсутствует

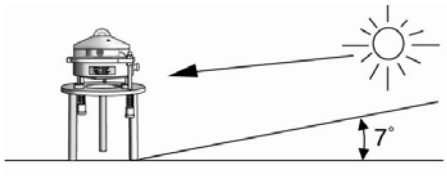


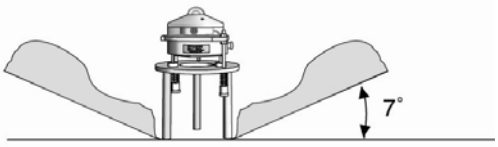
Отсутствие не имеющих тени препятствий с угловой шириной > 10°

Класс 2

(a) Отсутствие тени, отбрасываемой на датчик, когда солнце находится на угловой высоте выше 7°. Для регионов на широте ≥ 60° этот предел снижается до 5°;

(b) отсутствие не имеющих тени отражающих препятствий с угловой высотой выше 7° и общей угловой шириной выше 20°.



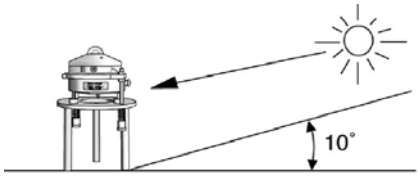


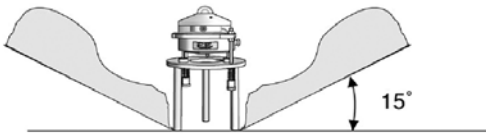
Никаких не имеющих тени препятствий с угловой шириной > 20°

Класс 3

(a) Отсутствие тени, отбрасываемой на датчик, когда солнце находится на угловой высоте выше 10°. Для регионов на широте ≥ 60° этот предел снижается до 7°;

(b) отсутствие не дающих тени отражающих препятствий с угловой высотой выше 15° и общей угловой шириной выше 45°.

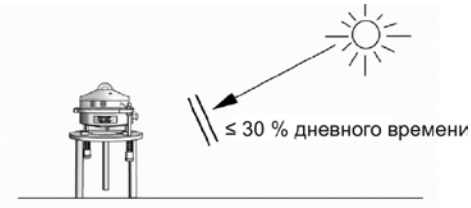




Отсутствие не имеющих тени препятствий с угловой шириной > 45°

Класс 4

Отсутствие отбрасываемой тени в течение более чем 30 % дневного времени в любой день года.



Отсутствие отбрасываемой тени в течение более чем 30 % дневного времени

Класс 5

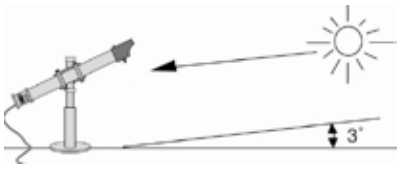
Отсутствие отбрасываемой тени в течение более чем 30 % дневного времени, по крайней мере один день в году.

ПРЯМАЯ РАДИАЦИЯ И ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ СОЛНЕЧНОГО СИЯНИЯ

Необходимо избегать близлежащих препятствий. Тень, обусловленная естественным рельефом, не учитывается в классификации. Препятствия ниже видимого горизонта могут не учитываться.

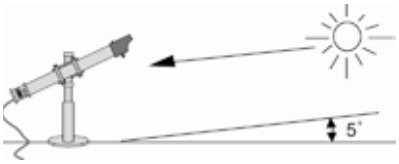
Класс 1

Отсутствие тени, отбрасываемой на датчик, когда солнце находится на угловой высоте выше 3°.



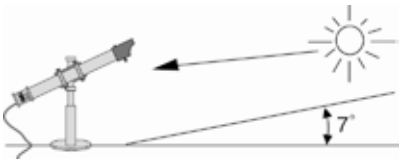
Класс 2

Отсутствие тени, отбрасываемой на датчик, когда солнце находится на угловой высоте выше 5°.



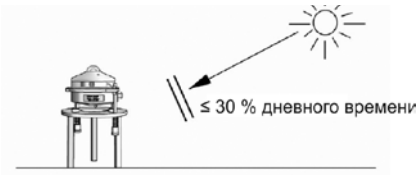
Класс 3

Отсутствие тени, отбрасываемой на датчик, когда солнце находится на угловой высоте выше 7°.



Класс 4

Отсутствие отбрасываемой тени в течение более чем в 30 % дневного времени в любой день года.



Отсутствие отбрасываемой тени в течение более чем 30 % дневного времени

Класс 5

Отсутствие отбрасываемой тени в течение более чем в 30 % дневного времени, по крайней мере один день в году.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1.C

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ СТАНЦИИ

Точность, с которой данные наблюдения описывают состояния выбранной части атмосферы, не является такой же, как погрешность прибора, поскольку ценность данных наблюдений также зависит от установки прибора по отношению к атмосфере. Это не является техническим вопросом, и поэтому описание установки также является ответственностью наблюдателя станции или техника. На практике идеальное место размещения встречается редко, и надежность данных наблюдений невозможно установить до тех пор, пока не проведено надлежащее документальное оформление фактической установки (ВМО, 2002).

Метаданные станции должны содержать следующие аспекты установки прибора:

(a) высота приборов над поверхностью (или ниже ее в случае температуры почвы);
(b) тип защиты и степень вентиляции для измерений температуры и влажности;
(c) степень помех по стороны других приборов или объектов (мачты, вентиляторы);
(d) окружение прибора на уровне микромасштаба или местного масштаба, в частности;
    (i) состояние поверхности ограждения, влияющее на температуру и влажность; близлежащие крупные препятствия (здания, заборы, деревья) и их размер;
    (ii) степень закрытия горизонта для наблюдений за солнечным сиянием и радиацией;
    (iii) шероховатость окружающей территории и основная растительность, оказывающие воздействие на ветер;
    (iv) все характеристики территории в местном масштабе, такие как незначительные уклоны, тротуары, водные поверхности;
    v) основные характеристики территории в мезомасштабе, такие как прибрежные зоны, горы или урбанизация.

Большинство этих вопросов будут носить полупостоянный характер, однако в ведущемся на станции журнале следует регистрировать и датировать любые значительные изменения (рост растительности, новые здания).

Для документирования установки станции в местном масштабе желательна карта с масштабом не более 1:25 000, показывающая контуры с разницами возвышения ≈ 1 м. На этой карте должны быть отмечены места нахождения зданий и деревьев (с указанием высоты, поверхностный покров и смонтированные приборы). По краям карты следует указывать основные дистанционные характеристики территории (например, застроенные районы, леса, открытая вода, холмы). Полезными являются фотографии, если на них не просто показаны ближние планы прибора или метеорологической будки, но если они сделаны на достаточном расстоянии для того, чтобы показать данный прибор и территорию на его заднем плане. Подобные фотографии следует делать со всех координальных направлений.

Необходимые минимальные метаданные для установки прибора могут быть обеспечены благодаря заполнению образца, который приводится для каждой станции в сети (см. рисунок ниже). Пример того, как это делается, показан в публикации ВМО (2003b). Классы, используемые в данном документе для описания шероховатости территории, приводятся в главе 5 части I Руководства. Более подробное описание вопросов, касающихся метаданных, дается в публикации ВМО (2004).

Станция Обновление

Широта Долгота

0 200 м

Ограждение

Здание

Дорога

Деревья, кусты

(12) Высота (м) препятствия

Высота контура

N

Горизонт облучения

1: 6
1: 10
1: 20

8°
4°
0°

N E S W N

Температура и влажность: Высота позиции датчика

Искусственная вентиляция? да/нет

Подстилающая поверхность под экраном

Почва под экраном

Осадки: Высота кольцевого края приёмного отверстия осадкомера от поверхности площадки

Ветер: Высота анемометра Свободно стоящие? yes/no

(если «нет» выше, то: высота здания , ширина , длина .

Класс шероховатости местности: к северу , к востоку, к югу, к западу .

Примечания:

Основная форма для метаданных, касающихся местоположения станции

ПРИЛОЖЕНИЕ 1.D

ТРЕБОВАНИЯ К ОПЕРАТИВНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ И РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИБОРОВ

(См. пояснительные примечания внизу этой таблицы; в первом ряду приводятся номера колонок)

1		*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*
Переменный параметр		*Диапазон*	*Сообщаемое разрешение*	*Способ измерения/ наблюдения*	*Требуемая погрешность измерения*	*Постоянная времени датчика*	*Время усреднения результатов*	*Достижимая погрешность измерения*	*Примечания*
1.	Температура								
1.1	Температура воздуха	–80 – +60°C	0,1 K	I	0,3 K для ≤ –40 C 0,1 K для > –40 C и ≤ +40 C 0,3 K для > +40 C	20 с	1 мин	0,2 K	На достижимую погрешность и эффективную постоянную времени может оказать влияние конструкция метеорологической будки, защищающей термометр от солнечного излучения. Постоянная времени зависит от потока воздуха над датчиком.
1.2	Экстремальные значения температуры воздуха	–80 – +60°C	0,1 K	I	0,5 K для ≤ –40 C 0,3 K для > –40 C и ≤ +40 C 0,5 K для > +40 C	20 с	1 мин	0,2 K	
1.3	Температура поверхностного слоя воды в море	–2 – +40°C	0,1 K	I	0,1 K	20 с	1 мин	0,2 K	
1.4	Температура почвы	–50 – +50°C	0,1 K	I		20 с	1 мин	0,2 K	
2.	Влажность								
2.1	Температура точки росы	–80 – +35°C	0,1 K	I	0,1 K	20 с	1 мин	0,25 K	Погрешность измерения зависит от отклонения от температуры воздуха.

1		2	3	4	5	6	7	8	9
Переменный параметр		*Диапазон*	*Сообщаемое разрешение*	*Способ измерения/ наблюдения*	*Требуемая погрешность измерения*	*Постоянная времени датчика*	*Время усреднения результатов*	*Достижимая погрешность измерения*	*Примечания*
							Wet-bulb temperature (psychrometer)		
2.2	Относительная влажность	0 – 100%	1%	I	1%	20 с	1 мин	0,2 K	В случае прямого измерения и сочетания с температурой воздуха (сухой термометр). Возможны значительные ошибки, обусловленные проблемами вентиляции и поддержания чистоты (см. также примечание 11). Пороговая величина в 0 °C подлежит уведомлению для смоченного термометра.
							Твердое и прочее состояния		
						40 с	1 мин	3%	Постоянная времени и достижимая погрешность датчиков твердого состояния могут показывать значитель-ную зависимость от темпе-ратуры и влажности
3.	Атмосферное давление								
3.1	Давление	500 – 1 080 гПа	0,1 гПа	I	0,1 гПа	2 с	1 мин	0,15 гПа	Давление как на уровне станции, так и СУМ. На погрешность измерения существенно влияет динамическое давление, обусловленное действием ветра, если не предпринимается никаких мер предосторожности. Неадекватная компенсация температуры преобразователем может существенно повлиять на погрешность измерения. При измерениях с борта судов на давление на СУМ влияет погрешность при определении высоты барометра.
3.2	Барическая тенденция	Не указан	0,1 гПа	I	0,2 гПа			0,2 гПа	Разница между мгновенными значениями.

1		2	3	4	5	6	7	8	9
Переменный параметр		*Диапазон*	*Сообщаемое разрешение*	*Способ измерения/ наблюдения*	*Требуемая погрешность измерения*	*Постоянная времени датчика*	*Время усреднения результатов*	*Достижимая погрешность измерения*	*Примечания*
4.	Облака								
4.1	Количество облаков	0/8 – 8/8	1/8	I	1/8	n/a		2/8	Период времени, за который формируется определенная структура облаков, может быть использован для автома-тической оценки количества облаков нижнего яруса.
4.2	Высота нижней кромки облаков	0 м – 30 км	10 m	I	10 м для ≤ 100 м 10% для > 100 м	n/a		~10 м	Достижимая погрешность измерения может с трудом поддаваться определению. Не существует никакого четкого определения для измеряемой при помощи приборов нижней границы облаков (например, основанного на глубине проникновения или сущес-твенном изменении неодноро-дности профиля ослабления). Значительная погрешность во время осадков.
4.3	Высота верхней границы облачности	Данные отсутствуют							
5.	Ветер								
5.1	Скорость	0 – 75 м/с	0,5 м/с	A	0,5 м/с для ≤ 5 м/с 10% для > 5 м/с	Путь синхрони-зации 2–5 м	2 и/или 10 мин	0,5 м/с для ≤ м/с 10% для > 5 м/с	Среднее значение за 2 и/или 10 мин. Нелинейные устройства. Необходим тщательный подход к разработке процесса усред-нения. Путь синхронизации обычно выражается в виде усредненных величин длины синхронизации, рассчитанных по декартовым компонентам (см. часть III, глава 3, раздел 3.6 настоящего Руководства). При использовании ультразвуковых анемометров не требуется ни пути синхронизации, ни посто-янной времени. Для перемеща-ющихся мобильных станций необходимо учитывать переме-щение станции, в том числе связанную с ним погрешность.
5.2	Направление	0 – 360°	1°	A	5°	Damping ratio > 0.3	2 и/или 10 мин	5°	

1		2	3	4	5	6	7	8	9
Переменный параметр		*Диапазон*	*Сообщаемое разрешение*	*Способ измерения/ наблюдения*	*Требуемая погрешность измерения*	*Постоянная времени датчика*	*Время усреднения результатов*	*Достижимая погрешность измерения*	*Примечания*
5.3	Порывы	0,1 – 150 м/с	0,1 м/с	A	10%		3 с	0,5 м/с для ≤ 5 м/с 10% для > 5 м/с	Следует регистрировать самый сильный порыв, усредненный за 3 с.
6.	Осадки								
6.1	Количество (суточное)	0 – 500 мм	0,1 мм	T	0,1 мм для ≤ 5 мм 2% для > 5 мм	n/a	n/a	Более 5 % или 0,1 мм	Общее количество, основанное на суточных количествах. Погрешность измерения зависит от аэродинамической эффективности осадкомеров при сборе осадков и от потерь в результате испарения в нагреваемых осадкомемерах.
6.2	Высота снежного покрова	0 – 25 м	1 см	I	1 см для ≤ 20 см 5% для > 20 см	< 10 с	1 мин	1 см	Средняя высота снежного покрова на территории, репрезентативной для места проведения наблюдений.
6.3	Толщина слоя льда при обледенении судов	Не указан	1 см	I	1 см для ≤ 10 см 10% для > 10 см				
6.4	Интенсивность осадков	0,02 мм/час$^{-1}$ – 2 000 мм/час$^{-1}$	0,1 мм/час$^{-1}$	I	(составляющий компонент): неприменимо для 0,02 – 0,2 мм/час 0,1 мм/час для 0,2 – 2 мм/час 5 % для > 2 мм/час	< 30 с	1 мин	В условиях постоянного потока в лаборатории – 5 % для величины более 2 мм/час; 2 % - для величины более 10 мм/час. В полевых условиях – 5 мм/час и 5 % для величины более 100 мм/час	Значения погрешности только для жидких осадков. Значительные воздействия на погрешность оказывает ветер. Датчики могут показывать весьма нелинейное поведение. Для < 0,2 мм/час: при использовании дождемеров накопительного типа в случае выпадения твердых осадков. Значительное воздействие оказывается на обнаружение только постоянной времени датчика (да/нет).
6.5	Продолжительность осадков (суточная)	0 – 24 час	60 с	T	n/a	60 с			Пороговое значение 0,02 мм/час

1		2	3	4	5	6	7	8	9
Переменный параметр		*Диапазон*	*Сообщаемое разрешение*	*Способ измерения/ наблюдения*	*Требуемая погрешность измерения*	*Постоянная времени датчика*	*Время усреднения результатов*	*Достижимая погрешность измерения*	*Примечания*
7.	Радиация								
7.1	Продолжительность солнечного сияния (суточная)	0 – 24 час	60 с	T	0,1 час	20 с	n/a	Более 0,1 час или 2 %	
7.2	Чистая радиация, энергетическая экспозиция (суточная)	Не указан	1 Дж/м^2	T	0,4 МДж/м^2 для ≤ 8 МДж/м^2 5 % для > 8 МДж/м^2	20 с	n/a	0,4 МДж/м^2 для ≤ 8 МДж/м^2 5 % для > 8 МДж/м^2	Энергетическая экспозиция, выраженная в виде суточных сумм (количество) (чистой) радиации
8.	Видимость								
8.1	Метеорологическая оптическая дальность (МОД)	10 м– 100 км	1 м	I	50 м для ≤ 600 м 10 % для > 600 м – ≤ 1500 м 20 % для > 1500 м	< 30 с	1 и 10 мин	Более 20 м или 20 %	Достижимая погрешность измерения может зависеть от причины затемнения. Количество, подлежащее усреднению: коэффициент ослабления (см. часть III, глава 3, раздел 3.6 настоящего Руководства). Предпочтение отдается усреднению логарифмических значений.
8.2	Дальность видимости на взлетно-посадочной полосе (ВПП)	10 м – 2 000 м	1 м	A	10 м для ≤ 400 м 25 м для > 400 м – ≤ 800 м 10% для > 800 м	< 30 с	1 и 10 мин	Более 20 м или 20 %	В соответствии с ВМО-№ 49, том II, приложение A (издание 2004 г.) и документом 9328-AN/908 ИКАО (второе издание, 2000 г.). Могут существовать другие варианты этих документов, уточняющие другие величины.
8.3	Яркость фона	0 – 40000 кд м^2	1 кд м$^{-2}$	I		30 с	1 мин	10%	Относительно 8,2 ВПП
9.	Волны								
9.1	Значительная высота волн	0 – 50 м	0,1 м	A	0,5 м для ≤ 5 м 10% для > 5 м	0,5 с	20 мин	0,5 м для ≤ 5 м 10% для > 5 м	Усреднение за 20 мин при измерениях с помощью приборов
9.2	Период волн	0 – 100 с	1 с	A	0,5 с	0,5 с	20 мин	0.5 с	Усреднение за 20 мин при измерениях с помощью приборов

1		2	3	4	5	6	7	8	9
Переменный параметр		*Диапазон*	*Сообщаемое разрешение*	*Способ измерения/ наблюдения*	*Требуемая погрешность измерения*	*Постоянная времени датчика*	*Время усреднения результатов*	*Достижимая погрешность измерения*	*Примечания*
9.3	Направление волн	0 – 360°	1°	A	10°	0,5 с	20 мин	20°	Усреднение за 20 мин при измерениях с помощью приборов
10.	Испарение								
10.1	Испарения из чаши испарителя	0 – 100 мм	0,1 мм	T	0,1 мм для ≤ 5 мм 2% для > 5 мм	n/a			

Примечания:

1. Колонка 1 – основная переменная величина.
2. Колонка 2 – общий диапазон для большинства переменных величин; пределы зависят от местных климатических условий.
3. Колонка 3 – наиболее точное разрешение, как это определено в *Наставлении по кодам* (ВМО-№ 306).
4. Колонка 4:
   I = Мгновенное значение. В целях исключения естественной мелкомасштабной изменчивости и шума в качестве минимального и наиболее приемлемого значения рассматривается значение, усредненное за период в 1 минуту; приемлемы также усредненные значения за периоды вплоть до 10 минут.
   A: = Усредненное значение. Усредненные значения за фиксированный период времени, как это определено требованиями кодирования.
   T: = Суммарные значения. Суммарные значения за фиксированный(е) период(ы) времени, как это определено требованиями кодирования.

5 Колонка 5 – рекомендованные требования к погрешности измерения для общего оперативного использования, т.е. данные уровня II согласно FM 12, 13, 14, 15 и его соответствующим эквивалентам BUFR. Они были приняты всеми восемью техническими комиссиями и применимы для синоптической, авиационной, сельскохозяйственной и морской метеорологии, гидрологии, климатологии и т.д. Эти требования применимы как к неавтоматическим, так и автоматическим метеорологическим станциям, как это определено в Наставлении по *Глобальной системе наблюдений* (ВМО-№ 544). Отдельные применения могут иметь менее строгие требования. Указанное значение требуемой погрешности измерения представляет собой погрешность сообщаемого значения по отношению к действительному значению и указывает на тот интервал, в котором находится действительное значение при указанной погрешности. Рекомендуемый уровень вероятности составляет 95 % (k = 2), что соответствует уровню 2 σ для нормального (гауссового) распределения переменной величины. Предположение о том, что в расчет приняты все известные поправки, подразумевает, что ошибки в сообщаемых значениях будут иметь среднее значение (или смещение), близкое к нулю. Любое остаточное смещение должно быть незначительным по сравнению с указанным требованием к погрешности измерения. Действительное значение – это значение, которое в оперативных условиях идеально характеризует измеряемую/наблюдаемую переменную величину за репрезентативный временной интервал, на репрезентативной территории и/или в необходимом объеме с учетом размещения и установки приборов.

6. Колонки 2 – 5 касаются требований, установленных группой экспертов КОС по потребностям в данных с автоматических метеорологических станций в 2004 г.
7. Колонки 6 – 8 касаются типичных оперативных рабочих характеристик, установленных группой экспертов КПМН по технологии приземных наблюдений и методам измерений в 2004 г.
8. Достижимая погрешность измерения (колонка 8) основана на технических характеристиках датчика при нормальной или рекомендованной установке, которая может быть достигнута в оперативной практике. Ее следует рассматривать в качестве практической помощи пользователям при определении достижимых и допустимых требований.
9. n/a = неприменимо.
10. Термин «погрешность» является более желательным по сравнению с термином точность (т.е. погрешность соответствует стандартам ИСО по погрешности измерений (ИСО, 1995)).
11. Температура точки росы, относительная влажность и температура воздуха взаимосвязаны и соответственно взаимосвязаны их погрешности. При усреднении предпочтение отдается абсолютной влажности как главной переменной величине.

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Bureau International des Poids et Mesures/Comité Consultatif de Thermométrie, 1990: The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90) (H. Preston Thomas). *Metrologia*, 1990, 27, pp. 3–10.

Bureau International des Poids et Mesures, 1998: *The International System of Units (SI)*. Seventh edition, BIPM, Sèvres/Paris.

Brooks, C.E.P. and N. Carruthers,1953: *Handbook of Statistical Methods in Meteorology.* MO 538, Meteorological Office, London.

Eisenhart, C., 1963: Realistic evaluation of the precision and accuracy of instrument calibration systems. National Bureau of Standards–C, Engineering and Instrumentation, *Journal of Research*, Volume 67C, Number 2, April–June 1963.

International Civil Aviation Organization, 2002: *World Geodetic System* — 1984 (WGS-84) Manual. ICAO Doc 9674–AN/946. Second edition, Quebec.

International Organization for Standardization, 2008: *International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology*. Prepared by BIPM/ISO/OIML/IEC/IFCC/IUPAC and IUPAP, third edition, Geneva.

International Organization for Standardization, 1993b: *ISO Standards Handbook: Quantities and Units.* ISO 31:1992, third edition, Geneva.

International Organization for Standardization, 1995: *Guide to the Expression of Uncertainty of Measurement*. Published in the name of BIPM/IEC/IFCC/ISO/IUPAC/IUPAP and OIML, first edition, Geneva.

International Union of Pure and Applied Physics, 1987: *Symbols, Units, Nomenclature and Fundamental Constants in Physics*. SUNAMCO Document IUPAP-25 (E.R. Cohen and P. Giacomo), reprinted from Physica 146A, pp. 1–68.

Kok, C.J., 2000: *On the Behaviour of a Few Popular Verification Scores in Yes/No Forecasting. Scientific Report,* WR-2000-04, KNMI, De Bilt.

Linacre, E., 1992: *Climate Data and Resources – A Reference and Guide.* Routledge, London, 366 pp.

Murphy, A.H. and R.W. Katz (eds.), 1985: *Probability, Statistics and Decision Making in the Atmospheric Sciences.* Westview Press, Boulder.

National Institute of Standards and Technology, 1995: *Guide for the Use of the International System of Units (SI)* (B.N. Taylor). NIST Special Publication No. 811, Gaithersburg, United States.

Natrella, M.G., 1966: *Experimental Statistics.* National Bureau of Standards Handbook 91, Washington DC.

Orlanski, I., 1975: A rational subdivision of scales for atmospheric processes. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 56, pp. 527–530.

World Meteorological Organization, 1966: *International Meteorological Tables* (S. Letestu, ed.) (1973 amendment), WMO-No. 188. TP.94, Geneva.

World Meteorological Organization, 1970: *Performance Requirements of Aerological Instruments* (C.L. Haw-son). Technical Note No. 112, WMO-No. 267. TP.151, Geneva.

Всемирная Метеорологическая Организация, 1981: *Руководство по агрометеорологической практике.* Второе издание, ВМО-№ 134, Женева.

Всемирная Метеорологическая Организация, 1983 *Руководство по климатологическим практикам.* Второе издание, ВМО-№ 100, Женева (обновления имеются по адресу http://www.wmo.int/web/wcp/ccl/).

Всемирная Метеорологическая Организация, 1988: *Технический регламент.* Том I, приложение A, ВМО-№ 49, Женева.

Всемирная Метеорологическая Организация, 1989: *Руководство по Глобальной системе наблюдений*. ВМО-№ 488, Женева.

Всемирная Метеорологическая Организация, 1990: *Руководство по системам метеорологических наблюдений и распространения информации на аэродромах.* ВМО-№ 731, Женева.

Всемирная Метеорологическая Организация, 1992a: *Международный метеорологический словарь.* Второе издание, ВМО-№ 182, Женева.

Всемирная Метеорологическая Организация, 1992b: *Руководство по Глобальной системе обработки данных и прогнозирования*. Том I – Глобальные аспекты, приложение I-2, ВМО-№ 485, Женева.

World Meteorological Organization, 1993a: *Siting and Exposure of Meteorological Instruments* (J. Ehinger). Instruments and Observing Methods Report No. 55, WMO/TD-No. 589, Geneva.

World Meteorological Organization, 1993b: *Weather Reporting.* Volume A – Observing stations, WMO-No. 9, Geneva.

Всемирная Метеорологическая Организация, 1994: *Руководство по гидрологической практике.* Пятое издание, ВМО-№168, Женева.

World Meteorological Organization, 2001: *Lecture Notes for Training Agricultural Meteorological Personnel.* Second edition, WMO-No. 551, Geneva.

World Meteorological Organization, 2002: Station exposure metadata needed for judging and improving the quality of observations of wind, temperature and other parameters (J. Wieringa and E. Rudel). *Papers Presented at the WMO*

Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO–2002), Instruments and Observing Methods Report No. 75, WMO/TD-No. 1123, Geneva.

Всемирная Метеорологическая Организация, 2003a: *Наставление по Глобальной системе наблюдений.* Том I – Глобальные аспекты, ВМО-№ 544, Женева.

World Meterological Organization, 2003b: G*uidelines on Climate Metadata and Homogenization* (P. Llansó, ed.). World Climate Data and Monitoring Programme (WCDMP) Series Report No. 53, WMO/TD-No. 1186, Geneva.

Всемирная Метеорологическая Организация, 2009: *Совместная техническая комиссия ВМО/МОК по океанографии и морской метеорологии*, ВМО-№ 1049, Женева.

ГЛАВА 2

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

2.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

2.1.1 Определение

В публикации WMO (1992) температура определяется как физическая величина, характеризующая усредненное хаотическое движение молекул в физическом теле. Температура определяется состоянием, при котором два тела, находящиеся в тепловом контакте, стремятся к равной температуре. Таким образом, температура отображает термодинамическое состояние тела, а ее величина определяется направлением суммарного потока тепла между двумя телами. В подобной системе считается, что тело, которое отдает тепло другому, имеет более высокую температуру. Однако, определить физическую величину температуры в зависимости от «состояния тела» не просто. Решение найдено с помощью одобренной на международном уровне температурной шкалы, которая основана на общепринятых значениях точки замерзания и тройной точки вещества.[1] . В настоящее время такой шкалой является Международная температурная шкала, принятая в 1990 г. (МТШ-90)[2] , а температура, измеренная по этой шкале, обозначается как T_{90}. При измерении температур в метеорологическом диапазоне (от –80 до +60 °C) эта шкала опирается на линейную зависимость между электрическим сопротивлением платины и температурой тройной точки воды, которая соответствует 273, 16 Кельвинам (BIPM, 1990).

Для метеорологических целей измеряют температуру ряда компонентов окружающей среды. Наиболее распространенной измеряемой переменной величиной является температура воздуха (на различных высотах). Также измеряется температура подстилающей поверхности, температура почвы, минимальная температура воздуха в травостое и температура морской воды. В публикации WMO (1992) температура воздуха определяется как «температура, измеренная с помощью термометра, установленного на открытом воздухе в месте, защищенном от прямой солнечной радиации». Несмотря на то, что данное определение нельзя использовать для определения термодинамической величины как таковой, оно пригодно для большинства применений.

2.1.2 Единицы измерения и шкалы

Термодинамическая температура (T), единицей измерения которой является кельвин (К), (также определяется как «температура по шкале Кельвина) представляет собой основную величину. Кельвин определяется как 1/273,16 часть термодинамической температуры тройной точки воды. Для большинства метеорологических целей используется температура (t) в градусах по Цельсию (или «температура по шкале Цельсия») (на основании значения температуры точки льда, которая используется в качестве вторичной реперной точки в таблице 2 Приложения), определяемая с помощью уравнения 2.1:

$$t/°\mathrm{C} = T/\mathrm{K} - 273.15 \qquad (2.1)$$

Один градус по шкале Цельсия (°C) равен одному кельвину (К). Необходимо отметить, что для температуры по шкале Кельвина символ, употребляемый для обозначения градусов (°), не используется.

Результаты измерений температуры по термодинамической шкале выражаются по отношению к абсолютному нулю (0 К) – температуре, при которой кинетическая энергия молекул любого вещества равна нулю. Начиная с 1990 г. повсеместно применяется Международная температурная шкала (МТШ-90) (см. Приложение), которая основана на значениях температуры ряда воспроизводимых состояний равновесия (см. таблицу 1 Приложения) и на эталонных приборах, градуированных по этим значениям температуры. МТШ была выбрана таким образом,

1 Авторитетным органом по вопросам, связанным с этой шкалой является Международное бюро мер и весов (МБМВ), Севр (Париж); см. http://www.bipm.org. Консультативный комитет по термометрии (ККТ) МБМВ является исполнительным органом, отвечающим за разработку и осуществление МТШ.

2 Практическую информацию по МТШ-90 можно найти на веб-сайте МТШ-90 по адресу: http://www.its-90.com.

чтобы температура, измеряемая по ней, в наибольшей степени приближалась к термодинамической температуре, причем любое различие между ними не выходило бы за существующие пределы погрешности измерений. Кроме основных реперных точек МТШ, имеются вторичные реперные точки (см. таблицу 2 Приложения). Температуры, представляющие интерес с позиций метеорологии, получают посредством интерполяции реперных точек, используя стандартные формулы, приведенные в Приложении.

2.1.3 Метеорологические требования

2.1.3.1 Общие сведения

Для метеорологии требуются в основном следующие измерения температуры:

(a) воздуха вблизи поверхности земли;
(b) подстилающей поверхности;
(c) почвы на различных глубинах;
(d) поверхности морей и озер;
(e) верхних слоев атмосферы.

Результаты этих измерений, совместных или независимых, локальных или в глобальном масштабе, используются в численных моделях прогноза погоды, для решения гидрологических и сельскохозяйственных задач, а также в качестве показателей изменчивости климата. Локальная температура также оказывает прямое физиологическое влияние на ежедневную деятельность людей на всем земном шаре. Могут потребоваться как непрерывные измерения температуры (регистрация), так и через различные временные интервалы. В этой главе рассматриваются измерения температуры, указанные в пунктах (a), (b) и (c).

2.1.3.2 Требования к точности

В части 1 главы 1 подробно описаны требования к диапазону, разрешающей способности и погрешности измерений температуры. Однако неэкономично выпускать термометры, которые удовлетворяют всем этим требованиям. Вместо этого используются более дешевые термометры, градуированные в соответствии с лабораторной стандартной методикой, причем в их показания вносятся поправки. Число поправок может быть ограничено, но таким образом, чтобы погрешность измерений не превышала установленные пределы. Кроме того, следует выбирать такой рабочий диапазон термометра, который соответствует местному климатическому диапазону изменения температуры. В качестве примера в таблице приводится диапазон значений температуры, используемых при калибровке, и погрешности термометров с типичным диапазоном измерений.

Требования к характеристикам термометра

Тип термометра	*Обычный*	*Максимальный*	*Минимальный*
Пределы шкалы (°C)	–30 … 45	–30 … 50	– 40 … 40
Диапазон калибровки (°C)	–30 … 40	–25 … 40	–30 … 30
Наибольшая погрешность	<0,2 K	0,2 K	0,3 K
Наибольшая разность между максимальной и минимальной поправкой в пределах диапазона	0,2 K	0,3 K	0,5 K
Максимальное изменение поправки в пределах любого интервала в 10°C	0,1 K	0,1 K	0,1 K

Все приборы для измерения температуры должны быть снабжены либо свидетельством с данными о погрешности измерений или техническими характеристиками, либо свидетельством о поверке, содержащим поправки, которые следует применять для достижения необходимой точности. Первичные испытания и калибровка должны проводиться в национальных метеорологических службах или аккредитованной поверочной лаборатории. В дальнейшем приборы для измерения температуры также должны поверяться через строго соблюдаемые интервалы времени; точные приборы, используемые для такой поверки, также должны быть откалиброваны по другому прибору или датчику.

2.1.3.3 Инерционность термометров

Для обычных метеорологических наблюдений неудобно использовать термометры, постоянные времени или коэффициенты инерции которых чрезвычайно малы, так как температура воздуха непрерывно меняется, иногда на один-два градуса за несколько секунд. Поэтому для получения репрезентативных значений температуры с помощью такого термометра потребовалось бы взять среднее ряда его показаний. Термометр с большей постоянной времени сглаживает быстрые флуктуации, однако слишком большая постоянная времени может привести к погрешностям при медленных изменениях температуры. Рекомендуется, чтобы постоянная времени – время, необходимое для того, чтобы термометр регистрировал 63,2 % изменений температуры

воздуха, – составляла 20 секунд. Постоянная времени термометра зависит от воздушного потока над датчиком.

2.1.3.4 Регистрация условий, в которых производятся измерения

Температура является одной из метеорологических величин, точность измерения которой в значительной степени зависит от экспозиции. В частности, при изучении климата необходимо учитывать, что результаты измерения температуры определяются состоянием окружающей среды, наличием растительности, строений и других объектов, состоянием подстилающей поверхности, состоянием и изменением радиационной защиты или экрана, а также другими изменениями в оборудовании. Важно осуществлять регистрацию не только температурных данных, но и условий, в которых производятся измерения. Такая информация называется метаданными (данными о данных).

2.1.4 Методы измерения

Для того чтобы измерить температуру объекта, необходимо привести термометр к той же температуре, что и у объекта (т. е. в состояние термодинамического равновесия с ним), а затем измерить температуру самого термометра. Кроме того, температуру можно определить с помощью радиометра, не требующего условия теплового равновесия.

В качестве принципа действия термометра можно использовать любое свойство вещества, зависящее от температуры. Такими свойствами, наиболее широко используемыми в метеорологических термометрах, являются тепловое расширение и изменение электрического сопротивления при изменении температуры. Радиометры работают в инфракрасной части электромагнитного спектра и используются, кроме прочих применений, для измерений температуры со спутников. Специальные методы определения температуры воздуха с помощью ультразвуковых измерений, разработанные для определения скорости движения воздуха, также позволяют определить среднюю скорость движения молекул воздуха, и, как следствие, температуру воздуха (WMO, 2002a).

Термометры, показывающие текущее значение температуры, часто называют обычными термометрами, а указывающие экстремальные значения температуры за некоторый промежуток времени – максимальными либо минимальными термометрами.

Описание конструкций приборов и лабораторных методов измерения температуры можно найти в различных сборниках, например, в публикациях Jones (1992) и Middleton and Spilhaus (1960). При рассмотрении методов термометрии, следует учитывать, что для метеорологических задач применимы только специальные технологии в связи с ограничениями, обусловленными характерными особенностями климата или окружающей среды.

2.1.4.1 Размещение и установка термометра

Излучение солнца, облаков, земли и других окружающих объектов проходит сквозь воздух без какого-либо заметного изменения его температуры, но термометр, установленный на открытом пространстве, может поглощать значительное количество радиации. Вследствие этого собственная температура термометра может отличаться от истинной температуры воздуха, причем различие зависит от интенсивности радиации, а также от соотношения между поглощенной радиацией и потерей тепла. У некоторых элементов термометра, таких, как очень тонкая проволока, используемая в термометре сопротивления без защиты, разница может быть очень небольшой или даже пренебрежимо малой. Однако, у обычных рабочих термометров при очень неблагоприятных условиях разница может достигать 25 К. Таким образом, для того чтобы термометр находился в условиях истинной температуры воздуха, необходимо защитить его от воздействия радиации; это достигается путем установки термометров в естественно вентилируемой будке либо – в радиационной защите, которая также служит средством крепления термометра. Защита также предохраняет термометр от осадков, обеспечивает свободную циркуляцию воздуха вокруг него и предотвращает случайные повреждения термометра. Попадание осадков на датчик может привести, в зависимости от потока воздуха в данном месте, к понижению температуры датчика, при этом он начинает вести себя как смоченный термометр. Однако обеспечение свободной циркуляции может быть затруднительным в условиях обледенения. Методы сокращения погрешностей наблюдений в таких условиях могут быть различными и включать использование экранов или приборов для измерения температуры специальной конструкции, включая использование искусственной вентиляции. Однако, при использовании искусственной вентиляции, необходимо принять меры, чтобы избежать непредсказуемых воздействий, вызванных осаждением влаги в сочетании с испарением по время выпадения осадков, мороси, тумана и других подобных явлений. В публикации Sparks (1970) приводится обзор методов измерения температуры, пригодных для оперативного применения.

Для получения репрезентативных результатов при сравнении показаний термометра в различных

местах и в разное время также крайне необходимо стандартное расположение будки и самого термометра. При проведении обычных метеорологических наблюдений измеряемая температура должна отражать условия ненарушенного потока воздуха на высоте между 1,2 и 2 м над уровнем земли на возможно большей площади, окружающей станцию. Высота над уровнем земли указывается потому, что в более низких, слоях атмосферы могут существовать значительные вертикальные градиенты температуры. Следовательно, наилучшее место для проведения измерений находится над уровнем земли. Оно должно быть открыто воздействию солнца и ветра и не заслоняться деревьями, зданиями и другими препятствиями. Места на крутом склоне или в низине подвержены воздействию нетипичных условий, и их следует избегать. В больших и малых городах местные особенности более ярко выражены, чем в сельских районах. Данные наблюдений за температурой на крышах зданий имеют сомнительную точность и ценность вследствие наличия переменного вертикальногро градиента температуры и влияния самого здания на распределение температуры.

2.1.4.2 Эталонные приборы для измерения температуры

Лабораторные эталонные приборы

Первичные эталонные термометры хранятся и обслуживаются в национальных метрологических лабораториях. Национальная метеорологическая или другая аккредитованная поверочная лаборатория должны иметь в качестве рабочего эталона высококачественный платиновый термометр сопротивления, соответствующий национальному эталону. Погрешность показаний этого термометра может периодически проверяться в камере тройной точки воды. Тройная точка воды, которая точно установлена, может воспроизводиться в камере тройной точки воды с погрешностью $1 \cdot 10^{-4}$ К.

Эталонные приборы, используемые в условиях эксплуатации

Эталонный психрометр ВМО (WMO, 1992) представляет собой эталонный измерительный прибор для определения взаимосвязи между температурой, измеренной с помощью обычного наземного измерительного прибора, и истинной температурой воздуха. Этот прибор, спроектированный для свободного размещения и использования без экрана или защиты, является наиболее точным из имеющихся приборов для оценки и сопоставления измерительных систем. Прибор не рассчитан на постоянное использование в регулярной метеорологической деятельности и обеспечивает измерение температуры с погрешностью ± 0,04 К (при уровне достоверности 95 %). Для получения более полной информации смотрите часть I главы 4

2.2 ЖИДКОСТНЫЕ СТЕКЛЯННЫЕ ТЕРМОМЕТРЫ

2.2.1 Общие положения

Для обычных наблюдений за температурой воздуха, включая максимальную и минимальную температуру, а также температуру смоченного термометра, все еще широко используются жидкостные стеклянные термометры. Принцип работы таких термометров основан на различном термическом расширении чистой жидкости и стеклянного резервуара. Капилляр представляет собой трубку, тонкий внутренний канал которой соединен с резервуаром термометра; резервуар полностью заполнен термометрической жидкостью, а капилляр – лишь частично при всех измеряемых температурах. С изменением объема жидкости в резервуаре меняется и высота столбика жидкости в капилляре. При градуировке такого термометра с использованием эталонного термометра шкала наносится либо непосредственно на капилляр, либо на отдельную пластинку, прочно прикрепленную к капилляру.

Использование той или иной жидкости определяется необходимым диапазоном измерения температуры; ртуть обычно применяется для измерения температур, превышающих ее точку замерзания (–38,3 °C), тогда как для измерения более низких температур используется этиловый спирт или другие чистые органические жидкости. Стекло должно быть обычным или боросиликатным, которые допускаются к применению в термометрах. Для того чтобы улучшить проводимость тепла от стеклянного резервуара термометра к его содержимому, стенки резервуара делают как можно тоньше. Более узкий внутренний канал капилляра обеспечивает и более быстрое перемещение жидкости в нем при заданном изменении температуры, но при этом уменьшается рабочий диапазон измерения температуры термометра при фиксированной длине капилляра. Перед градуировкой термометры необходимо подвергнуть термической обработке (обжигу), чтобы свести к минимуму медленно протекающие изменения, связанные со старением стекла.

Существуют четыре основных типа конструкции метеорологических термометров:

(a) термометр в защитной оболочке со шкалой, нанесенной на капилляре термометра;
(b) термометр в защитной оболочке со шкалой, нанесенной на пластинке из молочного стекла, прикрепленной к термометру внутри защиты;
(c) термометр без защитной оболочки со шкалой на капилляре и прикрепленный к металлической, фарфоровой или деревянной оправе обратной цифровой шкале стороной;
(d) термометр без защитной оболочки со шкалой, нанесенной на капилляре.

Капилляры некоторых термометров снабжены линзами для увеличения изображения столбика ртути.

Типы (a) и (b) имеют то преимущество перед типами (c) и (d), что их шкалы предохранены от стирания. У термометров типа (c) и (d) шкалы, вероятно, время от времени придется подкрашивать. Однако такие термометры легче сделать, чем термометры типов (a) и (b). Типы (a) и (d) имеют преимущество, заключающееся в том, что они менее подвержены погрешностям вследствие параллакса (см. раздел 2.2.4). В публикации HMSO (1980) приведен обзор термометров, предназначенных для использования в метеорологической деятельности.

В любом типе защита или оправа должна иметь малую теплоемкость, т. е. не должна быть чрезмерно громоздкой. В то же время она должна быть достаточно прочной, чтобы выдерживать нагрузки, испытываемые при эксплуатации и перевозках.

Для ртутных стеклянных термометров, особенно максимальных, важно, чтобы вакуум над столбиком ртути был близок к идеальному. Все термометры, за исключением термометров для измерения температуры почвы, должны градуироваться при полном погружении. Требования к термометрам, предназначенным для различных целей, рассматриваются в соответствующих разделах ниже.

2.2.1.1 Обычные (станционные) термометры

Эти термометры являются наиболее точными из всех, применяющихся в метеорологии. Как правило, это– ртутный стеклянный термометр. Деление его шкалы соответствует 0,2 К или 0,5 К, а шкала его длиннее, чем у других метеорологических термометров.

Обычный термометр размещается в метеорологической будке с тем, чтобы избежать погрешностей за счет радиации. Термометр устанавливается на подставке в вертикальном положении резервуаром вниз. Резервуар должен иметь форму цилиндра или луковицы.

Пара обычных термометров может использоваться в качестве психрометра, если один из них обернут тканью (смоченный термометр)[3].

2.2.1.2 Максимальные термометры

В качестве максимального термометра рекомендуется использовать ртутный стеклянный термометр, имеющий сужение внутреннего канала трубки между резервуаром и основанием шкалы. Это сужение не дает ртутному столбику смещаться вниз при понижении температуры. Термометр, однако, можно возвратить в исходное состояние – наблюдатель должен крепко держать его резервуаром вниз и стряхивать до тех пор, пока ртутный столбик не соединится. Максимальный термометр следует устанавливать под углом примерно два градуса к горизонтали, причем резервуар должен быть наклонен вниз для того, чтобы ртутный столбик проходил сужение не под действием силы тяжести. Желательно, чтобы в верхней части капилляра внутренний канал имел расширение для того, чтобы разделившийся на части ртутный столбик можно было легко соединить при стряхивании.

2.2.1.3 Минимальные термометры

Что касается минимальных термометров, то наиболее распространенным типом такого термометра является спиртовой термометр с темным стеклянным штифтом длиной около 2 см, погруженным в спирт. Так как некоторое количество воздуха остается в трубке спиртового термометра, в верхнем ее конце должно быть предусмотрено расширение достаточных размеров для того, чтобы прибор смог выдерживать температуру 50 °C без повреждений. Минимальные термометры должны устанавливаться таким же образом, как и максимальные термометры – в почти горизонтальном положении. В минимальных термометрах можно использовать различные жидкости, такие, как этиловый спирт, пентан и толуол. Важно, чтобы жидкость была как можно чище, так как присутствие некоторых примесей увеличивает тенденцию жидкости к полимеризации под воздействием света, что с течением времени приводит к изменению градуировки. Например, при использовании этилового спирта последний не должен содержать ацетона.

Минимальные термометры используются также для измерения минимальной температуры воздуха в травостое.

---

3 Подробное описание смоченных термометров приведено в части I, глава 4.

2.2.1.4 Почвенные термометры

Для измерения температуры почвы на глубинах до 20 см широко применяются ртутные термометры, капилляры которых изогнуты под прямым или другим углом ниже наименьшей отметки шкалы. Резервуар термометра погружается в землю на требуемую глубину таким образом, чтобы снятие показаний осуществлялось без изменения положения термометра.

Такие термометры градуируются при погружении до той глубины, на которой измеряется температура почвы. Так как остальная часть термометра находится под воздействием температуры воздуха, в конце капилляра должно быть предусмотрено расширение на случай увеличения объема ртути.

Для измерения температуры на глубинах, превышающих 20 см, рекомендуется использовать ртутные стеклянные термометры, заключенные в деревянные, стеклянные либо пластмассовые оправы; резервуары таких термометров должны быть покрыты воском или окрашены металлической краской. Термометры в оправе помещают в тонкостенные металлические либо пластмассовые трубки и погружают в землю на нужную глубину. В условиях холодного климата высота надземной части трубки должна быть выше наибольшей высоты снежного покрова.

Вертикальные металлические трубки не используются при измерении дневного колебания температуры почвы, особенно засушливой, так как расчеты ее тепловых свойств на основе этих измерений могут быть неправильными, потому что такие трубки будут служить в качестве проводников тепла с земной поверхности.

Большая постоянная времени, обусловленная повышенной теплоемкостью, позволяет при вынимании термометра из трубки, в которую он вставлен, сохранять показания во время снятия отсчетов

Если земля покрыта снегом, то рекомендуется возведение небольшого помоста, расположенного параллельно ряду термометров для того, чтобы наблюдатель мог приблизиться к термометрам, не нарушая снежного покрова. Этот помост должен быть спроектирован таким образом, чтобы настил можно было убирать в промежутках между наблюдениями, не нарушая снежного покрова.

2.2.2 Порядок проведения измерений

2.2.2.1 Снятие показаний обычных термометров

Для того чтобы избежать изменений температуры из-за присутствия наблюдателя, показания термометра следует снимать как можно быстрее. Так как мениск жидкости или штифт и шкала термометра не находятся в одной плоскости, следует быть внимательным во избежание ошибок вследствие параллакса. Это происходит, если глаз наблюдателя не находится на линии, перпендикулярной к капилляру термометра и проходящей через мениск или штифт термометра. Так как шкалы термометров обычно не имеют делений менее одной пятой градуса, снятие показаний с точностью до одной десятой градуса, что является важным для психрометрии, необходимо производить на глаз. Если имеются шкаловые поправки, то их нужно вводить в показания. Устанавливать и снимать показания максимальных и минимальных термометров следует, по крайней мере, два раза в день. Их показания надо постоянно сравнивать с показаниями обычных термометров для того, чтобы убедиться в отсутствии серьезных погрешностей.

2.2.2.2 Измерение минимальной температуры воздуха в травостое

Минимальная температура воздуха в травостое является самой низкой температурой, которой достигает за ночь термометр, установленный под открытым небом непосредственно над низкой травой. Температуру измеряют минимальным термометром такого типа, который описан в разделе 2.2.1.3. Термометр следует устанавливать на соответствующих подставках так, чтобы угол его наклона к горизонтали составлял примерно 2°, причем резервуар должен быть ниже капилляра термометра; термометр должен находиться на высоте 25 – 50 мм над землей и касаться травы. Если земля покрыта снегом, термометр следует устанавливать над поверхностью снега – как можно ближе к поверхности снега, но так, чтобы он не касался ее.

Обычно термометр устанавливают в последний час наблюдений перед заходом солнца, а показания снимают на следующее утро. В течение дня прибор хранится в будке или в помещении. Однако на станциях, где наблюдатель не работает в период захода солнца, приходится оставлять термометр под открытым небом на весь день. При значительной солнечной радиации это может привести к дистилляции спирта и сбору его в верхней части капилляра термометра. Этот эффект можно свести к минимуму, поместив черный металлический экран, обернутый хлопчатобумажным лоскутом, над резервуаром термометра; такой экран поглощает больше радиации и, следовательно, достигает более высокой температуры, чем сам термометр. Таким образом, небольшое количество пара будет конденсироваться в верхней части капилляра над столбиком спирта.

2.2.2.3 Измерение температуры почвы

Стандартными глубинами, на которых измеряется температура почвы, являются 5, 10, 20, 50 и 100 см. Кроме перечисленных, можно устанавливать термометры и на других глубинах. Местом для проведения таких измерений должен быть ровный участок оголенной земли (размером примерно 75 см^2), являющийся типичным для почвы, по которой необходима информация. Если поверхность не является типичной для данной местности, то размеры площадки должны быть не менее 100 м^2. Если земля покрыта снегом, желательно производить также измерения температуры снежного покрова. Там, где снег неплотный, его можно удалить перед снятием показаний, а затем вернуть на место.

При описании места для измерения температуры почвы следует указать тип почвы, почвенный покров, а также степень и направление уклона поверхности земли. По мере возможности, необходимо указывать физические постоянные почвы, такие, как объемная плотность, удельная теплопроводность и полевая влагоемкость. Следует также указывать уровень грунтовых вод (при залегании в пределах 5 м от поверхности) и структуру почвы.

На агрометеорологических станциях желательна непрерывная запись температуры почвы, а также температуры воздуха на различных уровнях приземного слоя (от уровня земли до примерно 10 м над верхней границей преобладающей растительности).

2.2.3 Размещение и установка термометров

Как обычные, так и максимальные и минимальные термометры всегда помещают в психрометрическую будку, установленную на опоре. Экстремальные термометры устанавливают на соответствующих подставках так, чтобы угол их наклона к горизонтали составлял примерно 2°, причем резервуары должны быть ниже капилляра термометра.

Выбор места и установка минимальных термометров для измерения температуры воздуха в травостое описаны в разделе 2.2.2.2. На станциях с устойчивым снежным покровом различной высоты, можно использовать подставки, позволяющие поднимать или опускать термометры с целью установки их на правильной высоте над поверхностью снега.

2.2.4 Источники погрешностей жидкостных стеклянных термометров

К числу основных источников погрешностей, характерных для всех жидкостных стеклянных термометров, относятся следующие:

(a) погрешности упругости;
(b) погрешности, вызываемые капиллярной трубкой термометра;
(c) погрешности параллакса и грубые ошибки при снятии показаний;
(d) изменения объема резервуара термометра под воздействием внешнего или внутреннего давления;
(e) капиллярность;
(f) ошибки в делении и градуировке шкалы;
(g) различное расширение жидкости и стекла в рассматриваемом диапазоне.

Три последние погрешности могут быть сведены к минимуму изготовителем и включены в поправки, вводимые к наблюдаемым величинам. Определенного внимания требуют первые три погрешности. Погрешность (d) обычно не имеет места при использовании термометров в метеорологических целях.

2.2.4.1 Погрешности упругости

Существует два вида погрешностей упругости: обратимые и необратимые. Первые имеют значение лишь при воздействии на термометр температур широкого диапазона в течение короткого промежутка времени. Таким образом, если термометр поверяется при температуре кипения воды, а через короткий промежуток времени при температуре замерзания воды, то его показания будут сначала несколько ниже правильной отметки, а затем температура медленно поднимется до нее. Эта погрешность зависит от качества используемого в термометре стекла и может достигать 1 К, но при использовании высококачественного стекла она должна составлять лишь 0,03 К, при этом она может пропорционально уменьшаться при меньших диапазонах температур. Это явление не имеет значения для метеорологических измерений, за исключением возможной ошибки при начальной градуировке.

Необратимые изменения могут иметь большее значение. Резервуар термометра имеет тенденцию со временем уменьшаться в объеме, что приводит к повышению нулевой отметки. Наибольшие изменения происходят в течение первого года, после чего темпы изменений постепенно понижаются. Степень этих изменений можно сократить посредством тепловой обработки резервуара термометра и использования более подходящего стекла. Но даже при использовании высококачественного стекла это изменение может первоначально составлять порядка 0,01 К в год. Для обеспечения точных показаний, особенно при работе с инспекторскими или контрольными термометрами, следует периодически проверять нулевую отметку и производить необходимые корректировки.

2.2.4.2 Погрешности, вызываемые капиллярной трубкой термометра

Термометр, используемый для измерения температуры воздуха, обычно полностью находится в воздушной среде приблизительно одинаковой температуры, а его градуировка производится при погружении термометра полностью или до верхней отметки ртутного столбика (т. е. градуировка при полном или частичном погружении). Если такой термометр используется для определения температуры среды, не требующей полного погружения термометра, то действительная температура трубки отличается от температуры резервуара, что приводит к погрешности.

При применении в метеорологических целях вероятнее всего это может произойти при проверке градуировки обычного термометра в сосуде с жидкостью, температура которой значительно отличается от температуры окружающей среды, и при погружении только резервуара или нижней части капиллярной трубки.

2.2.4.3 Ошибки параллакса и грубые ошибки при снятии показаний

Если при снятии показаний термометра смотреть на него в плоскости, которая не перпендикулярна к капиллярной трубке термометра, то возникает ошибка параллакса. Эта ошибка находится в прямой зависимости от толщины капиллярной трубки термометра и величины угла между фактической и правильной линиями визирования. Ошибки можно избежать лишь при очень тщательном снятии показаний. При работе с вертикально расположенными в метеорологической будке стеклянными ртутными термометрами глаз наблюдателя должен находиться на горизонтальной линии, проходящей через верхнюю точку ртутного столбика.

Ошибки при снятии показаний, кроме того, могут быть обусловлены присутствием наблюдателей, в какой-то мере нарушающих состояние окружающей среды. Поэтому необходимо, чтобы наблюдатели за максимально короткое время сняли показания с точностью до десятых долей градуса. Грубые ошибки при снятии показаний составляют обычно 1, 5 или 10°. Таких ошибок можно избежать, если наблюдатели перепроверяют десятые доли градуса и целые значения после снятия показаний.

2.2.4.4 Погрешности, обусловленные различным расширением

Коэффициент объемного расширения ртути равен $1{,}82 \cdot 10^{-4}$ $К^{-1}$, а для большей части стекол он колеблется от $1{,}0 \cdot 10^{-5}$ до $3{,}0 \cdot 10^{-5}$ $К^{-1}$. Коэффициент расширения стекла, таким образом, является значимым компонентом и не может не приниматься в расчет. Поскольку ни коэффициент объемного расширения ртути и стекла, ни площадь поперечного сечения отверстия капиллярной трубки не являются абсолютно неизменными в пределах используемых диапазона температур и длины капиллярной трубки, цена деления шкалы капиллярной трубки варьирует в зависимости от того или иного участка капиллярной трубки, поэтому изготовитель должен градуировать термометр по эталонному термометру до начала его использования.

2.2.4.5 Погрешности спиртовых термометров

Коэффициент расширения жидкостей, используемых в спиртовых термометрах, значительно выше, чем коэффициент расширения ртути, а точка их замерзания значительно ниже (этиловый спирт замерзает при 115 °C). Спирт используется в минимальных термометрах потому, что он бесцветен и имеет более высокий коэффициент расширения, что позволяет использовать капиллярную трубку с большим отверстием. Спиртовые термометры менее точные, чем ртутные термометры той же стоимости и качества. Кроме общих недостатков, присущих всем жидкостным стеклянным термометрам, спиртовые термометры имеют свои, присущие только им недостатки:

(a) адгезия спирта на стекле: в отличие от ртути, органические жидкости обычно смачивают стекло. Следовательно, в случае резкого падения температуры определенное количество жидкости может остаться на стенках капилляра, вызывая этим понижение показаний термометра. Если термометр подвешен вертикально, то постепенно жидкость стекает в нижнюю часть капилляра;

(b) разрыв столбика жидкости: в верхней части капиллярной трубки термометра в результате испарения и конденсации часто образуются капельки жидкости. Они могут соединиться с основным столбиком, однако в период от начала этого процесса и до момента его обнаружения могут возникнуть ошибки. Разрыв столбика часто происходит также при транспортировке. Эту ошибку сокращают в процессе производства за счет запаивания термометра при самых низких значениях температуры, когда в капилляре содержится максимальное количество воздуха;

(c) медленно протекающие изменения в жидкости: органические жидкости обычно имеют тенденцию к полимеризации с течением времени и под воздействием света, что приводит к постепенному сокращению объема жидкости.

Присутствие примесей ускоряет этот процесс; в частности, наличие ацетона в этиловом спирте имеет весьма пагубные последствия. В этой связи подготовка жидкости для термометров требует особой тщательности. Кроме того, использование красителей для подкрашивания жидкости с целью улучшения ее зрительного восприятия повышает возможность возникновения этого явления.

Вопросы сокращения ошибок, связанных с разрывом столбика жидкости, а также ухода за спиртовыми термометрами, рассматриваются в этой главе ниже.

2.2.5 Сравнение и калибровка в лабораторных условиях и в условиях эксплуатации

2.2.5.1 Калибровка в лабораторных условиях

Калибровку термометров в лабораторных условиях должны проводить национальные метрологические службы или аккредитованные поверочные лаборатории. Для жидкостных стеклянных термометров следует использовать контейнер, наполненный жидкостью, в котором можно поддерживать любую желаемую температуру в необходимых пределах. Скорость изменения температуры внутри жидкости не должна превышать рекомендуемые пределы, а калибровочные приборы должны быть снабжены средствами для перемешивания жидкости. Эталонные и испытываемые термометры, подвешенные в контейнере, не должны касаться его стенок.

Необходимо провести достаточное количество измерений, с тем, чтобы быть уверенным, что необходимые корректировки соответствуют характеристикам термометра в нормальных условиях, когда ошибки, обусловленные интерполяцией, в любой промежуточной точке не превышают несистематические погрешности (см. часть III главы 4).

2.2.5.2 Проверка и калибровка в условиях эксплуатации

Во всех жидкостных стеклянных термометрах происходит постепенное изменение нулевой отметки. По этой причине желательно проверять их через регулярные интервалы времени – обычно один раз в два года. До начала процесса проверки их следует оставить в вертикальном положении при комнатной температуре не менее чем на 24 часа.

Температуру замерзания можно проверить, наполнив почти доверху сосуд Дьюара измельченным льдом из дистиллированной воды и доливая дистиллированную воду. В пространстве между кусочками льда и между льдом и дном сосуда не должно быть воздуха. Уровень воды должен быть на 2 см ниже поверхности льда. Для определения точки замерзания большинства термометров можно использовать обычный термос. Термометры следует размещать таким образом, чтобы возможно меньшая часть столбика ртути или спирта возвышалась надо льдом. Перед снятием показаний термометра следует сделать по меньшей мере 15-минутную паузу для того, чтобы дать возможность термометру принять температуру тающего льда. Каждый термометр следует двигать взад и вперед в этой смеси и немедленно снимать показания с точностью до десятой доли деления шкалы. Последующие показания следует снимать через 5-минутные интервалы времени, а затем рассчитать их среднее значение.

Остальные точки в диапазоне температур можно определить по переносному эталону или инспекторскому термометру. Следует сделать сравнение эталонного термометра и одного или нескольких испытываемых термометров посредством погружения их в глубокий сосуд с водой. Как правило, лучше работать в помещении, особенно в солнечную погоду, а наилучшие результаты получаются в том случае, если температура воды соответствует температуре окружающей среды или близка к ней.

Каждый термометр сравнивают с эталонным, а термометры одного типа можно сравнивать друг с другом. При каждом сравнении термометры следует размещать так, чтобы их резервуары были по возможности ближе друг к другу, двигать их в воде взад и вперед в течение 1 минуты, а затем снимать показания. Термометры следует располагать таким образом, чтобы можно было снимать показания, не изменяя глубины погружения, при этом резервуары термометров должны быть погружены в воду как можно глубже. Большинство метеорологических термометров калибруются при полном погружении, однако корректировка за счет неполного погружения капиллярной трубки должна быть незначительной при условии, что разность температур воды и воздуха составляет не более 5 К. Часто при расположении резервуаров термометров на одинаковой глубине верхние отметки столбиков ртути (или другой жидкости) в эталонном и проверяемом термометрах находятся довольно далеко друг от друга. В таких случаях следует проявить особую тщательность во избежание ошибок параллакса.

Сравнения следует сделать по меньшей мере три раза для каждой пары термометров. Для каждой серии сравнений среднее значение разности между показаниями термометров не должно превышать допуски, описанные в таблице раздела 2.1.3.2.

Почвенные термометры можно проверять таким же способом, но их следует оставлять в воде не менее 30 минут с тем, чтобы покрытые воском резервуары термометров приняли температуру воды. Большая постоянная времени почвенного термометра затрудняет проведение качественной проверки, если невозможно поддерживать постоянную температуру воды. Если проверка проводится тщательно в воде, температура которой изменяется не более чем на 1 К в течение 30 минут, то разность между поверяемым термометром и скорректированным показанием эталонного термометра не должна превышать 0,25 К.

2.2.6 Поправки

При изготовлении термометры, идентифицируемые по серийному номеру, должны быть снабжены либо сертификатом с указанием даты изготовления, подтверждающим соответствие требованиям к погрешности измерений, или сертификатом поверки с указанием даты и поправок, которые следует применять к показаниям для получения требуемой точности.

Если погрешности в выбранных точках в диапазоне показаний термометров (например, 0, 10, 20 °C) не превышают ± 0,05 К, то нет необходимости в поправках и термометры могут использоваться в качестве станционных термометров, устанавливаемых в естественно вентилируемых будках, а также в качестве максимальных, минимальных, почвенных термометров и термометров для измерения минимальной температуры в травостое. Если погрешности в выбранных точках составляют более 0,05 К, наблюдатель должен быть снабжен таблицей поправок к показаниям, а также четкими инструкциями о том, как эти поправки применять.

Сертификатами должны быть снабжены следующие термометры:

(a) используемые в вентилируемых психрометрах;
(b) используемые инспекторами в качестве переносных эталонов сравнения;
(c) используемые в качестве эталонных термометров для калибровки в лабораторных условиях;
(d) используемые для специальных целей, для которых применение поправок обосновано.

Для психрометрических целей следует выбирать идентичные термометры.

2.2.7 Обслуживание

2.2.7.1 Разрыв столбика жидкости

Наиболее часто встречающимся недостатком является разрыв столбика жидкости, особенно во время транспортировки. Это чаще случается со спиртовыми (минимальными) термометрами. Другими проблемами, характерными для этих термометров, являются адгезия спирта на стекле и образование капелек спирта за счет дистилляции в капилляре.

Разрыв столбика жидкости обычно можно ликвидировать, держа термометр резервуаром вниз и слегка постукивая им о пальцы руки или какой-либо предмет, эластичный и не слишком твердый. Постукивание необходимо продолжать в течение некоторого времени (в течение 5 минут, если это необходимо), а затем подвесить термометр, либо поставить его вертикально в подходящий контейнер резервуаром вниз по крайней мере на час, для того чтобы дать возможность спирту, прилипшему к стенке стекла, стечь вниз к основному столбику. Если подобный метод не приносит успеха, то более эффективным методом является охлаждение резервуара в холодной смеси льда и соли при сохранении верхней части капилляра в тепле. Тогда жидкость будет медленно возвращаться к основной части столбика. Кроме того, резервуар термометра можно поместить в сосуд с теплой водой и, держа термометр вертикально, одновременно постукивать или стряхивать воду с капилляра до тех пор, пока верхняя часть столбика спирта не достигнет расширенной верхней части капилляра. Этим методом следует пользоваться с особой осторожностью, так как существует риск растрескивания термометра, если спирт попадает в расширение капилляра.

2.2.7.2 Нечеткость шкалы

Другим недостатком жидкостных стеклянных термометров, не снабженных футлярами, является то, что со временем шкала становится нечеткой. Это можно исправить на станции, потерев шкалу темным литографическим либо черным графитовым карандашом.

2.2.8 Безопасность

Ртуть, которая обычно используется в жидкостных стеклянных термометрах, является ядовитой и может вызвать отравление при проглатывании или вдыхании ее паров. Если термометр разбит, а капельки ртути не удалены, то существует опасность для здоровья, особенно в закрытых помещениях. – (рекомендация по удалению ртути после поломки термометра дана в главе 3 части I в разделе 3.2 по ртутным барометрам.) Существуют также ограничения при транспортировке ртутных термометров самолетом или особые меры предосторожности, которые следует предпринять для предотвращения утечки ртути в случае поломки термометра. За консультацией следует

обратиться в администрацию соответствующей инстанции или транспортного средства.

2.3 МЕХАНИЧЕСКИЕ ТЕРМОГРАФЫ

2.3.1 Общие положения

Биметаллические термографы и термографы с трубкой Бурдона являются приборами, которые все еще широко применяются вследствие их относительной дешевизны, надежности и портативности. Однако их нелегко приспособить для дистанционной или электронной регистрации. В состав таких термографов входит вращающийся ленточный механизм, обычный для группы классических самописцев. В целом термографы должны работать в диапазоне примерно 60 К или даже 80 К, если они используются в условиях континентального климата. Требуется такая цена деления шкалы, чтобы можно было без труда производить считывание температуры с погрешностью не более 0,2 К на ленте среднего размера. Для выполнения этого требования следует предусмотреть возможность переустановки нулевой отметки прибора в зависимости от сезона. Максимальная погрешность термографа не должна превышать 1 К.

2.3.1.1 Биметаллический термограф

В биметаллическом термографе движение записывающего пера регулируется за счет изменения кривизны биметаллической пластинки или пружины, один конец которой жестко скреплен с кронштейном, укрепленным на корпусе. Должно быть предусмотрено регулировочное устройство для того, чтобы при необходимости можно было менять нулевую отметку прибора. Кроме того, в приборе должно быть предусмотрено изменение цены деления шкалы за счет регулировки длины рычага, передающего движение биметаллической пластинки перу; регулировку должен производить персонал, имеющий на это разрешение. Биметаллический элемент нужно соответствующим образом предохранить от коррозии; это лучше всего сделать за счет покрытия из меди, никеля либо хрома, хотя для некоторых типов климата достаточным, вероятно, является покрытие лаком. Прибор имеет постоянную времени около 25 с при скорости ветра 5 м/с.

2.3.1.2 Термограф с трубкой Бурдона

По своему устройству прибор в целом похож на прибор биметаллического типа, но температурный датчик имеет форму изогнутой металлической трубки плоского эллиптического сечения, наполненной спиртом. Трубка Бурдона менее чувствительна, чем биметаллический элемент, и обычно требует наличия рычажного механизма усиления для того, чтобы получить необходимую цену деления шкалы. Прибор имеет типичную постоянную времени, равную примерно 60 с при скорости ветра 5 м/с.

2.3.2 Порядок проведения измерений

Для улучшения разрешающей способности термографы в различное время года часто настраиваются на один или два разных диапазона с применением соответствующих лент. Точная дата перехода с одного комплекта лент на другой будет изменяться в зависимости от условий местонахождения. Однако при осуществлении этого перехода прибор требуется отрегулировать. Регулировка должна производиться либо в метеорологической будке в облачный ветреный день при практически постоянной температуре, либо в помещении с постоянной температурой. Регулировка производится посредством отпускания винта, с помощью которого рычаг пера крепится к его стержню, и установления рычага пера в правильное положение с последующим затягиванием винта. Прибор оставляют до повторной проверки и дальнейших регулировок, которые могут потребоваться.

2.3.3 Размещение и установка

Эти приборы должны устанавливаться в больших психрометрических будках.

2.3.4 Источники погрешностей

Трение является основным источником погрешностей механизма термографа. Одной из причин трения является плохая центровка спирали по отношению к стержню. Если не установить спираль точно, то она действует как мощная пружина, а при жестком закреплении она прижимает основной стержень к одной стороне подшипников. В современных приборах это не должно вызывать серьезных проблем. Трение между пером и лентой можно свести к минимуму посредством соответствующей регулировки подвески рабочего механизма.

2.3.5 Сравнение и калибровка

2.3.5.1 Калибровка в лабораторных условиях

Существует два основных метода лабораторной калибровки биметаллических термографов. Их можно проверять, установив неподвижно в соответствующее положение и поместив биметаллический

элемент в водяную ванну. Можно также поместить термограф в поверочную камеру промышленного типа, снабженную механизмом контроля температуры воздуха, вентилятором и эталонным термометром.

Сравнения следует сделать при двух значениях температуры и, исходя из этого, можно выявить изменения нулевой отметки на ленте. Регулировка шкалы должна проводиться персоналом, имеющим на это разрешение, и только с учетом положений инструкции изготовителя прибора.

2.3.5.2 Сравнение в условиях эксплуатации

Постоянная времени прибора может быть равна лишь половине постоянной времени обычного ртутного термометра, поэтому показания сухого термометра и термографа в определенное время не будут совпадать, даже если прибор работает прекрасно. Лучше всего произвести проверку показаний прибора в тот день и в то время, когда температура почти постоянна (обычно облачный, ветреный день); можно также сравнить минимальные показания записей термографа с показаниями минимального термометра, установленного в той же будке. Затем можно произвести любую необходимую регулировку посредством установочного винта.

2.3.6 Поправки

Термографы обычно не снабжаются сертификатом поправок. Если в результате проверок на станции выявляются погрешности, превышающие допустимые, и они не могут быть устранены на месте, прибор должен быть возвращен в соответствующую поверочную лабораторию для ремонта и повторной поверки.

2.3.7 Обслуживание

Текущее обслуживание включает в себя проверку внешнего состояния, свободного хода подшипников, угла наклона записывающего рычага, установки пера и угла между рычагами усиления и записи, а также проверку настройки часового механизма, вращающего барабан с лентой. Такие проверки должны проводиться в соответствии с рекомендациями изготовителя. Со спиралью следует обращаться осторожно во избежание механического повреждения и содержать ее в чистоте. Подшипники оси должны содержаться в чистоте, умеренно смазываться часовым маслом через определенные промежутки времени. Прибор очень простой в механическом отношении, и, поскольку предусмотренные предосторожности направлены на сведение к минимуму трения и на предохранение от коррозии, он должен хорошо работать.

2.4 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ

2.4.1 Общие положения

Электрические приборы приобретают все большую популярность в метеорологии при измерении температуры. Основное их достоинство заключается в том, что выходной сигнал можно использовать в дистанционной индикации, записи, хранении и передаче данных температуры. Наиболее часто используемыми чувствительными элементами являются электрические элементы сопротивления, полупроводниковые термометры (термисторы) и термопары.

2.4.1.1 Электрические термометры сопротивления

Температуру вещества можно определить путем измерения его электрического сопротивления, если известен закон зависимости этого сопротивления от температуры.

При небольших изменениях температуры увеличение сопротивления чистых металлов пропорционально изменению температуры и описывается уравнением 2.2:

$$R_T = R_0 \left[1 + \alpha \left(T - T_0\right)\right] \qquad (2.2)$$

где $(T - T_0)$ мало; R_T — сопротивление определенного количества металла при температуре T; R_0 — его сопротивление при исходной температуре; α — температурный коэффициент сопротивления при температуре T_0.

При исходной температуре 0°C уравнение (2.2) принимает вид:

$$R_T = R_0 \left(1 + \alpha \cdot t\right) \qquad (2.3)$$

При более значительных изменениях температуры и для некоторых металлических сплавов уравнение (2.4) выражает взаимосвязь более точно:

$$R_T = R_0 \left[1 + \alpha \left(T - T_0\right) + \beta \left(T - T_0\right)^2\right] \qquad (2.4)$$

При исходной температуре 0°C уравнение (2.4) принимает вид:

$$R_T = R_0 \left(1 + \alpha \cdot t + \beta \cdot t^2\right) \qquad (2.5)$$

Эти уравнения дают пропорциональное изменение сопротивления реального термометра таким образом, что значения коэффициентов α и β можно найти с помощью градуировки соответствующего термометра. На основе этих результатов можно вывести

обратную функцию, а именно: t как функция R. Такую функцию можно выразить в виде линейного ряда $(R_0 - R_T)$, а именно: $t = t\,(R_0 - R_T) = c_1\,(R_0 - R_T) + c_2\,(R_0 - R_T)^2 + \ldots$.

Хороший металлический термометр сопротивления должен удовлетворять следующим требованиям:

(a) физические и химические свойства должны оставаться неизменными во всем диапазоне температурных измерений;

(b) сопротивление должно постоянно и непрерывно увеличиваться при возрастании температуры во всем диапазоне измерений;

(c) внешние факторы, такие, как влажность, коррозия и физическая деформация, не должны заметно менять его сопротивление;

(d) характеристики должны оставаться постоянными на протяжении двух лет и более;

(e) сопротивление и температурный коэффициент должны быть достаточно большими, чтобы их можно было использовать в измерительной цепи.

Наилучшим образом вышеупомянутым требованиям отвечает чистая платина. Поэтому ее используют прежде всего в основных эталонных термометрах, необходимых для доведения МТШ-90 до мест установки приборов. Платиновые термометры также используются для вторичных эталонов и рабочих датчиков.

Термометры, применяемые на практике, подвергают искусственному старению перед использованием в метеорологических целях; их обычно делают из платиновых сплавов, никеля и иногда вольфрама. Обычно они герметически запаяны стеклом или керамикой. Их постоянная времени меньше, чем постоянная времени жидкостных стеклянных термометров.

2.4.1.2 Полупроводниковые термометры

Другим типом термометра сопротивления, который имеет широкое использование, является термистор. Он представляет собой полупроводник с относительно большим температурным коэффициентом сопротивления, который в зависимости от используемого материала может быть либо положительным, либо отрицательным. На практике для производства термисторов применяют материалы из смеси порошкообразных окисей металлов, которые выпускаются обычно в виде небольших дисков, брусков или шариков, часто имеющих стеклянное покрытие. Общее выражение зависимости сопротивления R термистора от температуры дает уравнение 2.6:

$$R = a \exp\,(b/T) \qquad (2.6)$$

где a и b – константы, а T – температура термистора в Кельвинах.

С термометрической точки зрения преимущества термисторов заключаются в следующем:

(a) значительный температурный коэффициент сопротивления позволяет уменьшить напряжение, приложенное к мосту для измерения сопротивления, при достижении той же самой чувствительности; таким образом, уменьшается или даже устраняется необходимость принимать во внимание сопротивление контактов и его изменения;

(b) элементы можно сделать очень маленькими, что при их очень низкой теплоемкости дает небольшую постоянную времени. Однако у очень маленьких термисторов, обладающих низкой теплоемкостью, эффект самонагревания при заданной энергии диссипации выше, чем у больших термометров. Таким образом, необходимо принимать меры для того, чтобы поддерживать энергию диссипации на низком уровне.

Типовой термистор имеет сопротивление, которое изменяется на 100 или 200 единиц в температурном диапазоне от -40 до 40 °C.

2.4.1.3 Термопары

В 1821 г. Сибек установил, что в месте соединения двух разных металлов возникает незначительная контактная разность потенциалов. При составлении простой цепи на основе двух металлов и соединении их при одинаковой температуре электродвижущая сила в этой цепи не возникнет, потому что обе электродвижущие силы (одна в каждом спае) будут оказывать противодействие, нейтрализуя друг друга. При изменении температуры одного из спаев электродвижущие силы не будут уравновешивать друг друга и в цепи возникнет результирующая электродвижущая сила и электрический ток. При нескольких спаях результирующая электродвижущая сила будет равна алгебраической сумме отдельных электродвижущих сил. Величина и знак полярности контактной электродвижущей силы, возникающей в любом спае, зависят от типов соединяемых металлов и температуры в месте спая и могут быть эмпирически выражены для любых двух металлов следующей формулой:

$$(E_T - E_s) = \alpha\,(T - T_s) + \beta\,(T - T_s)^2 \qquad (2.7)$$

где E_T – контактная электродвижущая сила при температуре T, E_s – электродвижущая сила при

некоторой стандартной температуре T_s, α и β – константы. Если имеется два спая при температуре T_1 и T_2, результирующая электродвижущая сила E_n (термоэлектродвижущая сила) будет ($E_1 - E_2$), где E_1 – электродвижущая сила при температуре T_1 и E_2 – контактная электродвижущая сила при температуре T_2. En с хорошим приближением может быть представлена формулой, приведенной для ($E_T - E_s$):

$$E_n = E_1 - E_2 \qquad (2.8)$$

$$E_n = a\,(T_1 - T_2) + b\,(T_1 - T_2)^2 \qquad (2.9)$$

где a и b – константы двух используемых металлов. Для большинства метеорологических применений часто можно не принимать во внимание величину b, так как она всегда мала по сравнению с a.

Термопары получают путем сварки или спайки проволочек из используемых металлов. Эти спаи могут быть очень маленькими, с незначительной теплоемкостью.

Если термопара используется для измерения температуры, то измеряется электродвижущая сила, возникающая, когда один спай поддерживается при известной стандартной температуре, а другой может принимать любую температуру. При предварительной калибровке системы может быть установлена зависимость электродвижущей силы непосредственно от разности температур двух спаев, и, следовательно, неизвестная температура будет равна алгебраической сумме этой разности и известной стандартной температуры.

В метеорологии термопары в основном применяются в тех случаях, когда требуется термометр, имеющий чрезвычайно малую постоянную времени, порядка 1 или 2 с; они пригодны для проведения дистанционных измерений и регистрации и обычно используются для решения специальных исследовательских задач. При измерении абсолютного значения температуры с помощью термопары возникают трудности, связанные с необходимостью устройства для поддержания температуры холодного спая и подбора измерителя электродвижущей силы; термопары лучше всего подходят для измерения перепада температуры, так как в этом случае таких затруднений не возникает. При наличии достаточно чувствительного прибора можно достичь весьма высокой точности, но для этого необходимо проведение частых градуировок. Для метеорологических измерений подходят комбинации медь – константан или железо – константан, так как в этом случае электродвижущая сила, приходящаяся на градус Цельсия, больше, чем у более редких и более дорогих металлов, которые обычно используют при измерении высоких температур.

2.4.2 Порядок проведения измерений

2.4.2.1 Электрические термометры сопротивления и термисторы

Термометры сопротивления и термисторы можно включать в ряд электрических измерительных цепей, многие из которых представляют собой мостовые схемы для измерения сопротивления в равновесном или неравновесном виде. В равновесном мосте подгонка прецизионного потенциометра производится до тех пор, пока индикатор не покажет отсутствие тока, причем положение стрелки потенциометра связано с температурой. В неравновесном мосте ток можно измерить с помощью гальванометра; однако в этом случае ток будет зависеть не только от температуры, на него будут частично воздействовать и другие факторы. Альтернатива, помогающая избежать данной ситуации, заключается в использовании источника тока постоянной величины для питания моста и в измерении напряжения для определения температуры.

В случае дистанционного измерения следует принять во внимание, что провода между термометром сопротивления и мостом также представляют собой сопротивление, которое изменяется в зависимости от температуры. Следует предпринять необходимые меры предосторожности во избежание таких ошибок.

Цифровые вольтметры можно использовать вместе с источником постоянного тока для измерения перепада напряжения на выходе термоэлемента, зависящего от перепада температуры; результат можно представить непосредственно в виде температурных данных. К тому же результат в цифровой форме можно хранить или передавать без потери точности и, таким образом, сделать его доступным для дальнейшего использования. При желании цифровой код вольтметров можно впоследствии преобразовать в аналоговое напряжение, например при использовании самописца.

2.4.2.2 Термопары

Существует два основных способа измерения величины электродвижущей силы, возникающей в термопарах:

(a) измерение величины тока, возникающего в цепи, с помощью чувствительного гальванометра;

(b) уравновешивание термоэлектрической электродвижущей силы известной электродвижущей силой, при котором практически отсутствует электрический ток в измерительной цепи.

При способе (a) гальванометр соединяется напрямую последовательно с двумя спаями. Способ (b) обычно используется, если требуется точность измерения более 0,5 %. Эта процедура не зависит от величины или изменения сопротивления линии, так как в уравновешенном состоянии в цепи нет тока.

2.4.3 Размещение и установка

Требования к размещению и установке электрических термометров в основном такие же, как и жидкостных стеклянных термометров (см. раздел 2.2.3). – Исключения заключаются в следующем:

(a) измерение экстремальных температур. Если электрический термометр соединить с непрерывно действующей системой записи данных, то максимальные и минимальные термометры больше не потребуются;

(b) измерение приземных температур. По своим радиационным свойствам электрические термометры отличаются от жидкостных стеклянных термометров. Электрические термометры, установленные для измерения минимальной температуры воздуха в травостое (или на другой поверхности), будут записывать значения температур, отличные от показаний установленных таким же образом обычных термометров. Эти различия можно свести к минимуму посредством установки электрического термометра в стеклянной защитной оправе;

(c) измерение температуры почвы. Жидкостные стеклянные термометры в вертикальных металлических трубках не подходят для, измерения дневного колебания температуры почвы, в связи с тем, что трубки служат в качестве проводников тепла с земной поверхности. Более репрезентативные показания можно получить, поместив электрические термометры в латунные оправы и погрузив их на необходимую глубину в ненарушенный вертикальный слой почвы, полученный в результате проходки открытым способом. Электрические соединения помещают в пластиковые трубки, проходящие в шурфе, который затем заполняют таким образом, чтобы по возможности восстановить первоначальный слой почвы и ее дренажные характеристики.

2.4.4 Источники погрешностей

2.4.4.1 Электрические термометры сопротивления и термисторы

Основными источниками погрешностей при измерении температуры электрическими термометрами сопротивления являются:

(a) самонагревание элемента термометра;

(b) неадекватная компенсация сопротивления выводов;

(c) неадекватная компенсация нелинейности датчика или обрабатывающего прибора;

(d) резкие изменения контактного сопротивления при переключении.

Самонагревание происходит вследствие того, что при прохождении тока через элемент сопротивления он нагревается и, следовательно, температура элемента термометра становится выше, чем температура окружающей среды.

Сопротивление соединительных проводов вносит погрешность в показания термометра. Эта погрешность становится более значительной при длинных проводах, например, когда термометры сопротивления расположены на некотором расстоянии от измерительного прибора; различные погрешности возникают также при изменении температуры кабеля. Эти ошибки можно компенсировать за счет использования дополнительных проводников, балластных резисторов и соответствующей мостовой схемы.

Ни электрический термометр сопротивления, ни термистор не отвечают требованиям линейности во всем диапазоне измеряемых температур, но если ограничить диапазон, они могут приблизиться к требуемой линейности. Следовательно, необходимо обеспечить компенсацию таких нелинейностей. Вероятнее всего, это необходимо для термисторов в целях достижения приемлемого диапазона метеорологических измерений.

По мере старения переключателей могут возникнуть резкие изменения контактного сопротивления при переключении. Изменения могут варьировать и могут остаться незамеченными, если не проводить регулярные поверки системы (см. раздел 2.4.5).

2.4.4.2 Термопары

Основными источниками погрешностей при измерении температуры с использованием термопар являются:

(a) изменения сопротивлений соединительных проводов с изменением температуры. Этот эффект можно свести к минимуму, если использовать очень короткие, компактные и надежно изолированные провода;

(b) проводимость вдоль проводов от спая при наличии градиента температуры в пространстве вокруг точки измерения температуры;

(c) случайные вторичные термоэлектродвижущие силы, возникающие в результате исполь-

зования в соединительной цепи металлов, отличных от металлов термопары. Следовательно, необходимо по возможности сводить к минимуму разность температур термопары и остальной части; это особенно важно в случае небольших значений электродвижущих сил, которые нужно измерять (для достижения этого необходимо проведение периодических поверок);

(d) наличие тока утечки из соседних электрических цепей. Это влияние можно свести к минимуму с помощью соответствующего экранирования проводов;

(e) возникновение гальванических токов в результате смачивания выводов или спаев;

(f) изменение температуры гальванометра, меняющее его характеристики (в основном меняется его сопротивление). Это ни в коей мере не влияет на снятие показаний с помощью потенциометра, но оказывает влияние на измерительные приборы с непосредственным отсчетом показаний. Этот эффект можно свести к минимуму, поддерживая температуру гальванометра как можно более близкой к той, при которой производилась поверка цепи;

(g) изменения электродвижущей силы стандартного элемента, по которому регулируется потенциометрический ток, при проведении потенциометрических измерений, а также изменения потенциометрического тока между регулировками вызывают соответствующие ошибки в значениях измеренной электродвижущей силы. Обычно эти ошибки незначительны, если стандартный элемент используется правильно, и ток потенциометра регулируется непосредственно перед измерением температуры.

Погрешности, описанные в пунктах (a) и (f), указывают на то, что предпочтительнее использовать потенциометрический метод в тех случаях, когда требуется очень высокая точность измерений.

2.4.5 Сравнение и калибровка

2.4.5.1 Электрические термометры сопротивления и термисторы

Основные методы и процедуры лабораторных калибровок и поверок в условиях эксплуатации электрических термометров такие же, как и жидкостных стеклянных термометров (см. раздел 2.2.5). Однако, как правило, нельзя размещать в помещении только термометр сопротивления, поскольку одним из пунктов проверки являются стандартные электрические провода. Следовательно, нужно проводить проверки экранированных термометров. Для того чтобы произвести точное сличение показаний электрических термометров или термометров сопротивления с эталонным стеклянным ртутным термометром, отражающим температуру окружающей среды, необходимо присутствие двух наблюдателей. Поскольку измерительный прибор является составной частью электрического термометра, то его градуировку можно проверить, заменив термометр сопротивления прецизионным декадным магазином сопротивлений и устанавливая сопротивления, эквивалентные приращениям температуры в 5 К в пределах рабочего диапазона температуры. Погрешность в любой точке не должна превышать 0,1 К. Обычно эта работа выполняется специалистом технической службы.

2.4.5.2 Термопары

Для проведения калибровки и проверки термопар необходимо поддерживать горячие и холодные спаи при точно известных температурах. Способы и средства измерения, необходимые для проведения этой работы, обычно очень специализированные и здесь не приводятся.

2.4.6 Поправки

При изготовлении электрические термометры (имеющие серийный номер) должны быть снабжены:

(a) паспортом с указанием даты, подтверждающим соответствие определенному стандарту; или

(b) свидетельством о поверке с указанием даты поверки и значений фактического сопротивления в реперных точках диапазона температур.. Эти значения сопротивления должны использоваться для проверки погрешности измерительного прибора или интерфейса системы до и во время работы. Значение отклонения сопротивления от номинального обычно не должно превышать эквивалентную ему температурную погрешность 0,1 – 0,2 К.

2.4.7 Обслуживание

Регулярные проверки в условиях эксплуатации должны выявлять любые изменения в градуировке системы. Они могут быть вызваны изменениями электрических характеристик термометра со временем, старением электрических кабелей или их соединений, изменением контактного сопротивления переключателей или электрических характеристик измерительного оборудования. Точное определение источника таких погрешностей и их корректировка требуют специального оборудования и подготовки кадров и должны

производиться только персоналом по техническому обслуживанию и ремонту.

2.5 РАДИАЦИОННЫЕ ЗАЩИТЫ

Радиационная защита или экран должны быть спроектированы таким образом, чтобы обеспечить огороженное пространство, имеющее равномерную температуру, которая являлась бы такой же, как температура окружающего воздуха. Защита должна полностью окружать термометры и исключать возможность воздействия на них теплового излучения, осадков и других явлений, которые могут повлиять на измерение. Экраны с принудительной вентиляцией, при использовании которых воздух направляется на элемент термометра с помощью вентилятора, могут помочь избежать погрешностей измерения в тех случаях, когда микроклимат внутри огороженного пространства отклоняется от микроклимата окружающей воздушной массы. Такое отклонение возникает только при очень низкой скорости естественного ветра (< 1 м/с). При использовании искусственной вентиляции следует принять меры, чтобы предотвратить осаждение аэрозолей и капель дождя на датчик температуры, под воздействием которых температура, показываемая датчиком, понижается до температуры, показываемой смоченным термометром. В качестве материала для защиты подходит неокисленный металл с очень чистой отполированной поверхностью, потому что он обладает высокой отражательной способностью и низкой теплоемкостью. Однако, предпочтительнее использовать термоизоляционный материал в связи с несложными требованиями к его техническому обслуживанию. Если система основана на принципе естественной вентиляции, то в обязательном порядке следует использовать термоизоляционный материал.

Эффективность работы защиты (реагирование на воздействие и микроклиматические факторы, ведущие к нежелательным погрешностям измерения) зависит, главным образом, от ее конструкции, в которой необходимо обеспечить как защиту от радиации, так и достаточный уровень вентиляции. С тех пор, как начали производить метеорологические измерения температуры, были предложены самые разные типы конструкций защиты. После того, как температуру стали измерять с помощью автоматических метеорологических станций, разнообразие конструкций значительно возросло (см. WMO, 1998*a*). Из-за различий в специфике применений, степени автоматизации и климатических условиях, трудно рекомендовать один конкретный тип конструкции, подходящий для проведения измерений по всему миру. Хороший обзор конструкций и эффективности их функционирования приведен в публикации WMO (1972). Результаты взаимных сравнений защит термометров описаны в публикациях Andersson and Mattison (1991); Sparks (2001); WMO (1998*b*; 1998*c*; 1998*d*; 2000*a*; 2000*b*; 2002*b*; 2002*c*; 2002*d*) и в публикации Zanghi (1987).

В соответствии с международным стандартом (ISO/DIS 17714) определяются наиболее соответствующие требованиям типы защит и описываются методы оценки и сравнения эффективности их функционирования (ISO, 2004).

2.5.1 Жалюзийные будки

В большинстве различных типов жалюзийной будки используется принцип естественной вентиляции. Желательно, чтобы стены такой будки имели двойные жалюзи, а пол был сделан из досок, идущих уступами. Можно найти и другие типы конструкций, отвечающих вышеуказанным требованиям. Крыша должна быть двухслойной с вентилируемым воздушным пространством между слоями. В условиях холодного климата из-за высокой отражательной способности снега (до 88 %) будка должна иметь двойной пол. В то же время пол должен легко опускаться либо наклоняться с тем, чтобы можно было удалить снег, попавший внутрь во время метели.

Размеры и конструкция будки должны быть такими, чтобы обеспечить как можно более низкую теплоемкость, а также достаточное пространство между приборами и стенами. Последнее требование исключает всякую вероятность непосредственного контакта чувствительных элементов термометра со стенами и приобретает особую важность в тропиках, где солнечная радиация может нагреть стены до такой степени, что вызовет заметный температурный градиент в будке. Следует избегать также непосредственного контакта между чувствительными элементами и креплением термометра. Будка должна быть выкрашена внутри и снаружи белой негигроскопичной краской.

При двойных стенах воздух между ними служит для уменьшения количества тепла, которое в противном случае поступало бы за счет теплопроводности от внешней стены внутрь будки, особенно при значительной солнечной радиации. При ветре воздух между стенами непрерывно меняется и поступление тепла от внешних стен внутрь будки еще сильнее уменьшается.

Свободная циркуляция воздуха в будке способствует тому, что температура внутренней стены меняется в соответствии с изменениями температуры окружающего воздуха. Таким образом, уменьшается влияние

внутренней стены на температуру термометра. Кроме того, свободная циркуляция воздуха внутри будки способствует тому, что термометр быстрее реагирует на изменения температуры окружающего воздуха, чем в условиях только радиационного обмена. Однако воздух, циркулирующий в будке, определенное время контактирует с внешними стенами и поэтому его температура может отличаться от температуры воздуха, окружающего будку. Эти отличия становятся заметными, когда ветер слаб, а температура внешней стены значительно отличается от температуры окружающего воздуха. Таким образом, можно ожидать, что температура воздуха в будке днем при сильном солнечном сиянии и слабом ветре будет выше истинной температуры воздуха, а в ясную тихую ночь – несколько ниже, причем в экстремальных случаях погрешности могут достигать 2,5 и –0,5 К соответственно. Дополнительные погрешности могут быть вызваны охлаждением за счет испарения с мокрой поверхности будки после дождя. Все эти факторы оказывают влияние и на показания других приборов, находящихся в будке, таких, как гигрометры, эвапориметры и т. п.

Погрешности, возникающие вследствие изменений естественной вентиляции, можно уменьшить, если установить в будке соответствующим образом спроектированную систему принудительной вентиляции, которая обеспечивает постоянную и определенную скорость вентилирования, по крайней мере при малых скоростях ветра. Следует обратить особое внимание на конструкцию таких систем с тем, чтобы тепло от вентилятора или другого электрического двигателя не влияло на температуру в будке.

В целом необходима лишь одна дверь при условии, что будка расположена таким образом, что солнце не светит на термометры, когда дверь открыта во время наблюдения. В тропиках необходимы две двери, используемые в различные периоды года. В полярных районах (где солнце светит под низким углом) также следует принять меры по защите внутренней части будки от прямых солнечных лучей; сделать это можно с помощью затенения или использования экрана, закрепленного таким образом, чтобы его можно было поворачивать под соответствующим углом в то время, когда дверь открыта для снятия показаний.

Хотя большинство будок все еще изготавливается из дерева, некоторые последние модели, выполненные с применением пластиковых материалов, имеют более эффективную радиационную защиту благодаря усовершенствованию жалюзей, обеспечивающих более интенсивную циркуляцию воздуха. В любом случае будка и подставка должны быть сделаны из твердых материалов и неподвижно закреплены с таким расчетом, чтобы свести к минимуму погрешности максимальных и минимальных термометров, вызываемые ветровой вибрацией. В тех местах, где нельзя полностью избавиться от ветровой вибрации, рекомендуется использовать кронштейны гибкого крепления. Земля под будкой должна иметь травяное покрытие, а в тех местах, где трава не растет, – естественное покрытие, характерное для данного района.

Будка должна содержаться в чистоте и регулярно перекрашиваться; во многих районах достаточно проводить покраску один раз в два года, но в районах, подверженных атмосферному загрязнению, необходимо делать это, по крайней мере, один раз в год.

2.5.2 Другие искусственно вентилируемые средства защиты

Основной альтернативой установки термометра в жалюзийной будке с естественной или искусственной вентиляцией является защита резервуара термометра от прямой солнечной радиации двумя концентрическими цилиндрами и создание потока воздуха, проходящего (со скоростью между 2,5 и 10 м/с) между ними и обтекающего резервуар термометра. Такой тип установки обычен для аспирационных психрометров (см. часть I главы 4). В принципе, защита должна быть изготовлена из термоизоляционного материала, хотя в психрометре Асмана щитки сделаны из чисто отполированного металла для того, чтобы уменьшить количество поглощаемой ими солнечной радиации. При измерениях внутренний щиток поддерживается в соприкосновении с потоком воздуха, перемещающимся вокруг него с таким расчетом, чтобы его температура и, следовательно, температура термометра могли являться максимальным приближением к температуре воздуха. Подобные щитки обычно крепятся таким образом, чтобы их оси имели вертикальное положение. Количество излучения, поступающего через основание таких щитков от земли, невелико и может быть уменьшено за счет значительного удлинения щитков ниже резервуара термометра. Когда искусственная вентиляция обеспечивается с помощью электрического вентилятора, следует принять меры для того, чтобы предотвратить поступление тепла от мотора и вентилятора к термометрам.

В конструкции эталонного психрометра ВМО особое значение придается влиянию радиации и использованию искусственной вентиляции, а также экранированию с целью поддержания элемента термометра в равновесии с истинной температурой воздуха (см. часть I, глава 4).

ПРИЛОЖЕНИЕ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕПЕРНЫХ ТОЧЕК МЕЖДУНАРОДНОЙ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ШКАЛЫ, ПРИНЯТОЙ В 1990 Г.

Реперные точки Международной температурной шкалы, принятой в 1990 г. (МТШ-90), представляющие интерес для метеорологических измерений, приведены в таблице 1, вторичные реперные точки, представляющие интерес для метеорологических измерений, даны в таблице 2.

Стандартный метод интерполяции реперных точек заключается в использовании формул, применяемых для установления связи между показаниями эталонных приборов и значений МТШ-90. Эталонным прибором, применяемым в диапазоне от –259,34 до 630,74 °С, является платиновый термометр сопротивления, для которого соотношение сопротивления R_{100}/R_0 равно 1,3850; R_{100} – сопротивление при 100 °С, R_0 – сопротивление при 0 °С.

В диапазоне от 0 до 630,74 °С сопротивление при температуре t определяют из уравнения:

$$R_t = R_0\,(1 + A \cdot t + B \cdot t^2) \qquad (1)$$

где R_t – сопротивление платиновой проволоки при температуре t, R_0 – ее сопротивление при 0 °С, а. A и B – константы, которые получают из измерений R_t при температуре кипения воды и температуре затвердевания цинка.

В диапазоне от –189,3442 °С до 0 °С сопротивление при температуре t определяют из уравнения:

$$R_t = R_0\,(1 + A \cdot t + \mathrm{B} \cdot t^2 + C \cdot (t{-}100) \cdot t^3) \qquad (2)$$

где R_t, R_0, A и B определяются так же, как для уравнения (1), а C получают путем измерения при температуре кипения кислорода.

ТАБЛИЦА 1. Определение реперных точек по МТШ-90

Состояние равновесия	*Присвоенное значение МТШ*	
	K	*°C*
Равновесие между твердой, жидкой и парообразной фазами аргона (тройная точка аргона)	83,805 8	–189,344 2
Равновесие между твердой, жидкой и парообразной фазами ртути (тройная точка ртути)	234,315 6	–38,834 4
Равновесие между твердой, жидкой и парообразной фазами воды (тройная точка воды)	273,160 0	0,01
Равновесие между твердой и жидкой фазами галлия (точка замерзания галлия)	302,914 6	29,764 6
Равновесие между твердой и жидкой фазами индия (точка замерзания индия)	429,748 5	156,598 5

ТАБЛИЦА 2. Вторичные реперные точки и их температуры по МТШ-90

Состояние равновесия	*Присвоенное значение МТШ*	
	K	*C*
Равновесие между твердой и парообразной фазами двуокиси углерода (точка сублимации двуокиси углерода) при стандартном атмосферном давлении p_0 (1013,25 гПа). Температура t в зависимости от давления пара двуокиси углерода выводится из уравнения: $t = [1{,}210\,36 \cdot 10^{-2}\,(p-p_0) - 8{,}912\,26 \cdot 10^{-6}(p-p_0)_2 - 78{,}464]$ °C где p — атмосферное давление в гПа в пределах температуры 194–195 К	194,686	–78,464
Равновесие между твердой и жидкой фазами ртути (точка замерзания ртути) при стандартном атмосферном давлении	234,296	–38,854
Равновесие между льдом и насыщенной воздухом водой (точка льда) при стандартном атмосферном давлении	273,150	0,00
Равновесие между твердой, жидкой и парообразной фазами феноксибензола (дифенилового эфира) (тройная точка феноксибензола)	300,014	26,864

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Andersson, T. and I. Mattison, 1991: A *Field Test of Thermometer Screens*. SMHI Report No. RMK 62, Nor-rköping.

Bureau International des Poids et Mesures/Comité Consultatif de Thermométrie, 1990: The International Tem-perature Scale of 1990 (ITS-90) (H. Preston-Thomas). *Metrologia*, 1990, 27, pp. 3–10.

Her Majesty's Stationery Office/Meteorological Office, 1980: *Handbook of Meteorological Instruments*. Second edition, Volume 2: Measurement of temperature, London.

International Organization for Standardization, 2004: *Test Methods for Comparing the Performance of Ther-mometer Shields/Screens and Defining Important Characteristics*. ISO/DIS 17714, Geneva.

Jones, E.B., 1992: *Jones' Instrument Technology*. Volume 2: Measurement of temperature and chemical composition, fourth edition, Butterworths-Heinemann, Oxford.

Middleton, W.E.K. and A.F. Spilhaus, 1960: *Meteorological Instruments*. Third edition, University of Toronto Press.

Sparks, W.R., 1970: Current concepts of temperature measurement applicable to synoptic networks. *Meteorological Monographs*, Volume 11, Number 33, pp. 247–251.

Sparks, W.R., 2001: Field trial of Metspec screens. *Technical Report TR19*, Met Office/OD, Wokingham, United Kingdom.

World Meteorological Organization, 1972: *The Effect of Thermometer Screen Design on the Observed Temperature* (W.R. Sparks). WMO-No. 315, Geneva.

World Meteorological Organization, 1992: *Measurement of Temperature and Humidity* (R.G. Wylie and T. Lalas). Technical Note No. 194, WMO-No. 759, Geneva.

World Meteorological Organization, 1998*a*: *Recent Changes in Thermometer Screen Design and their Impact* (A. Barnett, D.B. Hatton and D.W. Jones). Instruments and Observing Methods Report No. 66, WMO/TD-No. 871, Geneva.

World Meteorological Organization, 1998b: An investigation of temperature screens and their impact on temperature measurements (J. Warne). *Papers Presented at the WMO Technical Conference on Meteo-rological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-98)*, Instruments and Observing Methods Report No. 70, WMO/TD-No. 877, Geneva.

World Meteorological Organization, 1998c: A thermometer screen intercomparison (J.P. van der Meulen). *Papers Presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-98)*, Instruments and Observing Methods Report No. 70, WMO/TD-No. 877, Geneva.

World Meteorological Organization, 1998*d*: Comparison of meteorological screens for temperature mea-surement (G. Lefebvre). *Papers Presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-98)*, Instruments and Observing Methods Report No. 70, WMO/TD-No. 877, Geneva.

World Meteorological Organization, 2000a: A comparison of air temperature radiation screens by field experiments and computational fluid dynamics (CFD) simulations (A. Spetalen, C. Lofseik and P. Ø. Nordli). *Papers Presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2000)*, Instruments and Observing Methods Report No. 74, WMO/TD-No. 1028, Geneva.

World Meteorological Organization, 2000*b*: Temperature measurements: Some considerations for the intercomparison of radiation screens (J.P. van der Meulen). *Papers Presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2000)*, Instruments and Observing Methods Report No. 74, WMO/TD-No. 1028, Geneva.

World Meteorological Organization, 2002*a*: Measurement of temperature with wind sensors during severe winter conditions (M. Musa, S. Suter, R. Hyvönen, M. Leroy, J. Rast and B. Tammelin. *Papers Presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2002)*, Instruments and Observing Methods Report No. 75, WMO/TD-No. 1123, Geneva.

World Meteorological Organization, 2002b: Norwegian national thermometer screen intercomparison (M.H. Larre and K. Hegg). *Papers Presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2002)*, Instruments and Observing Methods Report No. 75, WMO/TD-No. 1123, Geneva.

World Meteorological Organization, 2002c: Results of an intercomparison of wooden and plastic thermometer screens (D.B. Hatton). *Papers Presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2002)*, Instruments and Observing Methods Report No. 75, WMO/TD-No. 1123, Geneva.

World Meteorological Organization, 2002d: Temperature and humidity measurements during icing conditions (M. Leroy, B. Tammelin, R. Hyvönen, J. Rast and M. Musa). *Papers Presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2002)*, Instruments and Observing Methods Report No. 75, WMO/TD-No. 1123, Geneva.

Zanghi, F., 1987: Comparaison des Abris Météorologiques. Technical Memorandum No. 11, Météo-France/SETIM, Trappes.

ГЛАВА 3

ИЗМЕРЕНИЕ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

3.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

3.1.1 Определение

Атмосферное давление на данную горизонтальную поверхность — это сила, действующая на единицу площади этой поверхности, обусловленная весом вышележащей атмосферы. Давление, таким образом, равно весу вертикального столба воздуха с основанием в единицу площади, простирающегося от рассматриваемой поверхности до внешней границы атмосферы.

Кроме фактического давления, следует также определять изменение давления или барическую тенденцию. Барическая тенденция – это характер и величина изменения атмосферного давления за 3 ч или другой конкретный период времени, заканчивающийся в срок наблюдения. Барическая тенденция состоит из двух частей, а именно, изменение давления и характеристика изменения давления. Значение барической тенденции определяется как разность между показаниями атмосферного давления в начале и конце указанного интервала времени. Характеристика атмосферного давления показывает, как изменялось давление за этот период времени, например, падение, затем рост, или рост и затем более быстрый рост.

3.1.2 Единицы измерения и шкалы

Основной единицей измерения атмосферного давления является паскаль (Па) – ньютон на квадратный метр. Общепринятой практикой является прибавление приставки «гекто» к этой единице при сообщениях давления для метеорологических целей, при этом один гектопаскаль (гПа) равен 100 Па. Это объясняется главным образом тем, что один гектопаскаль (гПа) равен одному миллибару (мбар) – использовавшейся ранее единице.

Шкалы всех барометров, используемых для метеорологических целей, должны быть проградуированы в гПа. Некоторые барометры проградуированы в миллиметрах или дюймах ртутного столба при стандартных условиях – (мм рт. ст.)$_n$ и (дюймы рт. ст.)$_n$ соответственно. В тех случаях, когда из контекста ясно, что должны применяться стандартные условия, можно использовать более краткие термины – «миллиметр ртути» или «дюйм ртути». В стандартных условиях столб ртути, имеющий действительную высоту шкалы 760 (мм рт. ст.)$_n$ оказывает давление 1 013,250 гПа.

Далее будут применяться следующие формулы перевода:

1 гПа = 0,750 062 (мм рт. ст.)$_n$
1 (мм рт. ст.)$_n$ = 1,333 224 гПа

При обычной зависимости между дюймом и миллиметром, а именно 1 дюйм = 25,4 мм, получают следующие переводные множители:

1 гПа = 0,029 530 (дюйма рт. ст.)$_n$
1 (дюйм рт. ст.)$_n$= 33,863 9 гПа
1 (мм рт. ст.)$_n$ = 0,039 370 08 (дюйма рт. ст.)n

Шкалы ртутных барометров, применяемых для метеорологических целей, должны быть проградуированы таким образом, чтобы получать истинные значения давления непосредственно в стандартных единицах, когда весь прибор находится при стандартной температуре 0 °C, а стандартное значение ускорения силы тяжести составляет 9,806 65 м/с^2.

Барометры могут иметь несколько шкал, например, гПа и мм рт. ст. или гПа и дюймы рт. ст., при условии, что барометр правильно откалиброван при стандартных условиях.

Данные о давлении следует выражать в гектопаскалях. Далее в этой главе будет использоваться только единица гектопаскаль.

3.1.3 Метеорологические требования

Фундаментальной потребностью науки метеорологии является необходимость иметь проанализированные поля давления. При этом необходимо, чтобы эти поля давления были правильно определены, поскольку они составляют основу для всех последующих прогнозов состояния атмосферы. Измерения давления должны быть настолько точными, насколько это позволяет сделать применяемая технология и реалистичные финансовые ограничения, а измерения и процедуры калибровки должны быть унифицированными как в национальном, так и в международном плане.

Соответствующие комиссии ВМО определили необходимый уровень точности измерений давления для удовлетворения потребностей в интересах различных метеорологических применений, и этот уровень описан в части I, глава 1, приложение 1.B, который является основным эталоном для спецификаций измерений в настоящем Руководстве. Требования к измерениям следующие:

Диапазон измерений:	500 – 1 080 гПа (как давление на уровне станции, так и давление на среднем уровне моря)
Требуемая точность:	0,1 гПа
Точность отсчетов:	0,1 гПа
Постоянная времени датчика:	20 с
Время осреднения:	1 мин

Вышеуказанные требования должны считаться достижимыми для новых барометров, размещаемых в строго контролируемой среде, такой, как среда в должным образом оборудованной лаборатории. Такие лаборатории обеспечивают соответствующий уровень точности барометров перед их установкой в окружающей среде.

Для национальной метеорологической службы практические ограничения потребуют хорошо-спроектированного оборудования для поддержания такого уровня точности барометров, установленных в окружающей среде. Особого внимания требует не только сам барометр, но и его установка. Однако характеристики барометра на станции, входящей в оперативную сеть, откалиброванного по стандартному барометру, инструментальные погрешности которого известны и допустимы, должны быть не хуже заявленных требований.

3.1.4 Методы измерений и наблюдений

Для метеорологических целей атмосферное давление обычно измеряется электронными барометрами, ртутными барометрами, барометрами-анероидами или гипсотермометрами. Последний класс приборов, основанных на использовании зависимости точки кипения воды от атмосферного давления, имеет ограниченное применение, и не будет обсуждаться подробно в настоящей публикации. Весьма полезное обсуждение характеристик цифровых барометров (которые в большинстве случаев имеют электронный вывод данных) содержится в публикации ВМО (1992*a*).

Метеорологические приборы для измерения давления (барометры) пригодны для использования в качестве оперативных приборов для измерения атмосферного давления в том случае, если они удовлетворяют следующим требованиям:

(a) приборы должны калиброваться или регулярно поверяться по (рабочему) стандартному барометру с использованием установленных процедур. Период между двумя калибровками должен быть достаточно коротким с тем, чтобы суммарная абсолютная погрешность измерения удовлетворяла требованиям к точности, определенным в настоящей главе;

(b) любые изменения точности (долгосрочного или краткосрочного характера) должны быть намного меньше, чем допуски, приведенные в разделе 3.1.3. Если у каких-либо приборов имеется история дрейфа калибровки, эти приборы могут быть пригодны для оперативного использования лишь в том случае, если период между калибровками является достаточно коротким, с тем чтобы обеспечить необходимую точность измерения во все сроки;

(c) на показания прибора не должны влиять колебания температуры. Приборы являются пригодными только в том случае, если:
   (i) процедуры для внесения температурных поправок в их показания обеспечивают необходимую точность, и/или;
   (ii) датчик давления располагается в среде, где температура стабилизируется таким образом, что обеспечивается требуемая точность.

   На некоторых приборах измеряется температура датчика давления с тем, чтобы компенсировать влияние температуры. Необходимо контролировать и проводить калибровку температурной компенсации при проведении стандартной калибровки датчиков давления;

(d) прибор должен располагаться в среде, где внешние воздействия не приводят к ошибкам измерений. К таким воздействиям относятся ветер, радиация/температура, удары и вибрация, колебания в обеспечении электрической энергией и скачки давления. Следует тщательно выбирать местоположение прибора, особенно ртутных барометров.

   Важно, чтобы каждый наблюдатель-метеоролог в полной мере понимал эти воздействия и мог оценить, оказывает ли влияние какого-либо из этих факторов на точность показаний используемого барометра;

(e) прибор должен быть доступным для быстрого и легкого снятия показаний. Приборы должны быть сконструированы таким образом, чтобы стандартное отклонение их показаний было менее одной трети заявленной абсолютной погрешности;

(f) когда необходимо откалибровать прибор на удалении от места его оперативного использования, способ транспортировки не должен оказывать воздействия на стабильность или точность барометра. К воздействиям, которые могут изменить калибровку барометра, относятся механические удары и вибрация, отклонение от вертикального положения и значительные колебания давления, которые могут возникнуть во время транспортировки воздушным транспортом.

В большинстве барометров последней конструкции используются датчики, реакция которых преобразуется в соответствующие значения давления. Впоследствии эти значения обрабатываются с использованием соответствующих электрических интегрирующих схем или систем получения данных с соответствующими алгоритмами сглаживания. Для синоптических целей желательна постоянная времени, равная примерно 10 секунд (и не более 20 секунд). Для ртутных барометров постоянная времени, в основном, не имеет значения.

Для измерения атмосферного давления существуют несколько общих методов, которые будут описаны в последующих разделах.

Наиболее широко используемым методом измерения атмосферного давления является метод, базирующийся на весе столба жидкости. По различным причинам требуемую точность можно получить только в том случае, если жидкостью, используемой в приборе, является ртуть. Считается, что в целом ртутные барометры имеют хорошую длительную стабильность и точность, но в настоящее время они начинают однозначно проигрывать точным и более удобным для снятия показаний электронным барометрам.

Мембрана из эластичного материала будет деформироваться, если давление на одной стороне будет больше, чем на другой. На практике используется запаянная металлическая коробка, полностью или частично вакуумированная, с сильной металлической пружиной для предотвращения разрушения коробки под воздействием внешнего атмосферного давления. Для измерений деформации под воздействием разности давления между внутренней и внешней частями коробки используются механические и электрические средства. Это принцип хорошо известного барометра-анероида.

В настоящее время разрабатываются элементы датчика давления, в которые входят тонкостенные цилиндры из никелевого сплава, находящиеся в вакууме. Опорная резонансная частота этих цилиндров изменяется в зависимости от разности давления внутри цилиндра, которое представляет собой атмосферное давление, и вне цилиндра, сохраняющегося в вакууме.

Все большее распространение получают датчики абсолютного давления, в которых используется кварцевый кристаллический элемент. Оказываемое через гофрированные мембраны на поверхность кристалла давление вызывает силу сжатия, воздействующую на кристалл. Вследствие пьезорезистивных свойств кристалла при воздействии давления изменяется баланс активного моста Уитстона. Балансирование моста позволяет обеспечить точное определение давления. Датчики давления такого типа в конечном итоге не подвергаются воздействиям гистерезиса.

Точка кипения жидкости является функцией давления, при котором она закипает. Как только эта функция определена, можно использовать температуру, при которой закипает жидкость, в гипсометре для определения атмосферного давления.

3.2 РТУТНЫЕ БАРОМЕТРЫ

Все более распространенным становится отказ от использования ртутных барометров вследствие того, что пары ртути являются высокотоксичными; ртуть в чистом виде агрессивна для алюминиевых сплавов, используемых в каркасе (по этой причине в некоторых странах существуют правила, запрещающие манипуляции с ртутными барометрами или их перемещение); для трубки необходимо специальное свинцовое стекло; барометр является очень хрупким и трудным для транспортировки; трудно осуществлять техобслуживание прибора и очищать ртуть; считывание показаний прибора и применение поправок необходимо производить вручную; в настоящее время общедоступными являются другие датчики давления эквивалентной точности и стабильности с электронным считыванием показаний.

3.2.1 Требования к конструкции

Основным принципом работы ртутного барометра является уравновешивание давления атмосферы весом столба ртути. В некоторых барометрах столб ртути взвешивается на весах, но для обычных метеорологических целей высота ртутного столба определяется по шкале, проградуированной в единицах давления.

На метеорологических станциях используется несколько типов ртутных барометров, при этом наиболее распространенными являются чашечные барометры и барометры Фортеня. Высота ртутного столба измеряется в них как расстояние между верхней точкой ртутного столба и поверхностью ртути в чашке. Любое изменение высоты ртутного столба сопровождается изменением уровня ртути в чашке. В барометре Фортеня уровень ртути в чашке может быть отрегулирован по контакту с указателем, конец которого находится на нулевой отметке шкалы барометра. В чашечном барометре, часто называемом барометром Кью, ртуть в чашке не регулируется, поэтому шкала барометра нелинейная и нанесена с учетом изменения уровня ртути в чашке.

3.2.2 Общие требования

Основные требования к хорошим ртутным станционным барометрам состоят в следующем:

(a) их точность не должна изменяться в течение длительного времени. В частности, их гистерезис должен быть незначительным;

(b) отсчет по барометру должен быть легким и быстрым и должен корректироваться поправками на все известные воздействия. Наблюдатели, использующие эти поправки, должны понимать их значение с тем, чтобы правильно их применять и не ухудшать точность отсчетов;

(c) при транспортировке барометры не должны терять свою точность;

(d) внутренний диаметр трубки барометра должен быть не менее 7 мм, но предпочтительнее 9 мм;

(e) трубка должна быть подготовлена и наполнена в вакууме. Важное значение имеет чистота ртути. Она должна быть дважды дистиллирована, обезжирена, многократно промыта и отфильтрована;

(f) температура, при которой предполагается, что шкала дает правильные значения при стандартной силе тяжести, должна быть нанесена на барометре. Желательно, чтобы шкала была откалибрована так, чтобы давать правильные значения при 0 °C;

(g) мениск не должен быть плоским, за исключением случаев, когда диаметр трубки большой (более 20 мм);

(h) для морских барометров погрешность в любой точке шкалы не должна превышать 0,5 гПа.

Инерция ртутных барометров для наземных станций, как правило, соизмерима с инерцией морских барометров и приборов для измерения температуры, влажности и ветра.

3.2.3 Стандартные условия

Принимая во внимание, что высота ртутного столба барометра зависит, кроме атмосферного давления, от других факторов, особенно от температуры и силы тяжести, необходимо определить стандартные условия, при которых барометр теоретически должен давать правильные показания. В международных соглашениях по барометрам предусматриваются следующие стандарты.

3.2.3.1 Стандартная температура и плотность ртути

Стандартной температурой является значение 0 °C, к которому приводятся отсчеты ртутных барометров с целью предотвращения погрешностей, связанных с изменением плотности ртути в зависимости от температуры.

Стандартная плотность ртути при 0 °C берется равной $1{,}359\ 51 \cdot 10^4$ кг/м^3, а для целей расчета абсолютных значений давления с помощью гидростатического уравнения ртутный столб барометра условно рассматривается как несжимаемая жидкость.

Плотность неочищенной ртути отличается от плотности ртути очищенной. Поэтому барометр, в котором используется неочищенная ртуть, будет показывать ошибочные значения давления, поскольку давление пропорционально плотности ртути.

3.2.3.2 Стандартная сила тяжести

Показания барометра должны приводиться от ускорения силы тяжести в данном месте к стандартному (нормальному) ускорению. Стандартное ускорение силы тяжести (g_n) обычно является константой, g_n = 9,806 65 м/с^2.

Примечание: Необходимость принятия некоторого стандартного значения ускорения силы тяжести объясняется в публикации ВМО (1966). Это значение не соответствует истинному значению, измеренному или теоретически рассчитанному в конкретных условиях, например, на уровне моря на широте 45°, поскольку такие величины уточняются по мере появления новых экспериментальных данных.

3.2.4 Отсчет показаний ртутных барометров

При наблюдении давления с помощью ртутного барометра вначале следует отсчитать показания термометра-атташе. Это следует сделать как можно быстрее, так как из-за присутствия наблюдателя температура термометра может повыситься. Для того чтобы поверхности ртути стабилизировались, следует легко постучать несколько раз пальцем в двух местах: в районе мениска и около чашки. Если барометр принадлежит к типу приборов с незакрепленной чашкой, то его следует отрегулировать так, чтобы привести ртуть в чашке в соприкосновение с риской нулевого отсчета. И, наконец, следует установить нониус барометра на мениске ртути, после чего можно снять показания. Нониус считается точно установленным, когда его горизонтальный нижний край касается самой высокой части мениска; при использовании увеличительного стекла должна быть видна чрезвычайно узкая полоса света между нониусом и вершиной поверхности ртути. В любом случае, нониус не должен «срезать» верхнюю часть мениска. Глаз наблюдателя нужно располагать таким образом, чтобы нижние края нониуса, ближний и дальний, находились на одном уровне зрения.

3.2.4.1 Точность отсчета показаний

Отсчеты должны производиться с точностью до ближайшей 0,1 гПа. Обычно невозможно снять показания нониуса с лучшей точностью.

Для улучшения отсчетов по ртутным барометрам разработаны оптические и цифровые системы. Хотя эти системы обычно облегчают наблюдения, они могут вызвать новые источники ошибок, если они не спроектированы и откалиброваны тщательным образом.

3.2.4.2 Изменение в инструментальной поправке

Любое изменение значения инструментальной поправки, выявленное во время инспекции, следует тщательно проанализировать, учитывая следующее:

(a) историю барометра;
(b) опыт инспектора в работе по сравнениям;
(c) величину выявленного изменения;
(d) стандартное отклонение вычисленных разностей;
(e) наличие запасного барометра на станции, точность поправки которого известна;
(f) поведение переносных стандартных барометров во время перевозки;
(g) согласованность или несогласованность значений давления на станции и на соседних станциях, определяемых по ежедневной синоптической карте, в случае принятия изменения;
(h) был ли прибор почищен до начала сравнений.

Изменения в инструментальной поправке станционных барометров, называемые отклонением, вызываются следующими причинами:

(a) изменениями капиллярной депрессии поверхности ртути вследствие ее загрязнения. В районах с сильным загрязнением атмосферного воздуха от промышленных источников загрязнение ртути может представлять серьезную проблему, связанную с необходимостью сравнительно частой очистки ртути и чашки барометра;
(b) подъемом воздушных пузырьков через ртутный столб в пространство выше столба.

Ошибки могут быть случайными или систематическими – положительными или отрицательными в зависимости от причины.

Изменения инструментальной поправки могут быть обусловлены также следующими причинами:

(a) ошибкой наблюдателя, вызванной тем, что наблюдатель не постучал пальцем по барометру перед снятием показаний, неправильно установил нониус или точку отсчета;
(b) отсутствием температурного равновесия у станционного барометра или у переносного эталона;
(c) неодновременностью снятия показаний при быстро изменяющемся давлении.

В барометрах типа Фортеня такие погрешности могут вызываться случайным смещением регулируемой шкалы уменьшением или увеличением расстояния между опорными точками.

3.2.4.3 Допустимые изменения в инструментальной поправке

Изменения в инструментальной поправке следует воспринимать следующим образом:

(a) изменение поправки в пределах 0,1 гПа может не приниматься в расчет, если оно непостоянно;
(b) изменение поправки более чем на 0,1 гПа, но менее чем на 0,3 гПа можно принять временно, до следующей поверки, уточняющей выявленные изменения;
(c) изменение поправки, превышающее 0,3 гПа можно временно принять, если барометр находился в чистке, а запасной барометр с известной поправкой не был задействован; этот барометр должен заменяться сразу же, как только появляется правильно откалиброванный барометр.

Барометры с изменениями в инструментальной поправке, определяемыми в пунктах (b) и (c) выше требуют особого внимания. Они должны быть вновь откалиброваны или заменены при первой же возможности.

Наряду со станционными барометрами эти же критерии изменений в инструментальной поправке относятся и к переносным эталонам. Изменение в поправке менее 0,1 гПа можно не принимать во внимание, если оно не является постоянным. Более значительное изменение в поправке должно подтверждаться и приниматься только после неоднократных сравнений. Инструментальные поправки переносного эталона «до» и «после» перемещения не должны различаться более чем на 0,1 гПа. Поэтому в качестве переносных эталонов должны использоваться только барометры с длительной историей соответствующих поправок.

3.2.5 Приведение показаний барометра к стандартным условиям

Для того чтобы показания барометра, снимаемые в различные сроки и в разных местах, перевести в действительные значения атмосферного давления, следует внести следующие поправки:

(a) инструментальную поправку;

(b) поправку на силу тяжести;
(c) поправку на температуру.

Для большинства оперативных метеорологических применений можно получить приемлемые результаты, следуя инструкциям изготовителя барометра, и быть уверенным, что эти процедуры обеспечивают получение показаний давления с требуемой погрешностью. Однако если эти результаты не удовлетворяют потребителя или требуется получить более высокую точность, то подробные процедуры, в соответствии с которыми следует вносить поправки на вышеуказанные факторы, можно найти в приложении 3.A.

3.2.6 Ошибки и погрешности ртутных барометров

3.2.6.1 Неточности в температуре прибора

Температура, определяемая по термометру при барометре, как правило не соответствует средней температуре ртути, шкалы и чашки. Возникающую вследствие этого погрешность можно уменьшить, если разместить барометр в подходящем месте и использовать соответствующую процедуру наблюдения. Обращается внимание на частое возникновение значительного устойчивого вертикального градиента температуры в помещении, которое может вызывать значительные различия в температуре верхней и нижней частей барометра. Такого распределения температуры можно избежать с помощью электрического вентилятора, однако при этом существует опасность изменения местного давления. Вентилятор следует выключать перед началом наблюдения. При обычных условиях погрешность, связанная с уменьшением температуры, не превышает 0,1 гПа, если предприняты такие меры предосторожности.

3.2.6.2 Недостаточный вакуум

Обычно предполагается, что внутри откалиброванного прибора имеется идеальный вакуум или незначительное количество газа над ртутным столбом, которым можно пренебречь при проведении калибровки. Любое изменение этих условий вызовет погрешность отсчетов давления. Грубую проверку на присутствие газа в трубке барометра можно провести опрокинув барометра и прослушав щелчок, когда ртуть достигнет конца трубки, или проверяя запаянный конец барометрической трубки на наличие пузырька, диаметр которого при наклонном положении барометра не должен превышать 1,5 мм. Таким способом нельзя обнаружить наличие водяного пара, поскольку он конденсируется, когда объем пространства уменьшается. Согласно закону Бойля, погрешность из-за наличия воздуха и ненасыщенного водяного пара над столбиком ртути будет обратно пропорциональна объему пространства над ртутью. Единственным приемлемым путем преодоления этой погрешности является повторная калибровка всей шкалы или, если погрешность значительна, трубку барометра следует заменить или наполнить вновь.

3.2.6.3 Капиллярная депрессия поверхности ртути

В конкретной трубке высота мениска и капиллярная депрессия,[1] могут изменяться из-за изнашивания стеклянной трубки, загрязнения ртути, колебаний давления и положения ртути в трубке. Желательно, чтобы средняя высота мениска определялась во время первой калибровки и отмечалась в сертификате барометра. При отклонении высоты мениска от первоначальной никаких исправлений делать не следует, а эту информацию нужно использовать только как указание о необходимости тщательной проверки или повторной калибровки барометра. Изменение высоты мениска на 1 мм (от 1,8 до 0,8 мм) для 8-миллиметровой трубки может вызвать погрешность в отсчетах давления около 0,5 гПа.

Следует отметить, что значительные изменения угла соприкосновения ртути и стенки чашки в чашечном барометре могут вызвать небольшие, но заметные погрешности при измерении давлении.

3.2.6.4 Нарушение вертикальности

Если основание свободно подвешенного чашечного барометра обычной длины (около 90 см) переместится на 6 мм от вертикального положения, то определяемое давление повысится примерно на 0,02 гПа. Такие барометры, как правило, висят более вертикально, чем сифонно-чашечные.

Для сифонно-чашечного барометра этот источник погрешностей, однако, является более важным. Если, например, указатель исходной точки в чашке отклонен от оси примерно на 12 мм, то перемещение чашки только на 1 мм от вертикали вызовет погрешность в 0,02 гПа.

3.2.6.5 Общая точность исправленных отсчетов давления

Стандартное отклонение отдельного исправленного показания барометра, установленного на

1 Капиллярная депрессия представляет уменьшение высоты мениска жидкости, содержащейся в трубке, где жидкость (такая как ртуть) не смачивает стенки трубки. Мениск имеет выпуклую форму в верхней части.

обычной метеорологической станции, должно быть в пределах 0,1 гПа. Эта погрешность обычно является результатом неизбежной неточности инструментальной поправки, недостоверной температуры прибора и погрешности из-за наличия колебательного эффекта поверхности ртути.

3.2.7 Меры безопасности при использовании ртути

Ртуть используется довольно в больших количествах в барометрах и, являясь ядовитой, требует осторожного обращения. При температурах и давлениях, наблюдаемых на поверхности Земли, ртуть представляет собой жидкость. Там, где существует жидкая ртуть, в воздухе образуются пары ртути. Ртуть как в жидком, так и в газообразном состоянии может проникать в организм через кожу, а также при дыхании. Ее свойства описаны Саксом (1975). Во многих странах меры предосторожности при ее использовании предписываются правилами обращения с опасными веществами.

В больших дозах ртуть может вызвать острое отравление; кроме того, она также может накапливаться в твердых и мягких тканях тела, поэтому воздействие в течение длительного времени даже малых доз может вызвать долгосрочные повреждения органов или даже смерть. Она поражает главным образом центральную нервную систему, рот и десны с такими симптомами, как боль, потеря зубов, аллергические реакции, тревоги и психические расстройства.

При применении барометров основной риск возникает в лабораториях, где барометры часто освобождаются от ртути или заполняются ею. Проблемы могут также возникнуть на метеорологических станциях, если в замкнутом помещении, где работают люди, какое-то количество ртути, например от разбитого барометра, остается в местах, где она может постоянно испаряться.

Опасность существует даже если ртуть должным образом закрыта и, если она тщательно удалена после пролива. При использовании ртути следует иметь в виду следующее:

(a) емкости, содержащие ртуть, должны быть хорошо упакованы для предотвращения утечки или разбивания и должны регулярно проверяться;

(b) пол помещения, где ртуть хранится и используется в больших количествах, должен иметь плотное непромокаемое и не растрескавшееся покрытие из материала, такого, как ПХВ. Небольшие трещины в полу, например между половыми досками, будут удерживать капли ртути. Предпочтительнее, чтобы покрывающий пол материал был загнут у стены примерно на 10 см с тем, чтобы не оставалось стыков между полом и стенами;

(c) ртуть не следует хранить в металлическом контейнере, поскольку она реагирует с большинством металлов, за исключением железа, образуя амальгаму, которая также может быть опасной. Ртуть не должна соприкасаться ни с какими другими металлическими предметами;

(d) ртуть не следует хранить вместе с другими химическими веществами, особенно с аминами, аммиаком или ацетиленом;

(e) хранить ртуть в больших количествах и работать с ней всегда следует в хорошо проветриваемом помещении. С первичным материалом следует работать в вытяжном шкафу хорошего качества;

(f) ртуть никогда не следует хранить вблизи любого источника тепла, поскольку она имеет сравнительно низкую точку кипения (357 °C) и может выделять опасные концентрации токсичного пара, особенно во время пожара;

(g) при работе с ртутью помещение, в котором она используется, и персонал, работающий с ней, должны регулярно проходить освидетельствование на определение содержания опасных количеств ртути.

3.2.7.1 Разливы и удаление ртути

Существует два общепринятых метода удаления разливов ртути: с использованием соответствующей системы всасывания, описываемой ниже, или же путем адсорбции/амальгамации ртути в порошок.

Разливы ртути должны удаляться незамедлительно. Наблюдатель (поверитель) должен быть в полиэтиленовых перчатках или рукавицах, иметь защитные очки, а при значительных разливах иметь также респиратор с фильтром, не пропускающим пары ртути. В зависимости от того, насколько велик разлив, ртуть вначале можно собрать с помощью вакуумной системы, а затем с помощью набора средств адсорбции для очистки от небольших капель. Использование набора средств адсорбции является обязательным, поскольку во время разлива десятки небольших капель диаметром менее 0,02 мм прилипают к поверхности и их невозможно эффективно счистить с помощью вакуумной системы.

Во всасывающей системе ртуть поступает через пластиковую трубку небольшого диаметра в стеклянный флакон с водой, при этом отверстие трубки находится ниже уровня воды (примерно 3 см) во флаконе. Один конец пластиковой трубки более крупного диаметра помещен в воздушное пространство выше уровня воды во флаконе, а

другой присоединен к пылесосу или вакуумному насосу. Вода не позволяет парам или каплям ртути поступать в пылесос или насос. Затем суспензию помещают в пластиковый контейнер с четкой надписью «На удаление».

При использовании поглощающих материалов для поглощения или амальгамации ртути можно использовать целый ряд соединений. К ним относятся цинковый или серный порошок или активированный уголь. Для ликвидации разливов ртути существуют специальные коммерческие наборы. Порошок распыляется на разлив и адсорбирует или амальгамирует ртуть. Полученный порошок сметается и помещается в пластиковый контейнер с четкой надписью «На удаление».

Собранную ртуть можно либо удалить, либо же восстановить. Более подробную информацию о том, каким образом удалять ртуть, можно получить от местных властей и/или поставщика. Поставщик может также проинформировать о способе восстановления и очистки ртути.

3.2.7.2 Пожар

Ртуть не горит, однако при пожаре выделяются значительные концентрации токсичных дымов. После пожара пары ртути конденсируются на ближайших холодных поверхностях, заражая большие площади, а также адсорбируются на открытых поверхностях, таких, как обгоревшее дерево. Во время пожара следует покинуть место пожара, при этом стараться не попадать в дымные струи. Сообщить пожарным учреждениям о местоположении и количестве имеющейся ртути.

3.2.7.3 Транспортировка

Транспортировка ртути или приборов, в которых содержится ртуть, воздушным транспортом регулируется Международной ассоциацией воздушного транспорта. Транспортировка по железной дороге или автотранспортом в каждой стране обычно регулируется положением о перевозке опасных веществ.

Как правило, металлическая ртуть должна быть упакована в стеклянный или пластиковый контейнер емкостью менее 2,5 кг. Упаковку контейнеров следует проводить чрезвычайно осторожно, чтобы не допустить их разрывов, и на них должны быть наклейки с четкими надписями. Приборы, содержащие ртуть, должны упаковываться в прочные коробки с амортизирующим материалом, которые являются непромокаемыми и непроницаемыми для ртути.

3.3 ЭЛЕКТРОННЫЕ БАРОМЕТРЫ

В большинстве барометров современной конструкции используются датчики, которые переводят реакцию датчика на изменение давления в электрические сигналы. К ним могут относиться аналоговые сигналы, например напряжение (DC или AC с частотой, связанной с действительным давлением), или цифровые, например пульсация частоты или стандартные протоколы данных связи, такие, как RS232, RS422 или IEEE488. Аналоговые сигналы могут выводиться на дисплеи разнообразных электронных счетчиков. Для вывода на дисплей цифровых данных или оцифрованных аналоговых данных часто используются мониторы и системы получения данных, подобные тем, которые применяются в автоматических метеорологических станциях.

Для повышения точности измерений и достижения длительной стабильности технологии современных цифровых барометров постоянно усовершенствуются. Один из методов состоит в использовании трех независимо работающих датчиков под управлением одного микропроцессора. Еще более высокую надежность и стабильность можно достичь при использовании трех абсолютно независимых барометров, включающих три комплекта датчиков давления и микропроцессоров. В каждом комплекте происходит автоматическая компенсация на температуру за счет встроенных датчиков температуры. Тройное приведение обеспечивает отличную длительную стабильность и точность измерений, даже в самых экстремальных условиях. Такие подходы позволяют обеспечивать постоянный мониторинг и проверку характеристик отдельного датчика.

При использовании цифровых барометров должны соблюдаться некоторые требования, особенно когда они применяются в автоматических метеорологических станциях; существуют также официальные рекомендации, которых следует придерживаться в целях нормальной работы (см. Приложение VII *Сокращенного окончательного отчета одиннадцатой сессии Комиссии по приборам и методам наблюдений* 1994, WMO-No. 807). Метеорологические организации должны:

(a) регулярно контролировать или перепроверять калибровочные данные цифровых барометров, имеющиеся в поверочных свидетельствах (ежегодно до тех пор, пока не будет определена скорость дрейфа);

(b) обеспечивать регулярную калибровку цифровых барометров и изучать возможности использования для этой цели оборудования национальных служб;

(c) принимать во внимание, что определенные типы цифровых барометров могут быть

использованы в качестве переносных эталонов благодаря их портативности и хорошей краткосрочной стабильности;

(d) считать, что выбор конкретного типа цифрового барометра должен быть основан не только на утвержденных положениях о приборах, но также и на учете особенностей местности и существующего оборудования.

Производители приборов должны:

(a) увеличивать степень независимости цифровых барометров от температуры и обеспечивать долговременную стабильность их работы;

(b) использовать стандартные коммуникационные интерфейсы и протоколы передачи данных;

(c) приспосабливать систему энергопитания цифровых барометров к широкому диапазону DC напряжения (например, от 5 до 28 VDC).

3.3.1 Деформационные датчики с детекторами смещения

Высокоточные приборы для измерения давления, использующие принцип бесконтактного измерения смещения анероидной коробки, крайне важны в практике метеорологических применений. Применяется широкий диапазон таких датчиков, в том числе емкостные детекторы смещения, потенциометрические детекторы смещения, тензодатчики, размещаемые в важнейших точках датчика, и рычажные сервосистемы, которые сохраняют размеры датчика постоянными, независимо от давления.

Все чувствительные элементы должны помещаться внутри литого кожуха. Этот кожух следует содержать при постоянной температуре с помощью электронно-управляемого нагревателя. Следует полностью избегать конденсации влаги. Эффективным методом предотвращения этого является помещение в литой кожух гигроскопического вещества, такого, как силикат, а диффузии водяного пара в кожух можно избежать с помощью присоединения к нему длинной пластмассовой трубки (примерно 25 м) с диаметром отверстия 2 мм или менее между отверстием давления и статической насадкой (см. раздел 3.8.1).

Кожух датчика давления должен быть воздухонепроницаемым и обеспечивать внешнюю связь с отсеком, где должно измеряться давление.

3.3.2 Цифровые пьезорезистивные барометры

Измерения атмосферного давления стали возможными благодаря использованию пьезоэлектрического (пьезорезистивного) эффекта. Общая схема состоит в том, что четыре измерительных сопротивления, помещенные на гибкой поверхности монолитной кремниевой подложки, соединены между собой таким образом, чтобы образовать мост Уитстона.

В цифровых пьезорезистивных барометрах используются датчики, представляющие собой элементы кристаллического кварца с осевой нагрузкой, при этом они являются датчиками абсолютного давления. Кристаллический кварц выбран из-за его пьезоэлектрических свойств, стабильности частотных характеристик, малой подверженности температурным воздействиям и точно воспроизводимых частотных характеристик. Давление, оказываемое на впускное окно, вызывает осевую подъемную силу с помощью подвижных чашечек, в результате чего на кристаллический кварцевый элемент оказывает воздействие сила давления. Поскольку кристаллический элемент представляет собой довольно жесткую мембрану, то при регистрации изменений давления напрягается вся механическая часть барометра, в результате чего устраняется механический гистерезис.

Упомянутый выше действующий мост Уитстона может состоять либо из полупроводниковых датчиков напряжения, либо из пьезорезистивных датчиков. Датчики напряжения либо связаны с тонкой круглой диафрагмой, которая зажата по окружности, либо автоматически преобразуются в кремниевый контур в форме диафрагмы. В диффузных приборах сама кремниевая интегрированная пластина является диафрагмой. Прилагаемое давление представляет собой распределенную нагрузку на диафрагму, которая в свою очередь обеспечивает изгибающие усилия и результирующие напряжения, на которые реагируют тензодатчики и которые создают напряжение, пропорциональное прилагаемому давлению, в результате чего возникает разбалансирование моста. Выходные данные моста пропорциональны изменению давления, действующего на диафрагму.

Этот принцип работы основан на том, что атмосферное давление воздействует на элемент датчика, покрывающий небольшую камеру, из которой откачан воздух. Через нее сопротивления подвергаются силам сжатия и растяжения. Вследствие пьезоэлектрического эффекта величины сопротивления изменяются пропорционально атмосферному давлению. Чтобы избежать ошибок за счет температурных воздействий, датчик часто встраивается в термостат.

Выходной сигнал постоянного тока моста Уитстона преобразуется в стандартный сигнал с помощью

соответствующего усилителя. Обычно величина измеряемого давления представляется на световом диоде или на дисплее на жидких кристаллах.

В современном варианте пьезоэлектрического датчика давления определяются две резонансные частоты пьезоэлектрического элемента. Путем расчета линейных функций этих частот и применения соответствующего комплекта параметров, полученных после калибровки, с помощью микропроцессора, который не зависит от температуры датчика, рассчитывается давление.

3.3.3 Вибрационно-частотные барометры

В вибрационно-частотных барометрах в качестве измерительного элемента используется тонкостенный цилиндр из никелевого сплава. С помощью электромагнитного поля он поддерживается в режиме вибрации. Изменение давления вызывает изменение опорной резонансной частоты вибрирующей механической системы. Вибрация стенок цилиндра измеряется принимающей катушкой, сигнал которой усиливается и подается на приводную катушку. Давление воздуха измеряется внутри цилиндра, а на его внешней стороне поддерживается стандартный вакуум. Опорная резонансная частота вибрации изменяется пропорционально разнице давлений на стенках цилиндра. Повышение давления вызывает увеличение частоты.

Тонкостенный цилиндр должен иметь достаточную прочность и массу с тем, чтобы выдерживать давление диапазона, в котором он предназначен работать, и находиться на прочном основании. Для метеорологических применений цилиндр помещается в вакуумную камеру, а вход цилиндра соединяется со свободной атмосферой. В связи с тем, что имеется прямая зависимость между опорной резонансной частотой цилиндра и давлением, атмосферное давление можно рассчитывать по измеряемой резонансной частоте. Однако эта зависимость, определенная во время калибровки, зависит от температуры и плотности газа. Поэтому требуется температурная компенсация, и рекомендуется подсушивать воздух до входа в цилиндр.

3.3.4 Отсчет показаний электронных барометров

С помощью электронного барометра измеряется атмосферное давление окружающего пространства или любого пространства, которое соединяется с ним через трубку. Как правило, барометр следует устанавливать так, чтобы снимать показания на уровне прибора. Однако на борту судна или на наземных станциях, расположенных на небольших высотах, прибор может быть установлен таким образом, чтобы показывать давление, соответствующее среднему уровню моря при условии, что разность между давлением на станции и на уровне моря можно считать постоянной.

Электронные барометры дают точные показания на числовой шкале, обычно представленной в гПа, однако в случае необходимости их можно легко перевести и в другие единицы. Как правило, можно обеспечить регистрацию в цифровой форме. Можно также представлять тенденцию изменения давления, если прибор управляется микропроцессором.

Точность показаний электронных барометров зависит от точности их калибровки, эффективности температурной компенсации (от остаточного давления воздуха в чувствительном элементе, температуры, качества термостата) и изменения их калибровки со временем.

К основным датчикам могут присоединяться цепи, которые корректируют основной выходной сигнал на нелинейность датчика и воздействие температуры и переводят выходные значения в стандартные единицы. В состав современного стандартного барометра входят датчик давления, микрокомпьютерное устройство (включая дисплей) и цепь интерфейса для связи с любым регистратором данных или с автоматической метеорологической станцией.

Электронные барометры, имеющие несколько датчиков или чувствительных элементов, обычно рассчитывают средневзвешенное значение по каждому датчику и результирующее выходное значение давления с точностью 0,1 гПа. Во время калибровки каждый чувствительный элемент может быть проверен с точностью 0,01 гПа. Это, тем не менее, не должно привести операторов к мысли о том, что чувствительность датчика выше 0,1 гПа (см. раздел 3.10.3.4).

3.3.5 Ошибки и погрешности электронных барометров

3.3.5.1 Изменение в калибровке. Дрейф калибровки.

Изменение в калибровке является одним из основных источников ошибки электронных барометров. Оно часто является большим, если барометр новый; со временем это отклонение уменьшается. Могут возникать скачкообразные изменения в калибровке.

Чтобы обеспечить надежную работу барометра, поправки калибровки, применяемые к показаниям, должны проверяться сравнительно часто, например, ежегодно с тем, чтобы своевременно обнаружить и заменить неисправные датчики.

Необходимость частой проверки калибровки электронных барометров ложится дополнительным бременем на национальные метеорологические службы, особенно на те, которые имеют обширные сети барометров. Затраты на эти калибровки должны приниматься во внимание при планировании замены ртутных барометров электронными.

3.3.5.2 Температура

Электронные барометры следует содержать при постоянной температуре с тем, чтобы сохранялась калибровка. Желательно также, чтобы эта температура была близкой к температуре калибровки. Однако многие имеющиеся в продаже электронные барометры не проверяются на зависимость их показаний от температуры, в результате им присущи большие ошибки. Эти ошибки в основном зависят от точности измерения температуры чувствительного элемента и точности электронной коррекции давления в предположении, что в чувствительном элементе барометра нет термических градиентов. В тех случаях, когда изменения температуры происходят довольно быстро, возможны временные ошибки при измерении давления за счет гистерезиса.

Изменения в калибровке также в значительной мере зависят от термической истории барометра. Продолжительное воздействие температур, отличающихся от температуры калибровки, может привести к существенным изменениям в калибровке, как временным, так и постоянным.

Если барометры не находятся при той же температуре, что и температура элемента, то возможно также появление ошибок за счет электронной части барометров. Электронные барометры часто применяются в экстремальных климатических ситуациях, особенно при использовании в автоматических метеорологических станциях. При таких ситуациях барометр может испытывать колебания температуры, превышающие пределы, предусмотренные проектом изготовителя и спецификацией калибровки.

3.3.5.3 Электрические помехи

Как и все чувствительные электронные измерительные приборы, электронные барометры следует защищать и содержать вдали от источников сильных магнитных полей, таких, как трансформаторы, компьютеры, радиолокаторы и т.д. Это не всегда является проблемой, но может привести к увеличению шума, в результате чего понижается точность прибора.

3.3.5.4 Характер работы

Заметные изменения в калибровке электронного барометра могут быть вызваны разницей работы барометра во время калибровки и при его оперативном использовании. Барометр, который работает постоянно и поэтому прогрет, будет показывать иное давление по сравнению с барометром, с которого считываются показания методом пульсации каждые несколько секунд.

3.4 БАРОМЕТРЫ-АНЕРОИДЫ

3.4.1 Требования к конструкции

Обычный барометр-анероид имеет значительные преимущества по сравнению с ртутным барометром вследствие его компактности и портативности, что делает его особенно удобным для использования в море или в полевых условиях. Основными частями анероида являются закрытая металлическая коробка, из которой полностью или частично выкачан воздух, и сильная система пружин, которая защищает коробку от деформации в условиях внешнего атмосферного давления. При любом определенном давлении будет соблюдаться равновесие между силой внешнего давления и силой противодействия пружины.

Коробка анероида может изготавливаться из материалов (сталь или бериллиевая медь), которые обладают такими эластичными свойствами, что коробка сама может действовать как пружина.

Необходимо какое-то средство для обнаружения и фиксирования деформации коробки. Это может быть система рычагов, которые усиливают деформацию и передвигают стрелку по шкале, проградуированной в единицах давления. В качестве другого принципа действия может использоваться световой луч, отклоняющийся в пределах шкалы. Вместо этих механических средств некоторые барометры снабжены микрометром с ручной настройкой, счетчик которого показывает давление в десятых долях гектопаскаля. Показания снимают в тот момент, когда светящийся индикатор сигнализирует о контакте микрометра с барокоробкой анероида. Анероид этого типа портативен и прочен.

3.4.2 Требования к точности

Основными требованиями к хорошему барометру-анероиду являются следующие:

(a) он должен компенсировать температурные колебания так, чтобы при изменении температуры на 30 К отсчеты анероида изменялись не более, чем на 0,3 гПа;
(b) ошибки шкалы в любой точке не должны превышать 0,3 гПа и должны оставаться в этих пределах не менее года при нормальной эксплуатации;
(c) гистерезис должен быть достаточно малым, таким, чтобы различие в показаниях перед изменением давления на 50 гПа и после возвращения к первоначальному значению было не более 0,3 гПа;
(d) он должен противостоять обычным транзитным рискам и сохранять свои характеристики в пределах указанных допусков.

3.4.3 Снятие показаний барометров-анероидов

3.4.3.1 Точность снятия показаний

Барометр-анероид должен находиться всегда в том же положении (вертикальном или горизонтальном), в котором он калибровался. Перед отсчетом показаний по барометру необходимо слегка постучать. По возможности, показания необходимо снимать с точностью до 0,1 гПа. Для улучшения точности отсчетов и уменьшения ошибок, обусловленных применением механических рычагов, имеются оптические и цифровые приборы.

3.4.3.2 Поправки к барометрам-анероидам

Как правило, барометр-анероид должен быть установлен так, чтобы измерять давление на уровне его установки. На борту корабля или на наземных станциях, расположенных на небольших высотах, прибор может быть установлен таким образом, чтобы показывать давление, соответствующее среднему уровню моря при условии, что разность между давлением на станции и на уровне моря можно считать постоянной. В отсчеты должны вводиться инструментальные поправки; кроме того в приборе предусмотрена компенсация на температуру, и нет необходимости в поправке на ускорение силы тяжести.

3.4.4 Ошибки и погрешности барометров-анероидов

3.4.4.1 Неполная компенсация на температуру

Ослабление пружины в барометре-анероиде из-за повышения температуры приводит к завышению показаний давления. Этот эффект обычно устраняется одним из следующих способов:
(a) посредством применения биметаллического компенсатора в системе рычагов или;
(b) с помощью некоторого количества газа, оставленного внутри анероидной коробки.

В большинстве барометров-анероидов обычного типа компенсация с помощью этих методов бывает полной только при каком-то одном значении давления. Желательно, чтобы все барометры-анероиды и барографы, используемые на метеорологических станциях, были хорошо компенсированы на температуру по всему диапазону давления. В цифровых системах считывания, пригодных для автоматизации, такие суммарные поправки могут применяться, как часть электронной системы.

3.4.4.2 Погрешности упругости

Барометр-анероид может подвергаться значительным и быстрым изменениям при воздействии давления. Так, например, при сильном порыве ветра барометр-анероид будет испытывать резкое увеличение давления, после чего последует более плавное возвращение к первоначальному значению. В таких случаях вследствие гистерезиса прибор будет показывать значения давления, несколько отличные от действительных, и потребуется какое-то время, прежде чем эта разница станет незначительной. Но поскольку анероиды и барографы на наземных станциях обычно не подвергаются значительным изменениям давления, их погрешности из-за гистерезиса небольшие.

Существуют также постоянные ошибки из-за медленных изменений свойств металла анероидной коробки. Поправка на этот эффект может быть получена путем сравнения через определенные интервалы времени, например, ежегодно со стандартным барометром. Хороший барометр-анероид должен сохранять точность 0,1 гПа в течение года или более. В целях определения отклонения от этой точности отдельных барометров необходимо установить процедуру регулярной поверки с проведением по необходимости калибровки и корректировки.

3.5 БАРОГРАФЫ

3.5.1 Общие требования

Из всего многообразия барографов здесь будет подробно рассмотрен только анероидный барограф. Рекомендуется, чтобы ленты барографов, используемых для синоптических целей, отвечали следующим требованиям:
(a) были проградуированы в гПа;
(b) давали возможность производить отсчет с точностью до 0,1 гПа;

(c) имели масштабный коэффициент 10 гПа на каждые 1,5 см ленты.

Кроме того, желательно, чтобы барографы отвечали следующим требованиям:

(a) в барографе должен использоваться первоклассный анероид (см. раздел 3.5.2);
(b) барограф должен быть компенсирован на температуру таким образом, чтобы при изменении температуры на 20 К, его показания изменялись не более чем на 1 гПа;
(c) ошибки шкалы в любой точке не должны превышать 1,5 гПа;
(d) гистерезис должен быть достаточно малым, таким, чтобы различие в отсчетах перед изменением давления на 50 гПа и после возвращения к первоначальному значению не превышало 1 гПа;
(e) прибор должен снабжаться устройством для отметок времени, позволяющим делать засечки при закрытой крышке;
(f) держатель пера должен поворачиваться в «вилке», ось которой наклонена таким образом, чтобы перо покоилось на ленте под действием силы тяжести; установка пера в определенное положение должна обеспечиваться регулировочным механизмом.

К морским барографам предъявляются особые требования, которые рассматриваются в части II, глава 4.

3.5.2 Устройство барографов

Принцип устройства анероидного барографа аналогичен принципу барометров-анероидов, за исключением того, что вместо стрелки используется пишущее перо. С этим связаны некоторые изменения в конструкции выводной трубы кожуха, и обычно уменьшение и увеличение количества и размера используемых мембран.

«Нормированную» реакцию барографа можно определить как силу, необходимую для перемещения пера на единицу шкалы (1 гПа) т. е. силу, которая требуется для удержания пера на месте при изменении давления на 1 гПа. Эта мера необходима для преодоления влияния трения, чтобы обеспечить детальную запись.

Сила, которая требуется для преодоления движения диафрагмы, когда давление изменяется на 1 гПа, равна 100 А ньютонов, где А – действительная площадь поперечного сечения мембраны в квадратных метрах. Если усилие равно Х, сила, которая необходима для удержания пера на месте, составляет 100 А/Х ньютонов и изменяется как А/Х. Для определенного типа мембраны и масштаба шкалы значение Х в основном не зависит от А, и, таким образом, нормированное перемещение пера барографа можно считать примерно пропорциональным действительной площади поперечного сечения мембраны.

3.5.3 Источники ошибок и неточностей

Кроме уже упомянутых источников ошибок барометра-анероида (см. раздел 3.4.4), в барографе источником ошибок является трение между пером и бумагой, которое бывает значительным. Нормированное перемещение пера зависит главным образом от действительного поперечного сечения анероидной коробки. В хорошем барографе трение пера значительно выше, чем общее трение всех осей и опор прибора, и поэтому необходимо обращать особое внимание на уменьшение таких ошибок по этой причине, например, за счет применения анероидной коробки достаточно большого размера.

Первоклассный барограф должен иметь погрешность не более 0,2 гПа после внесения поправок и должен сохранять эту точность в течение одного-двух месяцев. Значение барической тенденции такого барографа обычно отсчитывается с этой же точностью.

3.5.4 Приборы с возможностью обработки данных

Барометр, пригодный для автоматического считывания показаний, может быть присоединен к вычислительному устройству, обычно к микропроцессору, который может быть запрограммирован на обеспечение должным образом отобранных данных. Эти данные также могут быть представлены графически для получения записи, аналогичной записи барографа. Имеются модели, которые печатают данные в собственных масштабах, исключая таким образом, источник ошибки.

3.5.5 Снятие показаний барографа

Показания барографа снимаются так, чтобы не касаться прибора. Отметка времени и любой осмотр прибора, включающий поднятие крышки и т. п., следует всегда производить после того, как полностью сделан отсчет.

3.5.5.1 Точность снятия показаний

Отсчет по ленте прибора должен производиться с точностью до 0,1 гПа. Барическую тенденцию следует отсчитывать с такой же точностью.

3.5.5.2 Поправки, вводимые в показания барографа

Перед использованием каждого прибора необходимо проверить его компенсацию на температуру. Масштабный коэффициент регулируется при проверке в вакуумной камере. Если барограф используется только для определения барической тенденции, поправки в его показания обычно не вводят. В этом случае точная установка пера не имеет значения. Если барограф используется для получения абсолютных значений давления, то показания барографа необходимо сравнивать с исправленными отсчетами ртутного барометра или хорошего барометра-анероида, по крайней мере, один раз в сутки. Искомые значения поправок можно определять методом интерполяции.

3.6 БАРОМЕТРЫ С ТРУБКОЙ БУРДОНА

Барометры с трубкой Бурдона обычно состоят из чувствительного элемента, форма которого, как и мембраны анероида, изменяется при изменении давления (датчики давления), и датчика, который трансформирует эти изменения в форму, непосредственно используемую наблюдателем. Индикаторное устройство может быть удалено от чувствительного элемента. Точные и устойчивые цифровые приборы с кварцевыми трубками Бурдона используются в качестве рабочих стандартных барометров в калибровочных лабораториях.

3.7 БАРИЧЕСКАЯ ТЕНДЕНЦИЯ

Станции, проводящие наблюдения, по меньшей мере, каждые 3 часа, могут пользоваться двумя методами:

(a) тенденцию можно определить по показанию барографа;
или

(b) тенденцию можно определить по соответствующим показаниям барометра, приведенным к уровню станции; при выборе между обычным ртутным барометром и первоклассным барометром с открытой шкалой предпочтение отдается последнему по причинам, изложенным в следующем параграфе.

Ошибки, возникающие при снятии показаний барометра, при условии его хорошей работы обычно являются случайными. Поэтому при определении значения тенденции, при вычитании двух показаний, ошибки могут складываться. Ошибки барографа частично имеют систематический характер, поэтому в течение сравнительно короткого трехчасового периода они должны иметь одинаковый знак и уменьшаться при вычитании.

Другим доводом в пользу использования барографа является то, что его показания не нужно приводить к уровню станции. Поэтому именно барограф должен применяться для определения характеристики барической тенденции.

Барометры с цифровым выходом тоже очень удобны для определения значения и характера изменения давления.

3.8 ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К РАЗМЕЩЕНИЮ

Важное значение имеет тщательный выбор местоположения барометров на наблюдательных станциях. К основным требованиям относятся постоянство температуры, хорошее освещение, отсутствие сквозняков, прочное и вертикальное положение, а также защита от грубого обращения. В этой связи прибор должен висеть или располагаться в помещении, в котором температура является постоянной или ее изменения происходят медленно, и при этом не возникают градиенты температуры. Барометр должен быть защищен от прямых солнечных лучей в любое время; его также не следует располагать вблизи нагревательных приборов или на сквозняке.

3.8.1 Влияние ветра

Следует отметить, что ветер оказывает воздействие на все типы барометров: Более подробные данные о воздействии ветра можно получить из работы Liu and Darkow (1989).

Барометр не даст точное показание статического давления, если на него оказывает влияние порыв ветра. Его показания будут флуктуировать в зависимости от скорости и направления ветра, величины и знака флуктуации ветра, зависящих от характера открытых проемов помещения и их положения по отношению к направлению ветра. На море ошибка всегда присутствует в связи с движением судна. Аналогичная проблема возникает, если барометр установлен в помещении с кондиционером.

Ветер часто может вызывать динамические изменения давления в помещении, где располагается барометр. Эти изменения накладываются на статическое давление и при сильном и порывистом ветре могут

достигать 2 или 3 гПа. Обычно не имеет смысла вводить коррекцию на такие флуктуации, поскольку «накачивающее» воздействие на поверхность ртути зависит, как от направления, так и от силы ветра, а также от местных условий, в которых находится барометр. Таким образом, даже «среднее значение» не представляет собой действительное статическое давление. Поэтому при сравнении двух барометров, находящихся в различных зданиях, необходимо иметь в виду, что возможны различия в показаниях вследствие влияния ветра.

Это влияние можно существенно уменьшить с помощью статической насадки между атмосферой снаружи и входным отверстием датчика. Подробные сведения, касающиеся принципов использования статических насадок, можно найти в различных публикациях (Miksad, 1976; United States Weather Bureau, 1963). В ртутном барометре резервуар должен быть сделан из воздухонепроницаемого материала, за исключением вывода к специальной насадке, открытой для воздействия атмосферы, и сконструирован таким образом, чтобы давление внутри него было реальным статическим давлением. Анероидные и электронные барометры обычно имеют простые соединения, позволяющие использовать статическую насадку, которая должна находиться на открытой местности и не подвергаться воздействию расположенных поблизости зданий. Выбор конструкции такой насадки требует особого внимания. Насадки статического давления коммерчески доступны, однако опубликованных данных взаимосравнений для демонстрации их характеристик не имеется.

3.8.2 Воздействие кондиционирования воздуха

Кондиционирование воздуха может вызвать значительную разность давления внутри и снаружи помещения. Поэтому если барометр устанавливается в помещении, где есть кондиционер воздуха, то следует использовать статическую насадку с барометром, которая соединит его с воздухом снаружи здания.

3.9 РАЗМЕЩЕНИЕ БАРОМЕТРОВ

3.9.1 Размещение ртутных барометров

Общие требования к размещению ртутных барометров изложены в предыдущих разделах. Кроме уже упомянутых требований к размещению ртутных барометров, имеются также дополнительные требования. Всегда предпочтительнее, чтобы ртутный барометр висел на внутренней части стены. Для очень точной работы лучшим является размещение в закрытом и не обогреваемом шкафчике с небольшим электрическим вентилятором, предотвращающим любую стратификацию температуры.

Для получения однородного освещения при снятии показаний барометра рекомендуется использовать искусственное освещение для всех наблюдений. Для этой цели годится осветитель, который может обеспечивать светлый и слегка светящийся фон для ртутного мениска и, если необходимо, для начальной точки отсчёта. Если источник света не используется, то следует уделять особое внимание тому, чтобы мениск и начальная точка имели светлый фон, для чего можно использовать такие средства, как кусочки матового стекла, белого целлулоида или кусок белой бумаги. Искусственное освещение должно быть обеспечено также при отсчетах по шкале барометра и термометру-атташе. Однако необходимо принять меры против нагревания барометра от искусственного света при снятии отсчетов.

Барометр должен быть установлен в таком месте, где нет вибрации, желательно на твердой стене. Прибор должен быть установлен вертикально. Ошибки за счет отклонения от вертикального положения чаще возникают у несимметричных барометров. Такие барометры должны устанавливаться с учетом вертикальности их наибольшей оси. Это можно обеспечить такой установкой барометра, при которой правильное положение поверхности ртути по отношению к начальной точке остается точным даже после отклонения прибора от вертикали.

Для защиты барометра от неосторожного обращения, пыли и воздушных порывов прибор рекомендуется поместить в шкафчик с навесной дверцей и обеспечить достаточную вентиляцию, предотвращающую стратификацию воздуха внутри.

При транспортировке ртутного барометра следует проявлять большую осторожность. Самым надежным способом является перевозка барометра вверх чашкой в деревянном ящике с ремнем. Если барометр не может сопровождаться ответственным лицом, то он должен перевозиться в удобной таре, снабженной пружинами, в таком положении, чтобы его чашка всегда была вверху. Барометр не должен подвергаться резким толчкам, и переворачивать его необходимо очень медленно. При переворачивании некоторых типов барометров должна соблюдаться особая предосторожность.

3.9.2 Размещение электронных барометров

Электронные барометры должны размещаться в сухой чистой атмосфере, где нет веществ, вызывающих

коррозию. Барометр также должен содержаться при постоянной температуре (см. раздел 3.3.5.2). Барометр следует устанавливать таким образом, чтобы избегать механических толчков и вибрации. Его также следует помещать вдали от источников электромагнитного излучения или, если это невозможно, следует экранировать кабельные соединения и кожух.

Барометры с цифровыми табло должны устанавливаться таким образом, чтобы было общее хорошее освещение, однако они не должны располагаться перед окном или сильным источником света.

3.9.3 Размещение барометров-анероидов

Требования к расположению барометров-анероидов аналогичны требованиям, предъявляемым к размещению ртутных барометров (см. раздел 3.9.1), поскольку в этих приборах не в полной мере компенсируются воздействия температуры. Выбирать место для установки прибора следует так, чтобы была сравнительно постоянная температура в течение всего дня. Таким образом, это должно быть место, которое экранировано от прямых солнечных лучей, а также от других источников тепла или холода, которые могут привести к резким и заметным изменениям его температуры.

На наземных станциях установка барометра-анероида вблизи ртутного барометра позволяет производить взаимную проверку и стандартизацию приборов (см. раздел 3.10).

3.9.4 Размещение барографов

Барограф должен устанавливаться в таком месте, где он защищен от внезапных изменений температуры, вибрации и пыли. Он не должен подвергаться воздействию прямых солнечных лучей. Барограф также должен располагаться в таком месте, которое недоступно для лиц, не имеющих разрешения пользоваться им. Установка на губчатой каучуковой подушке является удобным способом уменьшения воздействий вибрации. Выбранное место должно быть сухим и чистым. В нем также должно быть как можно меньше таких веществ в воздухе, которые вызывают коррозию, загрязнение механизма и т. п.

Важно также, чтобы прибор был установлен таким образом, чтобы его шкала при обычных условиях работы находилась на удобной для снятия показаний высоте с тем, чтобы свести к минимуму явление параллакса. Барограф должен располагаться таким образом, чтобы он равномерно освещался; в случае необходимости следует воспользоваться искусственным освещением.

Если барограф нужно перевезти на самолете или на большой высоте, держатель пера должен быть отведен от барабана и, кроме того, должны быть приняты меры предосторожности, позволяющие механизму противостоять перегрузке, вызванной превышением обычного диапазона работы прибора.

3.10 СРАВНЕНИЕ, КАЛИБРОВКА И ОБСЛУЖИВАНИЕ

3.10.1 Общие требования к поверке барометров

Учитывая необходимость получения точных данных давления, особенно для аэронавигационных и синоптических целей, а также подверженность ртутных барометров различного рода ошибкам, все станционные барометры должны регулярно поверяться инспектором. Некоторые рекомендации, касающиеся используемого для поверок оборудования, частоты, с которой они должны проводиться, а также других связанных с этим вопросов, даются в последующих разделах. Там, где точные барометры-анероиды используются как станционные барометры, их следует часто (по меньшей мере, один раз в неделю) сверять с ртутным барометром, а записи всех таких поверок должны заноситься на специальную карту или в специальный журнал.

Можно обойтись без ртутных барометров, если производится ежедневная сверка со вторым барометром-анероидом, имеющимся на станции, и анализ давления в близлежащем районе. Такие мероприятия должны поддерживаться полугодовыми сравнениями с переносным стандартным барометром.

Для обозначения различных категорий барометров, используемых в национальной метеорологической службе, могут применяться следующие символы:

A: основной или вторичный стандартный барометр, измерение давления по которым производится с точностью по крайней мере, 0,05 гПа;

B: рабочий стандартный барометр конструкции, удобной для обычных сравнений давления, с известными погрешностями, которые установлены в результате сравнения с основным или вторичным стандартным барометром;

C: эталонный стандартный барометр, используемый для сравнений с переносным стандартным или станционным барометрами на функционирующих станциях национальной метеорологической службы;

S: барометр (ртутный, анероидный, электронный), находящийся на обычной метеорологической станции;

P: ртутный барометр высокого качества и точности, который может переноситься с одной станции на другую и при этом сохранять характеристики калибровки;
N: переносной точный барометр-анероид высшего качества;
Q: портативный прецизионный цифровой барометр высшего качества, используемый в качестве переносного эталона (Q означает качество);
M: портативный микробарограф хорошего качества и точности.

Для осуществления программы сравнений барометров на единой основе всеми национальными метеорологическими службами желательно, чтобы применялось одинаковое оборудование, частота сравнений и методы их проведения, единая процедура изменений в инструментальной поправке и критерии по устранению недостатков.

3.10.2 Оборудование, используемое для поверки барометров

3.10.2.1 Основной стандартный барометр

Существуют различные мнения относительно наилучшего типа основного стандартного барометра. В нижеследующих параграфах рассматриваются два типа.

Одним из типов основного стандартного барометра для измерения атмосферного давления является точный весовой контрольно-измерительный прибор, который измеряет калиброванное давление путем взвешивания на точных весах с учетом местной силы тяжести. Этот тип барометра является сравнительно простым, и на его показания практически не влияет загрязненная среда по сравнению с ртутными барометрами.

В качестве основного стандартного барометра может также использоваться высококачественный ртутный барометр, специально сконструированный для этой цели. Основной стандартный ртутный барометр должен иметь высокий вакуум, содержать очень чистую ртуть с хорошо известной плотностью, которая сохраняется при постоянной температуре, и располагаться в среде, где воздействие загрязнения исключается. Барометр также должен иметь откалиброванную шкалу и средства оптического считывания показаний. Барометр такого типа измеряет абсолютное давление с более высокой точностью, чем весовой прибор.

3.10.2.2 Рабочий стандартный барометр

Рабочие и эталонные стандартные барометры, а также переносные стандартные барометры, используемые для сравнения барометров, должны иметь очень высокую стабильность в течение длительных периодов времени. Эти барометры могут быть либо ртутными, либо электронными. Ртутные барометры должны иметь трубку с диаметром отверстия, по меньшей мере, 12 мм. Желательно также, чтобы в этих приборах можно было проверить вакуум. Они должны быть тщательно откорректированы на все известные погрешности, которые устанавливаются во время двух или более последних сравнений с барометрами высшей категории.

3.10.2.3 Переносной стандартный барометр

Переносной стандартный барометр должен сохранять свою инструментальную поправку в течение транспортировки в пределах 0,1 гПа. Он должен быть стандартизирован путем сравнения с рабочим или эталонным стандартным барометром до и после транспортировки. Стандартизированный барометр ни в коем случае не следует открывать или корректировать до прибытия на станцию, где будет проводиться сравнение. Переносные стандартные барометры необходимо перемещать в высококачественном переносном ящике с хорошей амортизацией.

Перед транспортировкой переносной ртутный стандартный барометр следует внимательно осмотреть и проверить на предмет того, что ртуть в трубке и кожух являются чистыми, что в трубке нет пузырьков, и что вакуум над ртутью в трубке является хорошим. Следует предпринять все меры предосторожности при упаковке и транспортировке этих приборов с тем, чтобы свести к минимуму любые причины (какими бы незначительными они ни были), которые могут привести к изменению их инструментальной поправки. Следует избегать быстрых резких движений, что может привести к появлению воздушных пузырьков из трубки кожуха, которые поднимутся в верхнюю часть трубки барометра. Ртутные переносные стандартные барометры должны переноситься в удобном амортизирующем кожаном или металлическом чемодане, при этом конец чашки всегда должен находиться выше конца трубки.

3.10.2.4 Спецификации переносных ртутных барометров (P)

Если ртутный барометр должен использоваться в качестве барометра категории P, он должен быть сконструирован таким образом, чтобы можно было проверять вакуум или создавать в верхней части трубки достаточный вакуум с помощью вакуумного насоса. Очень важно наличие контрольного клапана для герметизации трубки. Кроме того, прибор должен сохранять высокую стабильность в течение длительного времени и иметь трубку диаметром, по меньшей мере, 12 мм. Желательно также иметь возможность контролировать, остается ли

постоянным количество ртути в чашке с момента ее первоначального наполнения.

Кроме того, в качестве переносного стандартного барометра используется хорошо сделанный барометр Фортеня с трубкой диаметром, по меньшей мере, 9 мм, но предпочтительнее 12 мм. Необходимая степень точности переносных стандартных барометров при неоднократном измерении постоянного давления составляет около 0,1 гПа. Барометры категории P следует калибровать по всем диапазонам значений давления и температуры, которые могут встретиться.

3.10.2.5 Спецификации переносных электронных барометров (P)

Переносные электронные барометры в настоящее время представляют собой довольно совершенные и надежные приборы, что позволяет использовать их в качестве барометров категории P. Барометр должен иметь историю надежности – устойчивые поправки, определенные в результате нескольких сравнений со стандартным барометром в течение года или более в том диапазоне давления, в котором барометр должен работать.

Предпочтение отдается электронным барометрам с несколькими датчиками давления, работающими под управлением независимого микропроцессора. Необходимо удостовериться в точности механизма компенсации температуры барометра. Метод измерения давления должен быть бесконтактным, а сам барометр должен быть достаточно прочным и выдерживать удары, которые могут возникнуть во время транспортировки.

3.10.3 Сравнение барометров

3.10.3.1 Международные сравнения барометров

Международным сравнениям барометров придается большое значение. Сравнение ВМО автоматических цифровых барометров проводилось в Де Билте (Нидерланды) в период с 1989 по 1991 гг. Только благодаря таким сравнениям можно обеспечить сопоставимость национальных стандартных приборов, измеряющих давление, и таким образом предотвратить несогласованность данных давления в международном масштабе. Рекомендуемая процедура таких сравнений приводится в разделе 3.10.4.

В программу сравнений входит следующее:

(a) сравнение национального рабочего стандартного барометра B с основным или вторичным стандартным барометром A, по меньшей мере, один раз в два года. Если барометры A и B находятся в одном и том же центре, то переносные стандартные барометры не нужны;

(b) сравнение эталонного стандарта C с национальным рабочим стандартом B, по меньшей мере, один раз в два года с помощью переносных стандартных барометров;

(c) сравнение станционного барометра S с эталонным стандартом C, по меньшей мере, один раз в год с помощью переносных стандартных барометров или сравнение с рабочим стандартным барометром B один раз в два года, в зависимости от известных характеристик барометров, которые используются. Проведение сравнений на станции и на центральном объекте калибровки зависит от политики, проводимой в области сравнений. В последнем случае не требуются переносные стандартные барометры.

Следует знать, что погрешность каждого барометра в конце любого звена в цепи сравнений определяется по отношению к основному или вторичному стандартному барометру A, так что полученные в результате откорректированные показания барометров носят абсолютный характер на каждой ступени.

3.10.3.2 Инспекция станционных барометров

Для инспекции станционных барометров пригодными являются барометры Фортеня с трубкой, имеющей внутренний диаметр 9 мм; однако, следует принять во внимание раздел 3.2.7.3 по ограничениям транспортировки ртутных приборов. В качестве переносных стандартных барометров могут также использоваться точные барометры-анероиды и электронные барометры при условии, что они обладают достаточной стабильностью и точностью. Рекомендуется, чтобы одновременно использовалось три и более таких приборов с тем, чтобы любое изменение в каком-либо из них можно было немедленно обнаружить. Барометр-анероид, используемый для этой цели, не должен подвергаться воздействиям гистерезиса. Кроме того, он должен иметь незначительный температурный коэффициент. Такие характеристики можно получить только путем использования специальных материалов и конструкций. Важной характеристикой работоспособного прибора является также то, что коробка анероида не должна быть нагружена индикаторным механизмом. В качестве переносных стандартных барометров хорошо подходят для использования барометра.

3.10.3.3 Процедура сравнения ртутных барометров

Барометры с цифровым выходом при условии, что они обладают достаточно хорошей стабильностью.

При сравнении необходимо следовать инструкциям, изложенным в предыдущих разделах. Все обычные меры, которые требуются при установке и снятии показаний барометров, должны соблюдаться с еще большим вниманием. Исследования показывают, что в случае принятия достаточных мер предосторожности при сравнениях барометров можно достичь точности в среднем 0,05 гПа.

При сравнении показания барометров должны вноситься в соответствующие формуляры. К прибору должна прилагаться постоянная запись всех поверок, включающая такую информацию, как дата поверки, температура и давление, при которых проводилось сравнение, и полученные поправки.

Отчеты о сравнении барометров должны направляться в штаб-квартиру национальной метеорологической службы для оценки ошибок, вычислений и получающихся поправок, а также для определения необходимых корректирующих действий. Непрерывные записи данных сравнений необходимо накапливать по каждому станционному барометру для изучения его работы в течение нескольких лет и определения дефектов. В программе контроля качества барометров можно использовать табличные и /или графические данные.

3.10.3.4 Поверка электронных барометров

На современном этапе развития важным является проведение калибровки электронных барометров с интервалами около одного года. Стандартная процедура состоит в том, чтобы проводить калибровку электронного барометра на соответствующем объекте калибровки непосредственно перед отправкой на метеорологическую станцию. На станции следует провести ряд сравнений показаний электронного и переносного стандартного барометров в течение нескольких дней. Показания следует снимать со всех барометров на одной и той же высоте, когда скорость ветра составляет менее 12 м/с и когда давление либо стабильное, либо изменяется менее чем на 1 гПач$^{-1}$. Каждый электронный барометр, среднее отклонение показаний которого от показаний переносного стандартного барометра превышает 0,25 гПа, должен считаться непригодным к использованию, и возвращен на объект калибровки для повторной поверки.

Рекомендуется, если это возможно, установить на метеорологической станции два независимых электронных барометра, при этом желательно, чтобы один барометр имел устойчивые небольшие поправки. Этот барометр определяется персоналом на объекте калибровки по истории калибровки и считается барометром с незначительными поправками. По получении на станции каждого нового барометра проводится ряд сравнений его показаний, как указано выше, и устанавливается среднее отклонение показаний нового барометра от показаний барометра с незначительными поправками. После этого следует провести ежедневные снятия показаний обоих барометров и затем рассчитать новое среднее из 25 отклонений. Если новый барометр и барометр с небольшими поправками показывают различные уровни отклонений, то среднее из 25 отклонений изменится по сравнению с первоначальным средним. Если на станции имеется один ртутный и один электронный барометры, то нормальным считается ртутный барометр с небольшим отклонением. Тем не менее, небольшое отклонение ртутного барометра следует проверить путем регулярных проверок калибровки.

Эти проверки не являются инспекцией или новой калибровкой электронного барометра. Каждая национальная метеорологическая служба должна учредить подробные процедуры инспекции и калибровки своих электронных барометров, используя вышеупомянутый метод в качестве практического руководства.

3.10.4 Общая процедура, рекомендуемая для проведения сравнения барометров в разных местах

Сравнение барометров является необходимым и может быть произведено следующим образом:

(a) если барометр «1» сравнивается с барометром «2», то квалифицированный наблюдатель должен перенести три или более переносных стандартных барометра, предпочтительно типа P, от барометра «1» к барометру «2» и затем вернуться к барометру «1», замыкая таким образом круг. Эту процедуру можно использовать для сравнения барометров разных стран и внутри страны. Барометр «1» обычно находится в центральной лаборатории национальной организации стандартов или в лаборатории национальной метеорологической службы. Барометр «2» находится в каком-либо другом месте. Переносить приборы типа N и M необязательно, а микробарографы типа M можно не использовать вообще, если в двух пунктах установлены микробарографы хорошего качества;

(b) для целей стандартизации переносные стандартные приборы должны располагаться рядом со сравниваемым барометром; для проведения сравнений все приборы должны быть подготовлены, по меньшей мере, за сутки до начала официальных снятий показаний. Поток воздуха

от электрического вентилятора, направленный на приборы, поможет выровнять их температуру. Температура в помещении должна поддерживаться, насколько это возможно, одинаковой;

Примечание: Вентилятор следует выключить перед началом сравнений.

(c) если прибор M показывает, что давление быстро изменяется, то снимать показания для сравнения не следует. Для проведения сравнений предпочтительны периоды спокойного состояния барометров (давление является постоянным или изменяется очень медленно;

(d) снимать показания при сравнении следует в течение одинаковых интервалов времени продолжительностью не менее 15 минут;

(e) опыт показывает, что в целях стандартизации на обычных станциях для сравнения барометров категории S необходимо снять, по меньшей мере, пять показаний. Для стандартизации барометров категории. A, B или C необходимо снять, по меньшей мере, 10 сравнительных показаний барометра;

(f) если позволяют метеорологические условия, то в последних случаях при сравнении следует снимать показания при разном давлении – при высоком и при низком;

(g) записи должны включать отсчеты по термометрам-атташе, показания переносных стандартных и сравниваемых барометров, скорость, направление и порывистость ветра, поправки на силу тяжести, температуру и погрешности прибора, фактическую высоту над уровнем моря нулевой отметки барометров, широту, долготу, название места, дату и время проведения наблюдений;

(h) показания приборов N. в случае их использования, должны сравниваться с показаниями двух или более точных барометров-анероидов, скорректированных на общей основе, если проверка по приборам категории A или B показывает, что они различны по калибровке. Показания барометров-анероидов считаются корректными, если находятся в допустимых пределах измерения давления данным прибором, иначе сравнения будут недействительными;

(i) что касается сравнения переносных стандартных барометров с барометром «1», то барометр «1» должен быть стандартом самого высокого класса из имеющихся в отправном пункте. Барометр «1» должен быть категории A, B или Br (см. раздел 3.10.5.1), при этом барометр категории C является барометром с наименее приемлемым качеством. Необходимо провести два сравнения переносных барометров с барометром «1» в следующие моменты времени:

(i) до переноса стандартных барометров из отправного пункта, в котором расположен барометр «1», к месту расположения барометра «2»;

(ii) после возвращения переносных барометров к первоначальному пункту, т. е. когда они пройдут путь от барометра «1» к барометру «2» и обратно. Затем необходимо проверить эти два сравнения «до» и «после». Если показания каждого проверяемого прибора соответствуют показаниям барометра «1» в пределах удовлетворительных допусков, то считается, что результаты сравнения переносных стандартных барометров и барометра «2» также находятся в пределах тех же допусков при условии, что во время всех фаз процесса сравнения соблюдалась соответствующая предосторожность. Однако если существует значительное несоответствие или известно, что произошел какой-то срыв, в результате которого может испортиться прибор, или что надежность данных сомнительна по какой-либо причине, сравнения следует считать ненадежными и весь процесс следует повторить;

(j) все расхождения, в конечном счете, должны быть выражены, если это возможно, по отношению к показаниям основного или вторичного барометра категории A. Это дает общую основу для всех сравнений. В каждом случае в отчете о проведенных сравнениях должен быть указан используемый стандартный прибор;

Примечание: Когда будет принята программа, предусматривающая устранение остаточных ошибок барометра, появится однородная система данных барометрических наблюдений, подчиняющаяся единому стандарту и позволяющая производить устранения ошибок в горизонтальных градиентах давления, связанных с инструментальными источниками.

(k) сравнения барометров являются необходимыми как до, так и после перемещения барометров в лаборатории или на станции или же после очистки ртути с тем, чтобы своевременно обнаружить развитие дефекта.

3.10.5 Региональные сравнения барометров

3.10.5.1 Номенклатура и символы

Символы, обозначающие категории барометров, следующие:

A_r: барометр категории A, который выбирается по соглашению на региональном уровне в качестве эталонного стандарта для сравнения с барометрами этого региона;

B_r: барометр категории B, который национальные метеорологические службы региона согласны использовать в качестве стандартного барометра для региона в том случае, если барометра категории A нет в регионе.

В приложении 3.B содержится перечень региональных стандартных барометров.

3.10.5.2 Система межрегиональных сравнений

При планировании межрегиональных сравнений следует принимать во внимание следующие мероприятия:

(a) страны-члены в каждом регионе назначают основной или вторичный стандартный барометр A в качестве A_r для региона. Если в регионе нет основного или вторичного барометра, то в качестве регионального стандартного барометра для региона совместно назначается барометр категории B; выбранный таким образом барометр обозначают символом B_r. Относительные расходы определяют возможность региона назначить несколько стандартных барометров;

(b) Компетентное лицо, осуществляющее перевозку переносных стандартных барометров, отправляется от центральной станции, оборудованной барометром категории A_r в ближайший регион, оборудованный барометром, по меньшей мере, категории B или B_r. Затем осуществляется сравнение барометров в соответствии с методом, описанным в разделе 3.10.3. Иногда желательно в целях проверки и проведения взаимных сравнений повторить процесс, сравнивая барометр B_r с барометром категории A_r из другого региона;

(c) копии записей сравнений должны передаваться на каждую центральную станцию, оборудованную барометром категории A, а также на станцию, где расположен барометр B или B_r с которым проводилось сравнение. Результаты сравнений должны направляться во все национальные метеорологические службы региона, где есть барометры B или B_r.

3.10.5.3 Система международных сравнений в пределах региона

При планировании международных сравнений следует принимать во внимание следующие мероприятия:

(a) каждая национальная метеорологическая служба сравнивает свой барометр категории B с барометром категории A, если таковой имеется в регионе, используя процедуру, описанную в разделе 3.10.4. Там, где это возможно, предпочтение должно отдаваться барометру категории A, выбранному в регионе в качестве стандартного прибора для района;

(b) если в регионе нет барометра категории A, то барометры категории B соответствующей национальной метеорологической службы региона сравниваются с барометром категории B_r региона в соответствии с разделом 3.10.4;

(c) когда компетентное лицо проводит программу сравнений барометров B и B_r, то желательно, чтобы он проводил сравнения с барометрами категории B и C в местах, находящихся на его маршруте, при движении к станции и от станции, на которой расположен прибор B_r для региона;

(d) в соответствии с пунктом 3.10.5.2 (c) подготавливаются копии записей и сводки результатов сравнений, которые передаются заинтересованным учреждениям.

3.11 ПРИВЕДЕНИЕ ПОКАЗАНИЙ БАРОМЕТРА К ДРУГИМ УРОВНЯМ

Чтобы сравнить показания барометров различных станций, расположенных на разных высотах, необходимо привести эти показания к одному и тому же уровню. Для этого используются различные методы, однако ВМО пока еще не может рекомендовать какой-либо определенный метод, за исключением случая, когда станции расположены на небольшой высоте.

Рекомендуемый метод описан в публикациях ВМО (1954; 1964; 1968). В работе ВМО (1966) содержится комплексный набор таблиц и формул, которые используются для расчетов, связанных с давлением.

3.11.1 Стандартные уровни

На всех станциях, где это можно сделать с приемлемой точностью, наблюденное атмосферное давление должно быть приведено к среднему уровню моря (см. часть I, глава 1) Там, где это невозможно, станция, по региональному соглашению, должна сообщить либо геопотенциал на установленном для нее «постоянном уровне давления», либо давление, приведенное к установленному для этой станции уровню. Уровень, выбранный для каждой станции, должен сообщаться в Секретариат ВМО для опубликования.

Формула для приведения давления к среднему уровню моря, рекомендована для станций, расположенных на высотах ниже 750 м (Техническая записка ВМО № 61, стр. 22, уравнение 2):

$$\log_{10}\frac{p_0}{p_S} = \frac{K_p \cdot H_p}{T_{mv}} = \frac{K_p \cdot H_p}{T_S + \dfrac{a \cdot H_p}{2} + e_S \cdot C_h} \qquad (3.1)$$

где p_0 = Давление, приведенное к уровню моря в гПа; p_S = Давление на уровне станции в гПа; K_p = Константа = 0,0148275 К/гпм; H_p = Высота станции в гпм; T_{mv} = средняя виртуальная температура в К; T_S = Температура на станции в К; T_S = 273,15 + t, t = Температура на станции в °С; a = Принятый градиент в условном столбе воздуха от уровня моря до уровня высоты станции = 0,0065 К/гпм; e_S = Парциальное давление на станции в гПа; C_h = Коэффициент = 0,12 К/гПа.

Эта же формула часто используется в экспоненциальном виде :

$$p_0 = p_S \cdot \exp\left(\frac{\frac{g_n}{R} \cdot H_p}{T_S + \frac{a \cdot H_p}{2} + e_S \cdot C_h}\right) \qquad (3.2)$$

где g_n = стандартное гравитационное ускорение = = 9,80665 м/с^2; R = Газовая постоянная сухого воздуха = 287,05 Дж/кг/К.

3.11.2 Станции, расположенные на небольшой высоте

На станциях, расположенных на небольшой высоте (а именно, на станциях, расположенных на высоте менее 50 м над уровнем моря), отсчеты давления должны приводиться к среднему уровню моря посредством прибавления к давлению на станции константы приведения C, рассчитываемой по следующей формуле:

$$C = p \,.\, H_p / 29.27\ T_v \qquad (3.3)$$

где p – наблюдаемое давление на станции в гектопаскалях, H_p – высота станции над уровнем моря в метрах, и T_v – среднегодовое нормальное значение виртуальной температуры на станции в Кельвинах.

Примечание: Виртуальная температура влажного воздуха – это температура, которую имел бы при данном давлении сухой воздух той же плотности, что и влажный воздух. В публикации ВМО (1966) содержатся значения приращений виртуальных температур насыщенного воздуха при различных давлении и температуре.

Процедура приведения должна использоваться на станциях, расположенных на таких небольших высотах, для которых абсолютные экстремальные значения виртуальных температур эквивалентны T_v в приведенном уравнении; отклонение результата, обусловленное иными аппроксимациями указанного уравнения (используемого для высоты менее высоты стандартного геопотенциала и C, который должен быть менее P), не принимается во внимание при сравнении.

3.12 БАРИЧЕСКАЯ ТЕНДЕНЦИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКА БАРИЧЕСКОЙ ТЕНДЕНЦИИ

На станциях приземных синоптических наблюдений, барическая тенденция и характеристика барической тенденции должны определяться из наблюдений за последние 3 ч (за 24ч в тропических регионах). В основном, характеристика барической тенденции может быть выражена формой кривой, зарегистрированной барографом в течение 3-ч периода, предшествующего наблюдению (ВМО, 2003). В случае ежечасных наблюдений, количество и характеристика могут основываться только на четырех наблюдениях, что может привести к ошибочным толкованиям. Поэтому рекомендовано, чтобы характеристика определялась на основе более частых наблюдений, например, с 10-мин интервалами (ВМО, 1985). Определение девяти типов характеристик барической тенденции дается (см. ВМО, 1992b, стр. II-4-8).

ПРИЛОЖЕНИЕ 3.А

ПРИВЕДЕНИЕ ПОКАЗАНИЙ БАРОМЕТРА К СТАНДАРТНЫМ УСЛОВИЯМ

Инструментальная поправка

Остаточные погрешности в градуировке шкалы барометра должны быть определены путем сравнения со стандартным прибором. Они могут включать ошибки из-за неточного положения деления шкалы, капиллярности и низкого вакуума. В сертификатах с данными о сравнении со стандартным барометром должны указываться инструментальные поправки не менее чем в четырех точках шкалы, например через каждые 50 гПа. В хорошем барометре эти поправки не должны превышать несколько десятых долей гектопаскаля.

Поправки на силу тяжести

Показания ртутного барометра при данном давлении и температуре зависят от значения силы тяжести, которая, в свою очередь, изменяется с широтой и высотой. Барометры для метеорологических применений градуируются так, чтобы давать правильные значения давления при стандартном ускорении силы тяжести, равном 9,806 65 м/с^2 а их отсчеты при других значениях ускорения силы тяжести должны быть исправлены. Рекомендуется следующий метод для приведения таких барометрических показаний к стандартному ускорению силы тяжести. Пусть B – наблюдаемый отсчет по ртутному барометру, B_t – отсчет по барометру, приведенный к стандартной температуре и исправленный инструментальной поправкой, но не приведенный к стандартному ускорению силы тяжести, B_n – отсчет по барометру, приведенный к стандартному ускорению силы тяжести и стандартной температуре и исправленный инструментальной поправкой, B_{ca} – климатологическое среднее B_t на станции, $g_{\varphi H}$ – местное ускорение силы тяжести (в м с$^{-2}$) на станции при широте φ и высоте над уровнем моря H, и g_n - стандартное ускорение силы тяжести –9,806 65 м/с^2.

Подходящими соотношениями будут следующие:

$$B_n = B_t\,(g_{\varphi H}/g_n) \qquad (3.A.1)$$

или:

$$B_n = B_t + B_t\,[\,(g_{\varphi H}/g_n) - 1] \qquad (3.A.2)$$

Приближенное уравнение 3.А.3 можно использовать при условии, что результаты, полученные с его помощью, не отличаются более чем на 0,1 гПа от результатов, которые получены с помощью уравнения 3.А.2:

$$B_n = B_t + B_{ca}\,[(g_{\varphi H}/g_n) - 1] \qquad (3.A.3)$$

Местное ускорение силы тяжести $g_{\varphi H}$ должно вычисляться по процедуре, описанной в следующем разделе. Значение, полученное таким образом, соответствует Международной гравитационной стандартной системе 1971 г. (IGSN71).

Определение местного ускорения силы тяжести

Для того чтобы определить местное значение ускорения силы тяжести на станции с удовлетворительной точностью, необходимо использовать один из двух методов. Эти методы включают, в первом случае, использование гравиметра (прибора для измерения разности между значениями ускорения силы тяжести в двух точках), а во втором случае так называемых аномалий Бугера. Предпочтение следует отдать методу с использование гравиметра. Если нельзя применить ни один из этих методов, можно рассчитать местное значение ускорения силы тяжести, используя простую модель Земли.

Использование гравиметра

Предположим, что g_1 – известное местное ускорение силы тяжести в определенном пункте O. Обычно это установленная геодезической организацией базовая станция для измерения силы тяжести, на которой g_1 определяется в системе IGSN71. Предположим далее, что g – неизвестное местное ускорение силы тяжести в метеорологической гравитационной системе в некотором другом пункте X, для которого нужно определить значение g. Пусть Δg – разность ускорений силы тяжести в двух пунктах, определенных с помощью гравиметра. То есть, Δg равно значению в пункте X минус значение в пункте O в соответствующей системе. Тогда, g находится по уравнению 3.А.4:

$$g = g_1 + \Delta g \qquad (3.A.4)$$

Использование аномалий Бугера

Если гравиметра нет, то для определения значения g в данной точке можно использовать

проинтерполированные аномалии Бугера (A_B). Необходимо получить контурную карту этих аномалий из геодезической организации или с сети гравитационных станций, плотность расположения которых в окрестностях данного пункта составляет, по меньшей мере, одна станция на 10 000 км^2 (расстояние между станциями не более 100 км).

В качестве основы можно использовать гравитационную сеть с меньшей плотностью при условии, что геодезическая организация считает, что этот метод должен дать более надежные результаты по сравнению с результатами, полученными с использованием гравиметра.

Аномалии Бугера (A_B) получают из уравнения 3.A.5:

$$g_s = (g_{\varphi,0})s - C \cdot H + A_B \qquad (3.A.5)$$

где ($g_{\varphi,0}$)s – теоретическая величина ускорения силы тяжести на широте φ на уровне моря, полученная с помощью формулы, фактически используемой для вычисления аномалии Бугера. Эта формула выражает значение как функцию широты в некоторой системе. H – высота станции (в метрах) над уровнем моря, на которой измеряется g_s, g_s – наблюдаемая величина ускорения силы тяжести (в м с$^{-2}$); A_B – аномалия Бугера (в м с$^{-2}$); и C – коэффициент поправки высоты, используемый при вычислении аномалии Бугера (например, при использовании удельной силы тяжести 2,67 для земной коры этот коэффициент составляет 0,000 001 968 м/с^2).

Когда требуется значение g для данной станции, а измерить его нельзя, значение g_s следует вычислять по уравнению 3.A.5, при допущении, что соответствующее значение A_B для станции можно найти путем интерполяции на вышеупомянутых картах изолиний или получить по данным аномалий Бугера, построенным на основании измерений на гравитационной сети, как определено выше.

Вычисление местного ускорения силы тяжести

Если ни один из предыдущих методов не может быть применен, то местное значение можно вычислить менее точно, используя простую модель. В соответствии с Геодезической справочной системой 1980 г. теоретическое значение ($g_{\varphi 0}$) ускорения силы тяжести при среднем уровне моря на географической широте φ, вычисляется с помощью уравнения 3.A.6:

$$g_{\varphi 0} = 9{,}806\,20\,(1 - 0{,}002\,644\,2 \cos 2\phi + 0{,}000\,005\,8 \cos^2 2\phi) \qquad (3.A.6)$$

Значение ускорения силы тяжести в данной точке поверхности суши на наземной станции вычисляется с помощью уравнения 3.A.7:

$$g = g_{\varphi 0} - 0{,}000\,003\,086\,H + 0{,}000\,001\,118\,(H - H') \qquad (3.A.7)$$

где g – местное расчетное значение ускорения силы тяжести в м/с^2, в данной точке; $g_{\varphi 0}$ – теоретическая величина ускорения силы тяжести в м/с^2 на среднем уровне моря на географической широте φ, вычисленная по уравнению 3.A.6 выше; H – фактическая высота данной точки в метрах над средним уровнем моря; и H' – абсолютная величина в метрах разницы между высотой данной точки и средней высотой действительной поверхности суши, заключенной в круг радиусом 150 км и с центром в данной точке.

Значение ускорения силы тяжести в данной точке при ее высоте H над средним уровнем моря не более 10 км вычисляется с помощью уравнения 3.A.8:

$$g = g_{\varphi 0} - 0{,}000\,003\,086\,H - 0{,}000\,006\,88\,(D - D') \qquad (3.A.8)$$

где D – глубина моря в метрах ниже данной точки; и D' – средняя глубина моря в метрах в пределах круга радиусом около 150 км и с центром в данной точке.

На станциях или в точках на морском побережье местное значение ускорения силы тяжести должно рассчитываться, насколько это возможно, с использованием в пропорциональном отношении уравнений 3.A.7 и 3.A.8, взвешивая последний член уравнения 3.A.7 в соответствии с относительной площадью суши в пределах определенного круга, а последний член уравнения 3.A.8 в соответствии с относительной площадью моря в пределах круга. Алгебраически суммируя полученные таким образом значения, получаем поправку, которую можно применить к конечному члену правых сторон обоих уравнений так, как это показано в уравнении 3.A.9:

$$g = g_{\varphi 0} - 0{,}000\,003\,086\,H + 0{,}000\,001\,118\,\alpha\,(H - H') - 0{,}000\,006\,88\,(1 - \alpha)\,(D - D') \qquad (3.A.9)$$

где α – доля суши, приходящаяся на заданную площадь, а H' и D' – фактические площади суши и водной поверхности соответственно.

Поправки на температуру

Показания барометра должны быть приведены к значениям, которые можно получить, если ртуть и шкала имеют стандартную температуру. Стандартной температурой для ртутных барометров является 0 °C. В том, что касается шкал, то в некоторых

барометрах шкала показывает точные значения при этой температуре, а в некоторых точные показания получаются при температуре 20°C.

Поправка на температуру, которая требуется для барометров с регулируемой чашкой (барометры типа Фортеня), отличается от поправки, которая требуется для барометров с фиксированными чашками, хотя основные причины, связанные с необходимостью введения поправок на температуру, одинаковы для обоих типов, а именно: коэффициент объемного теплового расширения ртути отличается от коэффициента линейного теплового расширения шкалы. Таким образом, для каждого типа ртутных барометров требуется определенная поправка.

Для барометра с фиксированной чашкой требуется дополнительная поправка. Причина состоит в том, что увеличение температуры прибора вызывает увеличение, как объема ртути, так и площади поперечного сечения чашки (железной), а также трубки (стеклянной). Вследствие этих изменений площадей увеличение объема ртути в результате повышения температуры будет меньше, чем если бы площади сохранялись неизменными. Это происходит вследствие того, что в результате расширения чашки и трубки некоторая часть ртути барометра стремится занять дополнительную площадь.

У барометра с фиксированной чашкой по ряду причин следует проверять градуировку шкалы, сверяя барометр с основным стандартным барометром с регулируемой чашкой. Некоторые изготовители уменьшают объем ртути на такую величину, что показания испытываемого барометра согласуются с показаниями стандартного барометра при 20 °C. Можно составить таблицу поправок для шкал барометров с фиксированными чашками, используя показания основного стандартного барометра, шкала которого является точной, когда в качестве стандартной температуры используется 20 °C.

Температурные поправки для ртутных барометров

Исследователи провели обширные изучения температурных поправок для ртутных барометров, результаты которых приведены ниже:

1.	(a) Шкала правильная при 0 °C и дополнительно	C_t	$= -B(\alpha-\beta)\cdot t$
	(b) Объем ртути правильный при 0 °C	$C_{t,V}$	$= -B(\alpha-\beta)\cdot t-(\alpha-3\eta)\cdot 4V/3A$
2.	Шкала правильная при 0 °C и Объем ртути правильный при 20 °C	$C_{t,V}$	$= -B(\alpha-\beta)\cdot t-(\alpha-3\eta)\cdot(t-20)\cdot 4V/3A$
3.	(a) Шкала правильная при 20 °C	C_t	$= -B[\alpha\cdot t-\beta\cdot(t-20)]$
	(b) Объем ртути правильный при 0 °C	$C_{t,V}$	$= -B\cdot t-\beta\cdot(t-20)]-(\alpha-3\eta)\cdot t\cdot(4V/3A)$
	(c) Объем ртути уменьшается на величину, эквивалентную 0,36 гПа	$C_{t,V}$	$= -B(\alpha-\beta)\cdot t-(\alpha-3\eta)\cdot t\cdot(4V/3A)$
4.	Шкала правильная при 20 °C и		
	(a) Объем ртути правильный при 20 °C	$C_{t,V}$	$= -B\cdot t-\beta(t-20)]-(\alpha-3\eta)\cdot(t-20)\cdot(4V/3A)$
	(b) Объем ртути уменьшается на величину, эквивалентную 0,36 гПа	$C_{t,V}$	$= -B(\alpha-\beta)t-(\alpha-3\eta)\cdot(t-20)\cdot(4V/3A)$

где:

C_t = поправка на температуру;
$C_{t,V}$ = дополнительная поправка для барометров с фиксированной чашкой;
B = наблюденное показание барометра;
V = общий объем ртути в барометре с фиксированной чашкой;
A = эффективная площадь поперечного сечения чашки;
t = температура;
α = объемное тепловое расширение ртути;
β = коэффициент линейного теплового расширения шкалы;
η = коэффициент линейного теплового расширения чашки.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3.B

РЕГИОНАЛЬНЫЕ СТАНДАРТНЫЕ БАРОМЕТРЫ

Регион ВМО	*Местоположение*	*Категория*[a]
I	Каир, Египет	A_r
	Касабланка, Марокко	A_r
	Дакар, Сенегал	A_r
	Дуала, Камерун	A_r
	Киншаса / Бинза, Демократическая Республика Конго	A_r
	Найроби, Кения	A_r
	Оран, Алжир	A_r
II	Калькутта, Индия	B_r
III	Буэнос-Айрес, Аргентина	B_r
	Маракай, Венесуэла	B_r
	Рио-де-Жанейро, Бразилия	A_r
IV	Майами, штат Флорида, США (субрегиональный)	A_r
	Сан-Хуан, Пуэрто-Рико (субрегиональный)	A_r
	Торонто, Канада (субрегиональный)	A_r
	Вашингтон, О.К. (Гейтерсбург, штат Мэриленд), США	A_r
V	Мельбурн, Австралия	A_r
VI	Лондон, Соединенное Королевство	A_r
	Санкт-Петербург, Российская Федерация	A_r
	Трап, Франция	A_r
	Гамбург, Германия	A_r

[a] В отношении определений категорий, см. раздел 3.10.5.1.

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Всемирная Метеорологическая Организация, 1990: *Руководство по системам метеорологических наблюдений и распространения информации на аэродромах*. ВМО-№ 731, Женева.

World Meteorological Organization, 1992*b*: *Наставление по Глобальной системе обработки данных и прогнозирования*. ВМО-№ 485, Женева.

Всемирная Метеорологическая Организация, 2003: *Наставление по глобальной системе наблюдений*. ВМО-№ 544, Женева.

Liu, H. and G. Darkow, 1989: Wind effect on measured atmospheric pressure.[Влияние ветра на измеряемое атмосферное давление.] *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Volume 6, Issue 1, pp. 5–12.

Miksad, R., 1976: An omni-directional static pressure probe. [Датчик для измерения статического давления во всех направлениях] *Journal of Applied Meteorology*, Volume 15, pp. 1215–1225.

Sax, N.I. 1975: *Dangerous Properties of Industrial Materials*. [Опасные свойства промышленных материалов] Fourth edition, Van Nostrand Reinhold Co., New York.

United States Weather Bureau, 1963: *Manual of Barometry* (WBAN). [Наставление по барометрии]. Volume 1, first edition, US Government Printing Office, Washington DC.

World Meteorological Organization, 1954: *Reduction of Atmospheric Pressure: Preliminary Report on Problems Involved*. [Приведение атмосферного давления: Предварительный отчет о проблемах] WMO Technical Note No. 7, WMO-No. 36.TP.12, Geneva.

World Meteorological Organization, 1964: *Note on the Standardization of Pressure Reduction Methods in the International Network of Synoptic Stations*. [Записка о стандартизации методов приведения давления на международной сети синоптических станций]. WMO Technical Note No. 61, WMO-No. 154.TP.74, Geneva.

World Meteorological Organization, 1966: *International Meteorological Tables* [Международные метеорологические таблицы] (S. Letestu, ed.). WMO-No. 188, Geneva.

World Meteorological Organization, 1968: *Methods in Use for the Reduction of Atmospheric Pressure.* [Методы, используемые для приведения атмосферного давления]. WMO Technical Note No. 91, WMO-No. 226.TP.120, Geneva.

World Meteorological Organization, 1985: Pressure tendency and discontinuity in wind [Барическая тен-денция и порывистый ветер] (L. Bergman, T. Hovberg and H. Wibeck). *Papers Presented at the Third WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-III)*, Instruments and Observing Methods Report No. 22, WMO/TD-No. 50, Geneva.

World Meteorological Organization, 1992a: *The WMO Automatic Digital Barometer Intercomparison* [Взаимосравнение ВМО автоматических цифровых барометров] (J.P. van der Meulen). Instruments and Ob-serving Methods Report No. 46, WMO/TD-No. 474, Geneva.

ГЛАВА 4

ИЗМЕРЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ

4.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Измерение влажности воздуха, а часто и ее постоянная регистрация требуются в большинстве областей метеорологической деятельности. Настоящая глава посвящена измерению влажности воздуха у поверхности Земли или вблизи нее. На практике для этого используется много различных методов, и по этому вопросу существует обширная литература. Старый, но все еще полезный общий обзор используемых методов приведен в работе Wexler (1965).

4.1.1 Определения

Определения терминов, используемых в настоящей главе, соответствуют определениям, приведенным в *Техническом регламенте* ВМО (ВМО 1988, приложение В), полный текст которого воспроизведен в приложении 4.А.

Ниже приведены определения характеристик, наиболее часто используемых при измерении влажности воздуха:

отношение смеси, r: отношение массы водяного пара к массе сухого воздуха;

удельная влажность, q: отношение массы водяного пара к массе влажного воздуха;

точка росы, T_d: температура, при которой отношение смеси влажного воздуха, насыщенного относительно воды при заданном давлении, равно заданному отношению смеси;

относительная влажность воздуха, U: процентное отношение давления имеющегося в воздухе водяного пара к давлению водяного пара, насыщенного относительно воды, при одинаковых значениях температуры и давления;

давление водяного пара, e': парциальное давление водяного пара в воздухе;

давление насыщенного водяного пара e'_w *и* e'_i: давление водяного пара в воздухе при условии равновесия относительно поверхности воды и льда соответственно.

В приложении 4.В представлены формулы для расчета различных характеристик влажности воздуха. Эти варианты формул и коэффициентов были приняты ВМО в 1990 г.[1] Они удобны для расчетов и обладают достаточной точностью для всех обычных метеорологических применений (ВМО, 1989*a*).

С более точными и подробными формулировками этих и других характеристик влажности воздуха можно ознакомиться в работе Sonntag (1990; 1994). Другие подробные формулировки[2] представлены в публикациях ВМО (1966, введения к таблицам 4.8–10) и ВМО (1988, приложение А).[3]

4.1.2 Единицы измерения

Для количественного выражения наиболее часто используемых физических величин, связанных с содержанием водяного пара в атмосфере, как правило, используются следующие единицы измерения и символы:

(a) отношение смеси r и удельная влажность q (кг кг$^{-1}$);

(b) давление водяного пара в воздухе e', e'_w, e'_i и атмосферное давление p (гПа);

(c) температура воздуха T, температура смоченного термометра T_w, температура точки росы T_d, и температура точки инея T_f (К);

(d) температура воздуха t, температура смоченного термометра t_w, температура точки росы t_d, и температура точки инея t_f (°C);

(e) относительная влажность воздуха U (%).

4.1.3 Метеорологические потребности

Измерения влажности у поверхности Земли необходимы для анализа метеорологических процессов и прогнозирования, для исследований климата; они находят применение в гидрологии, сельском хозяйстве, аэронавтике и в общих исследованиях окружающей среды. Особенно важное значение они имеют в связи с изменениями состояния воды в атмосфере.

Общие требования относительно диапазона, разрешения и точности измерений влажности приведены в части I, глава 1 и в таблице 4.1 ниже. Перечисленные в этой таблице достижимые точности относятся к приборам высокого класса, которые надлежащим образом обслуживаются и эксплуатируются. На практике таких

1 Приняты Исполнительным советом на его сорок второй сессии посредством резолюции 6 (ИС-XLII).

2 Приняты Четвертым конгрессом посредством резолюции 19 (Cg-IV).

3 Исправление в публикации ВМО (1988г.), выпущенной в 2000 г., содержит опечатку 3; правильная формулировка приводится в публикации ВМО (1966 г.).

результатов достичь нелегко. В частности, очень низкая точность получается при измерении влажности воздуха с помощью психрометра, размещаемого в метеорологической будке без принудительной вентиляции.

Таблица 4.1. Перечень требований к характеристикам приборов для измерения влажности воздуха у поверхности Земли

Требование	*Температура смоченного термометра*	*Относительная влажность воздуха (отн.вл.)*	*Точка росы*
Диапазон	От –10 до 35 °C	5 – 100 %	По меньшей мере 50 K в диапазоне от -60 до 35 °C
Ожидаемая погрешность[a] (неопределенность)	0,1 K высокая отн.вл. 0,2 K средняя отн. вл.	1 % высокая отн. вл. 5 % средняя отн. вл.	0,1 K высокая отн. вл. 0,5 K средняя отн. вл.
Достижимая погрешность наблюдения[b]	0,2 K	3 – 5 %[c]	0,5 K[c]
Точность представления результата	0,1 K	1 %	0,1 K
Постоянная времени датчика[d]	20 с	40 s	20 с
Время усреднения выходной[e] величины	60 с	60 s	60 с

[a] Погрешность здесь – это допускаемая неопределенность, указанная в виде двух стандартных отклонений.

[b] При средних значениях диапазона относительной влажности для надлежащим образом сконструированных и правильно функционирующих приборов: трудно достижима на практике

[c] В случае прямого измерения

[d] Для климатологического использования необходима постоянная времени, равная 60 с (т.е. время достижения 63 % от ступенчатого изменения).

[e] Для климатологического использования требуется время усреднения 3 мин.

При измерениях влажности для большинства целей приемлемы постоянные времени порядка одной минуты. Время ответных реакций, возникающих в рабочих приборах, обсуждается в разделе 4.1.4.9.

4.1.4 Методы измерения

Общий обзор состояния в области гигрометрии приводится в работе Sonntag (1994).

4.1.4.1 Гигрометры

Прибор для измерения влажности воздуха называется гигрометром. Физические принципы, наиболее широко используемые в гигрометрии, описаны ниже в разделах 4.1.4.4 – 4.1.4.8. С более подробной информацией о различных методах можно ознакомиться в работе Wexler (1965). Отчет по международным сравнениям различных гигрометров под эгидой ВМО приведен в публикации ВМО (1989*b*).

4.1.4.2 Размещение приборов: общие требования

Общие требования к размещению приборов и датчиков влажности воздуха аналогичны требованиям для датчиков температуры, и для этой цели может быть использована размещенная надлежащим образом психрометрическая будка. Конкретно предъявляются следующие требования:

(a) обеспечение защиты датчика от прямого солнечного излучения, атмосферных загрязняющих веществ, дождя и ветра;
(b) контроль за тем, чтобы не создавался местный микроклимат внутри кожуха датчика или пробоотборника; следует иметь в виду, что дерево и многие синтетические материалы поглощают или выделяют водяной пар в зависимости от атмосферной влажности.

Информация о конкретных приборах приводится в разделах 4.2 – 4.7.

4.1.4.3 Источники погрешностей: общие замечания

Погрешности при измерении влажности могут быть вызваны следующими причинами:
(a) изменение состояния пробы воздуха, например, под воздействием тепла либо источника или поглотителя водяного пара;
(b) загрязнение датчика, например, грязью, брызгами морской воды;
(c) ошибка калибровки, включая корректировку влияния давления, температурный коэффициент датчика и электрического устройства сопряжения;
(d) неправильное определение фазы вода/лед;
(e) плохая конструкция прибора, например, препятствия для поступления тепла к смоченному термометру или передача тепла от столбика жидкости термометра к резервуару смоченного термометра;
(f) неправильная эксплуатация, например, пренебрежение необходимостью достижения устойчивого равновесия;
(g) неправильный отбор проб и/или выбор интервалов усреднения.

Постоянная времени датчика, время усреднения выходного результата и потребности в данных должны быть взаимно согласованными.

Различные виды датчиков влажности обладают разной степенью обладания каждым из вышеуказанных факторов, и соответственно их значимость для приборов различна, что обсуждается далее в настоящей главе.

4.1.4.4 Гравиметрическая гигрометрия

Гравиметрический метод основан на использовании абсорбции водяного пара из известного объема воздуха каким-либо влагопоглотителем (гравиметрический гигрометр, используется только для первичных эталонов). Некоторые подробности приведены в разделе 4.9.

Гравиметрический метод позволяет воспроизвести абсолютную меру содержания водяного пара в пробе воздуха в виде отношения смеси влажного воздуха. Результат получают, прежде всего, извлечением водяного пара из пробы. Масса водяного пара определяется путем взвешивания осушающего агента до и после абсорбции пара. Масса сухой пробы определяется путем либо взвешивания, либо измерения ее объема.

Применение этого метода ограничено использованием в качестве абсолютного эталона сравнения для калибровки. Такой прибор можно найти, главным образом, в национальных лабораториях эталонов для калибровки.

4.1.4.5 Методы конденсации

4.1.4.5.1 Метод с использованием охлаждаемого зеркала (гигрометр точки росы или точки инея)

Когда влажный воздух при температуре T, давлении p и отношении смеси r_w (или r_i) охлаждается, он в конечном итоге достигает насыщения относительно воды (или относительно льда при более низких температурах), и на твердой негигроскопичной поверхности можно обнаружить росу (или иней). Температура, при которой достигается состояние насыщения является точкой росы T_d (или точкой инея T_f).

Гигрометр с охлаждаемым зеркалом используется для измерения T_d или Tf. В наиболее часто применяемых системах применяется небольшая отражающая поверхность из отполированного металла, которая охлаждается с использованием устройства, основанного на термоэлектрическом эффекте Пельтье, а продукт конденсации распознается при помощи оптического детектора.

Приборы, основанные на методе конденсации, применяются в практике наблюдения, и могут также использоваться в качестве рабочих эталонов и/или сравнительных эталонов (см. раздел 4.4).

4.1.4.5.2 Метод с использованием нагретого солевого раствора (гигрометр равновесного давления пара, известный как конденсационный гигрометр)[4]

Равновесное давление пара над поверхностью насыщенного солевого раствора меньше, чем над аналогичной поверхностью чистой воды при том же значении температуры. Это явление характерно для всех солевых растворов, однако особенно ярко оно проявляется над поверхностью раствора хлорида лития, для которого характерно весьма низкое равновесное давление пара.

Водный солевой раствор (равновесное давление насыщенного водяного пара над которым ниже давления пара в окружающем воздухе) может быть нагрет до такой температуры, при которой равновесное давление насыщенного водяного пара над ним несколько превысит парциальное давление водяного пара в окружающем воздухе. В этот момент баланс перемещается от конденсации к испарению, и в конечном итоге наступает фаза перехода жидкого раствора в твердую гидратную (кристаллогидратную) форму. Момент этого перехода можно определить благодаря характерному уменьшению электрической проводимости раствора по мере того, как он кристаллизуется. Температура раствора, при которой достигается равенство давления насыщенного водяного пара над поверхностью кристаллогидрата соли парциальному давлению водяного пара в окружающем воздухе, является мерой для определения этого давления. Для этой цели термометр размещают таким образом, чтобы он имел хороший термический контакт с раствором. Точка росы окружающего воздуха (относительно плоской поверхности химически чистой воды) может быть определена на основе эмпирических данных, отражающих связь давления насыщенного водяного пара с температурой для чистой воды и для соляных растворов. Наиболее часто для данного вида датчика используется раствор хлорида лития.

Описанный метод используется в практике наблюдений, особенно на автоматических метеорологических станциях (см. раздел 4.5)[5].

4.1.4.6 Психрометрический метод

Психрометр состоит из двух размещенных рядом друг с другом термометров. Поверхность чувствительного элемента одного из них покрыта тонкой пленкой воды или льда, и он называется смоченным

термометром или покрытым льдом термометром, соответственно. Чувствительный элемент второго термометра находится на в воздухе, и этот термометр называется сухим термометром. Из всех методов этот метод используется наиболее широко, он подробно описывается в разделе 4.2.

Вследствие испарения воды с поверхности смоченного термометра, температура, измеряемая смоченным термометром, как правило, ниже, чем температура, измеряемая сухим термометром. Разность этих температур является мерой влажности воздуха: чем ниже влажность окружающего воздуха, тем больше скорость испарения и соответственно больше разность между температурой смоченного термометра и температурой сухого термометра. Соотношение между этой разностью температур и влажностью окружающей среды описывается психрометрической формулой.

Данный метод широко используется в практике метеорологических наблюдений. Приборы, основанные на психрометрическом методе, также часто используются в качестве рабочих эталонов6.

4.1.4.7 Адсорбционные (абсорбционные) методы

У некоторых материалов при взаимодействии с водяным паром изменяется какое-либо химическое или физическое свойство, которое достаточной степени обратимо, чтобы быть использованным в качестве показателя влажности окружающей среды. Водяной пар может адсорбироваться или абсорбироваться материалом; при этом под адсорбцией подразумевается поглощение одного вещества поверхностным слоем другого вещества, а под абсорбцией – проникновение какого-либо вещества вовнутрь массы другого вещества. Гигроскопичным называют вещество, характерным свойством которого является абсорбирование водяного пара из окружающей атмосферы вследствие того, что давление насыщенного пара в нем ниже, чем давление пара в окружающей атмосфере. Одно из необходимых условий процесса абсорбции заключается в том, что давление водяного пара в окружающей атмосфере должно быть выше, чем давление насыщенного пара в веществе. Для процесса адсорбции (абсорбции) характерны следующие два свойства:

(a) изменение размеров гигроскопических материалов: размеры некоторых материалов изменяются в зависимости от влажности. Наибольшие пропорциональные изменения размеров характерны для натуральных волокон, и при использовании механической рычажной системы они могут быть встроены в аналоговый измерительный преобразователь линейных перемещений. Преобразователь может быть сконструирован таким образом, чтобы стрелка над шкалой обеспечивала визуальное отображение или чтобы электромеханическое устройство обеспечивало электрические выходные сигналы. Наиболее часто для такого вида датчиков влажности используется обезжиренный человеческий волос. Вместо человеческого волоса могут использоваться также и синтетические волокна. Однако из-за того, что для синтетических волокон характерен очень длительный период запаздывания, такие датчики не могут использоваться при температуре ниже 10 °C. Волосной гигрометр описывается в разделе 4.3. Специально обработанная «пленка» (органическая мембрана, получаемая из тканей-биомембран домашних животных) обладает свойствами, аналогичными свойствам человеческого волоса, и также используется для измерения влажности, хотя в основном в устройствах для аэрологических измерений.

(b) изменение электрических свойств гигроскопичных материалов: электрические свойства некоторых гигроскопичных материалов изменяются в зависимости от относительной влажности окружающей среды при очень слабой зависимости от температуры. Основанные на использовании этих свойств методы, наиболее широко применяемые в настоящее время, описываются в разделе 4.6.

Электрические датчики относительной влажности воздуха используются все чаще в дистанционных приборах, в частности там, где требуется прямое визуальное отображение значений относительной влажности.

Приборы для измерения относительной влажности, основанные на использовании электрических свойств, включают в себя и датчики, изготовленные из химически обработанных пластиковых материалов с электропроводящим поверхностным слоем (электрическое сопротивление), и датчики, основанные на изменении диэлектрических свойств твердого гигроскопичного материала в зависимости от относительной влажности окружающей среды (электрическая емкость).

4.1.4.8 Поглощение электромагнитного излучения водяным паром (гигрометры, основанные на поглощении ультрафиолетового и инфракрасного излучения)

Молекула воды поглощает электромагнитное излучение (ЭМИ) в ряде диапазонов длин волн и на дискретных длинах волн, и это свойство может быть

использовано для получения меры молекулярной концентрации водяного пара в газе. Наиболее подходящими для этой цели областями электромагнитного спектра являются ультрафиолетовая и инфракрасная. Лежащий в основе этого метода принцип заключается в определении ослабления потока излучения в диапазонах длин волн, соответствующих полосам поглощения водяным паром, на трассе между источником излучения и принимающим устройством. Существуют два основных метода для определения степени ослабления излучения, а именно:

(a) передача излучения в узком диапазоне с фиксированной интенсивностью к прокалиброванному принимающему устройству;

(b) передача излучения на двух длинах волн, на одной из которых оно активно поглощается водяным паром, а на другой либо совсем не поглощается, либо поглощается очень слабо.

Оба типа приборов нуждаются в частой калибровке и лучше всего подходят для измерения изменений концентрации пара, а не ее абсолютных значений. Использование этих приборов ограничивается научно-исследовательской деятельностью; их краткое описание приведено в разделе 4.7.

4.1.4.9 Постоянные времени датчиков влажности

Определение постоянной времени для какого-либо датчика влажности подразумевает, что ответная реакция датчика на ступенчатое изменение влажности соответствует известной функции. В общепринятой практике это период времени, необходимый для того, чтобы результат измерения датчиком достиг 63,2 % ($1/e$) ступенчатого изменения измеряемой величины (в данном случае влажности); при этом предполагается, что датчик обладает ответной реакцией первого порядка на изменение измеряемой величины (а именно, скорость изменения результатов измерения пропорциональна разности между результатом измерения и измеряемой величиной). При этом можно предположить, что 99,3 % изменения произойдет после периода продолжительностью в пять постоянных времени.

В таблице 4.2 приведены значения постоянной времени $1/e$, характерные для различных типов датчиков влажности

Таблица 4.2 Постоянные времени сенсоров влажности и гигрометров

(для различных значений температуры – доб. ред.)

При 85 % относительной влажности	*Постоянная времени (для 1/e) , с)*		
Тип сенсора или гигрометра	*20 °C*	*0 °C*	*–20 °C*
Обычный человеческий волос	32	75	440
Прокатанный волос	10	10	12
Золотобитная пленка*	10	16	140
Электроемкостный	1–10	1–10	1–10
Электрорезистивный	1–10	–	–
Психрометр Ассмана			
Конденсационные гигрометры	30–50	30–50	30–50
Электролитические гигрометры			
Оптический гигрометр	< 0,01	< 0,01	< 0,01

*Пленка животного происхождения (прим.ред.)

Примечание: Обычно соотношение первого порядка не очень хорошо выполняется в сорбционных датчиках, поскольку воздействующий на равновесие пара фактор – локальный градиент давления пара – зависит от перемещения молекул водяного пара внутри структуры твердотельного влагочувствительного элемента. В общем, отклик первого порядка будет наиболее четко проявляться в тех датчиках, которые имеют тонкий влагочувствительный элемент.

4.1.4.10 Уход за приборами: общие положения

Рассмотрим следующие процедуры по обслуживанию приборов:

(a) поддержание чистоты: датчики и их защитные оболочки должны содержаться в чистоте. Некоторые датчики, например датчики волосных гигрометров и гигрометров с охлаждаемым зеркалом, должны промываться дистиллированной водой, и такую процедуру следует проводить регулярно. Другие датчики, особенно имеющие определенное электролитическое покрытие, а также некоторые датчики с полимерной основой ни в коем случае нельзя очищать подобным образом. В связи с этим чрезвычайно важно наличие инструкций по очистке приборов для наблюдателей и обслуживающего персонала;

(b) поверка и калибровка полевых приборов: все датчики влажности, эксплуатируемые в полевых условиях, нуждаются в регулярной калибровке. Калибровка психрометров, гигрометров с охлаждаемым зеркалом и гигрометров «точки росы» с нагреваемым элементом, в которых используется температурный детектор, может проводиться в ходе каждого регулярного профилактического обслуживания. По меньшей мере, один раз в месяц необходимо проводить также сравнение с рабочим эталонным гигрометром, таким как психрометр Ассмана.

В приборах с насыщенными растворами солей используются датчики, для которых необходима лишь небольшая по объему проба воздуха. При этом требуется очень стабильная температура окружающей среды, поэтому нет полной уверенности в надежности таких приборов при их использовании в полевых условиях.

Преимущество использования аспирационного психрометра стандартного вида, такого как психрометр Ассмана, в качестве полевого эталона заключается в том, что его собственная эксплуатационная пригодность может быть проверена путем сравнения сухого и смоченного термометров и что при наличии хорошо работающего вентилятора можно ожидать надлежащей аспирации. Эталонный прибор и сам должен подвергаться калибровке через установленные для этого типа приборов интервалы времени.

Важно проводить калибровку электрических устройств измерительного преобразования, как на регулярной основе, так и в ходе их оперативного использования. Для этой цели вместо датчика может быть использован имитатор. Однако при этом необходимо проводить калибровку всей измерительной системы, начиная с датчика и кончая измерительным прибором, поскольку ошибки калибровки для датчиков и для устройств измерительного преобразования, которые по отдельности находятся в рамках спецификаций, при суммировании для всей измерительной системы могут оказаться за пределами спецификации.

Подробные требования к обслуживанию конкретных классов описываемых в настоящей главе гигрометров, приводятся в соответствующих разделах.

4.1.4.11 Защитные фильтры

Защитный фильтр используется, как правило, для защиты датчика влажности от загрязняющих веществ, наличие которых может негативно сказаться на его работе. В тех случаях, когда датчик не подвергается принудительной вентиляции, использование фильтра увеличивает постоянную времени датчика, поскольку фильтр препятствует общему перемещению воздуха, и остается только полагаться на молекулярную диффузию сквозь фильтрующий материал. Хотя теоретически диффузия водяного пара сквозь некоторые материалы, в частности, изготовленные из целлюлозы, происходит быстрее, чем через воздух, на практике наибольшая скорость диффузии достигается при помощи пористых гидрофобных мембран. Размер пор должен быть довольно небольшим с тем, чтобы улавливать вредные аэрозольные частицы (в среде над поверхностью моря могут присутствовать в значительном количестве частицы морской соли диаметром до 0,1 мкм), а пористость – достаточной для обеспечения адекватной скорости диффузии.

Размеры фильтра, так же как и его пористость, влияют на общую скорость диффузии. Диффузия возрастает в результате аспирации, однако следует помнить, что этот метод основывается на поддержании низкого давления воздуха на чувствительной стороне фильтра, а это может оказать значительное влияние на результаты измерения.

Невентилируемые датчики должны, как правило, защищаться с использованием гидрофобного инертного материала. Для этой цели в различных ситуациях использовались полимерные мембраны с высокой пористостью, изготовленные из экспандированного политетрафторэтилена (ПТФЭ), которые оказались довольно прочными.

Можно использовать и металлокерамические фильтры, однако их следует нагревать во избежание проблем с конденсацией внутри материала. Это, как правило, не подходит для датчиков относительной влажности, однако приемлемо для датчиков точки росы. Металлокерамические фильтры являются прочными и хорошо подходят для применений с аспирацией, что позволяет использовать фильтры с большой площадью поверхности и соответственно с приемлемо небольшим перепадом давления.

В тех случаях, когда за счет искусственной аспирации диффузию не удается усилить, следует обращать внимание на соотношение между площадью поверхности фильтра и объемом воздуха, который в виде пробы поступает к датчику. В случае типичного сорбционного датчика, включающего плоскую подложку, плоская мембрана, размещенная близко к поверхности датчика, обеспечивает оптимальную конфигурацию. В случае цилиндрической поверхности датчика приемлемым является цилиндрический фильтр.

4.2 ПСИХРОМЕТР

4.2.1 Общие сведения

4.2.1.1 Психрометрические формулы и таблицы

Ниже представлена в общем виде существующая практика построения психрометрических таблиц.

Обычная практика заключается в определении парциального давления водяного пара e' при

условиях наблюдения из следующих полуэмпирических психрометрических формул:

$$e' = e'_w(p,T_w) - Ap\,(T - T_w) \qquad (4.1)$$

и:

$$e' = e'_i(p,T_i) - Ap\,(T - T_i) \qquad (4.2)$$

где e'_w – парциальное давление насыщенного водяного пара относительно воды при температуре смоченного термометра T_w; e'_i – давление насыщенного пара относительно льда при температуре покрытого льдом термометра T_i; p – атмосферное давление; T – температура сухого термометра; и A –психрометрический коэффициент. (Последний термин использовать предпочтительнее, чем термин «постоянная психрометра», который является неправильным, но иногда употребляется.)

Температура смоченного термометра T_w для большинства приборов не идентична термодинамической температуре смоченного термометра, определение которой дано в приложении 4.A и значение которой зависит только от p, T и r (отношение смеси). Температура, измеряемая практическим смоченным термометром, зависит также от ряда параметров, находящихся под влиянием динамики передачи тепла через поверхность раздела жидкость – газ (в которой газ должен характеризоваться в понятиях составляющих его ламинарных и турбулентных слоев). Описание удовлетворительной термодинамической модели выходит за пределы содержания настоящей работы. Несоответствие между термодинамической и измеренной температурами смоченного термометра разрешается на практике посредством эмпирического определения психрометрического коэффициента A (в этой связи см. раздел 4.2.6).

В целом коэффициент A зависит от конструкции психрометра (в частности, системы смоченного термометра), скорости потока воздуха, обтекающего смоченный термометр (называемой скоростью вентиляции (аспирации), температуры и влажности воздуха. При низкой скорости вентиляции значение A существенно зависит от скорости вентиляции. Однако при скорости вентиляции, равной 3 –5 м/с и более (для термометров обычного размера), значение A становится в сущности независимым от скорости вентиляции и остается практически неизменным для хорошо вентилируемых психрометров. Значение A слабо зависит от температуры и влажности воздуха, и его зависимость от этих переменных считается, как правило, незначительной. В случае, когда смоченный термометр покрыт льдом, коэффициент A меньше, чем когда он покрыт водой.

Формулы и коэффициенты, соответствующие различным типам психрометра, рассматриваются ниже.

4.2.1.2 Спецификация психрометра

Оборудование, используемое для психрометрических наблюдений, должно, насколько это практически возможно, соответствовать следующим рекомендациям (см. разделы 4.2.3 и 4.2.6):

(a) на уровне моря и тогда, когда используются термометры тех типов, которые обычно применяются на метеорологических станциях, скорость вентиляции термометров должна быть в пределах 2,2 – 10 м/с. Если высота существенно отличается от уровня моря, эти предельные значения скорости воздуха должны корректироваться, и их изменение обратно пропорционально изменению плотности атмосферы;

(b) смоченный и сухой термометры должны быть защищены от воздействия любого излучения, причем предпочтительно, как минимум, двумя щитками. В психрометре с принудительной вентиляцией, таком как психрометр Ассмана, эти щитки могут быть выполнены из отполированного, неокрашенного металла и отделены от остальной части прибора изолирующими материалами. В принципе предпочтительным является термоизолирующий материал, и именно этот материал должен использоваться в психрометрах с естественной вентиляцией;

(c) в случае, когда психрометр установлен в защитной будке с жалюзи и с принудительной вентиляцией, для обоих термометров должны быть предусмотрены отдельные вентиляционные каналы. Вход в эти каналы должен быть размещен таким образом, чтобы приборы измеряли истинную температуру окружающего воздуха, а воздух должен выходить из будки таким образом, чтобы не возникало его рециркуляции;

(d) необходимо очень тщательно следить за тем, чтобы не происходило передачи значительного количества тепла от мотора вентилятора к термометрам;

(e) резервуар с водой и фитиль должны быть установлены таким образом, чтобы вода поступала на резервуар (датчик) смоченного термометра и не влияла на температуру, показываемую сухим термометром.

4.2.1.3 Обвязка из ткани для смоченного термометра

В смоченном термометре, как правило, присутствует фитиль из хлопковой или аналогичной ткани, тесно облегающий чувствительный элемент

с тем, чтобы поддерживать на нем ровную пленку воды, которая поступает либо непосредственно, либо благодаря какой-либо форме капиллярной подачи из резервуара. Фитиль обычно имеет форму конуса и плотно облегает резервуар термометра (или сам термометр), поднимаясь, по меньшей мере, на 2 см выше резервуара (датчика) термометра.

Ткань, которая покрывает смоченный термометр, должна быть тонкой, но плотной. Перед помещением ткани на термометр ее следует тщательно промыть в водном растворе бикарбоната натрия ($Na\text{-}HCO_3$), при концентрации 5 г на литр и затем несколько раз прополоскать в дистиллированной воде. В качестве альтернативного варианта может быть использован раствор чистого детергента в воде. В случае, когда используется фитиль, его следует обрабатывать аналогичным образом.

Любое видимое загрязнение фитиля или обвязки из ткани для смоченного термометра следует рассматривать как абсолютное свидетельство необходимости их замены. При работе с фитилем и обвязкой из ткани следует проявлять большую осторожность, чтобы предотвратить их загрязнение от рук. Для смоченного термометра следует использовать дистиллированную воду.

Очень важен надлежащий уход за смоченным термометром. Наблюдателям следует регулярно заменять обвязку из ткани и фитиль для смоченного термометра. Такая замена должна проводиться во всех используемых на постоянной основе психрометрах, по меньшей мере, один раз в неделю. В местах, расположенных недалеко от моря, в запыленных или промышленных районах эти элементы прибора следует заменять чаще. Необходимо также часто проверять, насколько хорошо поступает вода, и в случае необходимости проводить замену воды или пополнение ее запаса.

При жарких сухих условиях предпочтительно смачивать тканевую оболочку водой из пористого сосуда. При этом в результате испарения с пористой поверхности обеспечивается предварительное охлаждение воды. Сосуд следует размещать в тени, однако, не в непосредственной близости от психрометра.

4.2.1.4 Работа со смоченным термометром при температуре ниже точки инея

При температуре ниже точки инея работать с психрометром трудно; тем не менее, он все же используется в климатических условиях, при которых возможна такая температура. При температуре смоченного термометра ниже 0 °C использование фитиля для перемещения воды из резервуара к обвязке из ткани на смоченном термометре за счет действия капилляров невозможно. При таких условиях необходимо тщательно следить за тем, чтобы на обвязке из ткани образовывался лишь очень тонкий слой льда. При этом совершенно необходимо обеспечивать принудительную вентиляцию термометров; если вентиляция отсутствует, работа со смоченным термометром становится чрезвычайно трудной.

По мере возможности следует обеспечивать также, чтобы температура воды была близка к точке замерзания. Если на нижней части резервуара термометра образуется нарост льда, то его следует поместить в воду на время, достаточное, для того чтобы лед растаял.

Период времени, необходимый для того, чтобы смоченный термометр начал показывать стабильный результат после смачивания обвязки из ткани, зависит от скорости вентиляции и от реальной температуры смоченного термометра. При отсутствии вентиляции этот период времени для термометра составляет от 15 до 45 минут, в то время как для вентилируемого термометра потребуется гораздо меньшее время. Очень важно следить, чтобы образование нового слоя льда на резервуаре термометра происходило в надлежащее время. Если наблюдения на обычном психрометре проводятся каждый час, то после смачивания на ткани образуется слой льда, который, как правило, сохраняется до следующего измерения. Если интервал времени между наблюдениями превышает один час, то наблюдателю следует посещать психрометрическую будку и смачивать термометр для того, чтобы перед каждым наблюдением на резервуаре термометра образовывался свежий слой льда. Термометр в аспирационных и пращевых психрометрах должен смачиваться непосредственно перед измерением.

Испарение слоя льда можно предотвратить или замедлить, помещая смоченный термометр в небольшую стеклянную трубку или закрывая вентиляционное отверстие смоченного термометра между наблюдениями. (Отметим, что последнюю операцию не следует проводить в тех случаях, когда это может привести к перегреву вентилятора.)

Смоченный термометр может показывать разную температуру в зависимости от того, что будет на смоченной ткани во время измерения – лед или переохлажденная вода. Исключение этих различий достигается следующими путями:

(a) на основе использования разных таблиц для случаев, когда смоченный термометр покрыт слоем льда или пленкой переохлажденной воды. Для того чтобы определить, какую

таблицу использовать, до резервуара смоченного термометра следует дотрагиваться кристаллом снега, карандашом или другим предметом сразу же после завершения наблюдения. Если температура повышается, приближаясь к 0 , а затем снова понижается, можно предположить, что вода на резервуаре смоченного термометра в срок наблюдения была переохлажденной;

(b) на основе использования таблиц, подходящих для случаев, когда резервуар смоченного термометра покрыт льдом, инициируя замерзание переохлажденной воды способом, указанным в пункте (a). В целях экономии времени и обеспечения покрытия смоченного термометра льдом наблюдателю следует инициировать замерзание воды при каждом наблюдении сразу же после смачивания резервуара термометра. Наблюдая за поведением смоченного термометра при точке замерзания, обычно можно определить, покрыт резервуар льдом или переохлажденной водой. Рекомендуется, однако, инициировать замерзание воды при каждом наблюдении, когда предполагается, что температура смоченного термометра ниже 0 °C, независимо от того, проводится или нет наблюдение за поведением термометра после его смачивания.

Первый метод, как правило, позволяет получить результаты быстрее, однако он требует использования двух таблиц, а это может привести к некоторой путанице.

4.2.1.5 Общая процедура проведения наблюдений

Для измерения температуры необходимо следовать процедурам, описанным в части I, глава 2. В дополнение к ним надо выполнять следующие требования:

(a) в случае если необходимо заменить обвязку из ткани, фитиль или воду для смоченного термометра, это следует делать с достаточной заблаговременностью до проведения наблюдения; период времени, необходимый для того, чтобы была достигнута правильная температура смоченного термометра, будет зависеть от типа психрометра;

(b) показания термометров следует считывать до ближайшей десятой доли градуса;

(c) при проведении наблюдения необходимо считывать показания с двух термометров по мере возможности одновременно и следить, чтобы к смоченному термометру поступало достаточное количество воды.

4.2.1.6 Использование электрических термометров сопротивления

Вместо стеклянных ртутных термометров все чаще используются прецизионные платиновые электрические термометры сопротивления, особенно в тех случаях, когда требуется дистанционное считывание результатов и проведение измерений на постоянной основе. Необходимо, чтобы устройства и выбранные сопрягающие электрические цепи удовлетворяли требованиям, предъявляемым к рабочим характеристикам. Эти требования подробно изложены в части I, глава 2. Особое внимание следует всегда уделять самонагреву, возникающему в электрических термометрах.

Психрометрические формулы в приложении 4.B, используемые для аспирационных психрометров Ассмана, действительны также и в случае, когда вместо стеклянных ртутных приборов используются платиновые термометры сопротивления при различных конфигурациях элементов психрометра и термометров. Формула для воды на смоченном термометре действительна также для некоторых психрометров с поперечной вентиляцией (ВМО, 1989*a*), т.е. при которой направление потока воздуха перпендикулярно оси термометра.

4.2.1.7 Источники погрешностей в психрометрии

Следует рассмотреть следующие основные источники погрешностей:

(a) инструментальные погрешности термометров. При психрометрических измерениях очень важно знать инструментальные погрешности используемых термометров для рабочего диапазона температур и проводить корректировку показаний приборов с учетом этих погрешностей еще до использования таблиц влажности (психрометрических таблиц).

Любые другие ошибки определения температуры смоченного или покрытого льдом термометра, вызванные другими причинами, должны устраняться таким же образом, что и инструментальные погрешности.

Таблица 4.3 иллюстрирует погрешности расчета относительной влажности воздуха $\varepsilon(U)$ по показаниям смоченного или покрытого льдом термометров, инструментальные ошибки которых $\varepsilon(t_x)$ (где x – это соответственно вода при $t > 0$ °C и лед при $t < 0$ °C) равны 0,5 и 0,1 K, для относительной влажности $U = 50$ % и диапазона действительных значений температуры воздуха (при этом подразумевается, что показания сухого

термометра соответствуют действительному значению температуры воздуха).

Таблица 4.3. Значения погрешности расчета относительной влажности воздуха за счет неучета инструментальных ошибок смоченного и покрытого льдом термометров $\varepsilon(t_x)$ при U = 50 %

Температура воздуха, °C	*Значения погрешности расчета относительной влажности, $\varepsilon(U)$ % за счет неучета инструментальных погрешностей смоченного и покрытого льдом термометров*	
	$\varepsilon(t_x)$ = 0,5 K	$\varepsilon(t_x)$ = 0,1 K
–30	60	12
–20	27	5
–10	14	3
0	8	2
10	5	1
20	4	0,5
30	3	0,5
40	2	0,5
50	2	0

(b) коэффициенты инерции термометров. Для получения наивысшей точности при работе с психрометром желательно обеспечить такое положение, при котором как смоченный, так и сухой термометры имели бы примерно одинаковый коэффициент инерции; в случае, когда термометры имеют резервуары одинакового размера, инерция смоченного термометра значительно меньше, чем сухого.

(c) погрешности, связанные с вентиляцией. Погрешности,связанныеснедостаточнойвентиляцией, приобретают гораздо более серьезное значение при использования неадекватных таблиц влажности (см. разделы, посвященные отдельным видам психрометров).

(d) погрешности, обусловленные чрезмерным слоем льда на резервуаре смоченного термометра. Поскольку толстый слой льда на резервуаре увеличивает инерцию термометра, следует немедленно удалять такой лед, погружая резервуар в дистиллированную воду.

(e) погрешности, обусловленные загрязнением ткани на смоченном термометре или использованием загрязненной воды. Возникновение значительных погрешностей может быть связано с присутствием веществ, изменяющих давление водяного пара. Смоченный термометр с покрывающей его тканью следует регулярно промывать в дистиллированной воде для устранения всех растворимых загрязняющих веществ. В некоторых районах эту процедуру следует выполнять чаще, чем в других, например, поблизости от моря или в районах с сильным загрязнением воздуха.

(f) погрешности, обусловленные передачей тепла от столбика жидкости термометра к резервуару смоченного термометра. Передача тепла от столбика жидкости термометра к его смоченному резервуару уменьшает психрометрическую разность и приводит к завышенным значениям влажности. Это влияние особенно проявляется при низкой относительной влажности, однако его можно избежать, если тканью обертывать резервуар термометра таким образом, чтобы верхний конец ткани был бы, по крайней мере, на 2 см выше резервуара смоченного термометра.

4.2.2 Аспирационный психрометр Ассмана

4.2.2.1 Описание

Аспирационный психрометр Ассмана представляет собой систему из двух стеклянных ртутных термометров, помещенных вертикально друг рядом с другом в отполированных металлических оправах с хромовым или никелевым покрытием и соединенных каналами с вентилятором. Вентилятор может приводиться в действие либо пружинным, либо электрическим двигателем. Резервуар одного из термометров обвязан плотно прилегающим к его поверхности одним слоем тонкой ткани, который перед измерениями смачивается дистиллированной водой. Резервуар каждого термометра размещен внутри пары коаксиальных металлических трубок, тщательно отполированных как внутри, так и снаружи, которые защищают их от внешнего теплового излучения. Эти трубки тщательно термически изолированы друг от друга.

Проведенное под эгидой ВМО международное сравнение психрометров Ассмана из десяти стран (ВМО, 1989*a*) показало, что хорошая согласованность между значениями температуры сухого и смоченного термометров наблюдается в психрометрах с техническими характеристиками, близкими к представленным в таблице 4.1, и со скоростью вентиляции от 2,2 м/с. Не все из имеющихся на рынке приборов полностью удовлетворяют этим требованиям.

Подробно данный вопрос рассматривается в публикации ВМО (ВМО, 1989*a*). При работе с психрометрами Ассмана в полевых условиях можно достичь такой же точности, как указано в таблице 4.1, а при более тщательных измерениях точность можно значительно повысить.

В приложении 4.B приведены стандартные формулы для расчета значений величин, характеризующих влажность, на основе данных измерений, проведенных при помощи психрометра Ассмана[4] и некоторых других психрометров с принудительной вентиляцией, при отсутствии других хорошо обоснованных формул.

4.2.2.2 Процедура наблюдения

Обвязка, которая должна быть свободна от жировых и иных загрязнений, смачивается дистиллированной водой. Загрязненные или покрытые коркой фитили следует заменять. Необходимо тщательно следить за тем, чтобы между тканью и внутренней трубкой, защищающей резервуар от теплового излучения, не было воды.

Ртутные столбики термометров следует проверять на наличие в них разрывов ртути, которые следует устранять; при необходимости следует заменить термометр.

При эксплуатации термометры должны, как правило, находиться в вертикальном положении. Термометры должны быть защищены от солнечного излучения. Для этого прибор ориентируется так, чтобы боковые щитки находились на одной линии с солнцем. Прибор следует наклонять таким образом, чтобы входные отверстия трубок, где помещены резервуары термометров, были направлены навстречу ветру, однако при этом необходимо тщательно следить, чтобы солнечное излучение не попадало на резервуары термометров. Защита от ветра нужна в условиях очень сильных ветров, когда отказ от такой защиты негативно отразится на скорости вращения вентилятора.

Психрометр должен находиться в состоянии теплового равновесия с окружающим воздухом. При температуре воздуха, превышающей 0 °C, следует выполнить после начала вентиляции не менее трех измерений с интервалом 1 минута. При температуре ниже 0 °C необходимо ждать до тех пор, пока не закончится процесс замерзания, и обращать внимание на то, чем покрыт фитиль: водой или льдом. В ходе процессов замерзания и таяния температура смоченного термометра остается постоянной и равной 0 °C. В случае наблюдений на открытом воздухе следует, провести несколько измерений и затем взять среднее значение. Показания термометров следует снимать с точностью не менее 0,1 K.

Кратко процедуру наблюдений по психрометру Ассмана можно представить в следующем виде:

(a) смочить резервуар термометра;
(b) завести вентилятор с часовым механизмом (или запустить электродвигатель);
(c) подождать две или три минуты либо до того момента, пока показания смоченного термометра не установятся;
(d) снять показания с сухого термометра;
(e) снять показания со смоченного термометра;
(f) проверить показания сухого термометра.

4.2.2.3 Размещение и установка прибора

При наблюдениях на открытом месте прибор следует либо подвешивать с помощью зажима и скобы на тонком шесте, либо держать в вытянутой руке, так чтобы входные отверстия трубок с резервуарами термометров были слегка наклонены навстречу ветру. При проведении обычных измерений температуры и влажности воздуха входные отверстия этих трубок должны находиться на высоте от 1,2 до 2 м над поверхностью земли.

Следует тщательно следить за тем, чтобы постороннее влияние, обусловленное присутствием самого наблюдателя или любых других близко расположенных источников тепла и водяного пара, таких как автомобили (выхлопные газы) не оказывалось на показания прибора.

4.2.2.4 Калибровка

Система вентиляции должна проверяться регулярно, по меньшей мере, один раз в месяц.

Регулярно должна проводиться также калибровка термометров. Два термометра могут сравниваться друг с другом, когда они оба измеряют температуру сухого термометра. По меньшей мере, один раз в год должно проводиться сравнение термометров с зарегистрированным эталонным термометром.

4.2.2.5 Уход за прибором

В периоды между снятием показаний прибор следует хранить в не отапливаемом помещении или в другом месте, защищенном от атмосферных осадков и сильного теплового излучения. Если прибор вообще не используется, то его следует хранить в помещении в прочном укладочном ящике, таком как ящик, в котором приборы поставляются производителем.

---

4 Рекомендовано Комиссией по приборам и методам наблюдений на ее десятой сессии (1989 г.).

4.2.3 Психрометр в жалюзийном метеорологическом экране (будке)

4.2.3.1 Описание

Два стеклянных ртутных термометра с резервуарами в форме шариков монтируются вертикально в психрометрической будке. Диаметр шариков должен составлять примерно 10 мм. Шарик одного из термометров обвязан хлопчатобумажной тканью, которая должна плотно прилегать к шарику и быть выше резервуара термометра, по меньшей мере, на 20 мм. В случае, когда для поддержания обвязки из ткани во влажном состоянии используются фитиль и резервуар с водой, резервуар предпочтительно помещать сбоку от термометра; при этом его отверстие должно быть на одном уровне с верхней частью шарика термометра или немного ниже. Фитиль следует поддерживать по возможности в вертикальном положении, и его длина должна быть такой, чтобы вода полностью и достаточно хорошо (но не с избытком) смачивала шарик термометра. Если фитиль не используется, смоченный термометр должен быть защищен от загрязнения путем помещения шарика в небольшую стеклянную трубку в периоды между снятием показаний.

Рекомендуется обеспечивать для психрометров в будке принудительную вентиляцию, скорость которой для обоих термометров должна составлять примерно 3 м/с. На практике используются как пружинные, так и электрические вентиляторы. Поток воздуха следует направлять поперек шариков термометров в горизонтальном направлении, а не вертикально, и он должен ослабевать таким образом, чтобы не возникало рециркуляции.

Погрешности измерений по психрометру в будке могут быть значительно больше, чем приведенные в таблице 4.1, особенно при слабом ветре, если в будке нет принудительной вентиляции.

Психрометрические формулы, приведенные в разделе 4.2.1.1, применимы к психрометрам в будке, однако значения психрометрических коэффициентов носят довольно неопределенный характер. Общие сведения о некоторых используемых формулах приведены в работе Bindon (1965). Если принудительная вентиляция осуществляется со скоростью 3 м/с[1] или больше поперек шарика смоченного термометра, можно применять формулы, представленные в приложении 4.B с психрометрическим коэффициентом, равным $6{,}53 \cdot 10^{-4}$ K^{-1} для воды. При этом для смоченного термометра при температуре выше 0 °C используются значения $6{,}50 – 6{,}78 \cdot 10^{-4}$, а при температуре ниже 0 °C, – $5{,}70 – 6{,}53 \cdot 10^{-4}$. Для психрометра в будке с естественной вентиляцией используемые коэффициенты варьируют в пределах $7{,}7 – 8{,}0 \cdot 10^{-4}$ при температуре выше точки замерзания и в пределах $6{,}8 – 7{,}2 \cdot 10^{-4}$ при температуре ниже точки замерзания, когда в будке есть хоть какое-то движение воздуха, а на практике так бывает почти всегда. Для случая, когда движение воздуха отсутствует, предлагаются значения коэффициента вплоть до $12 \cdot 10^{-}4$ для воды и $10{,}6 \cdot 10^{-4}$ для льда.

Психрометрический коэффициент, соответствующий конкретным конфигурации будки, форме резервуара смоченного термометра и условиям вентиляции, может быть определен путем сравнения с подходящим рабочим или сравнительным эталоном, однако при этом может наблюдаться большой разброс в данных и, следовательно, понадобится проведение масштабного эксперимента для получения стабильного результата. Даже если в ходе такого эксперимента удастся определить стабильное значение коэффициента, доверительный интервал для любого разового наблюдения будет широким, и поэтому будет мало оснований для отступления от использования значений, установленных национальными центрами.

4.2.3.2 Процедуры специальных наблюдений

Процедуры, описанные в разделе 4.2.1.5, применимы к психрометру в будке. В случае, когда используется смоченный термометр с естественной вентиляцией и при условии, что температура воды в резервуаре примерно равна температуре окружающего воздуха, правильное значение температуры смоченного термометра установится приблизительно через 15 минут после новой обвязки его тканью; если температура воды значительно отличается от температуры окружающего воздуха, для получения правильного значения может потребоваться и 30 минут.

4.2.3.3 Размещение и установка прибора

Требования к размещению и установке психрометрической будки описаны в части I, глава 2.

4.2.4 Пращевые психрометры

4.2.4.1 Описание

Небольшие пращевые психрометры переносного типа состоят из двух стеклянных ртутных термометров, закрепленных в прочной рамке, снабженной шпинделем и ручкой, размещенной на противоположной от резервуаров термометров стороне, при помощи которой эта рамка и закрепленные в ней

термометры могут быстро вращаться вокруг горизонтальной оси.

Схема расположения смоченного термометра зависит от индивидуальной конструкции пращевого психрометра. В некоторых конструкциях предусматривается защита резервуаров термометров от прямого солнечного излучения, и такие приборы предпочтительны для метеорологических измерений.

Психрометрические формулы, приведенные в приложении 4.B, также могут использоваться для получения относительной влажности воздуха по результатам измерений такими психрометрами.

4.2.4.2 Процедура наблюдений

При наблюдениях следует руководствоваться следующими основными рекомендациями:

(a) все инструкции по обращению с аспирационными психрометрами Асмана применимы также и к пращевым психрометрам;

(b) пращевые психрометры, не оборудованные специальными щитками для защиты резервуаров термометров от солнечного излучения, должны быть защищены от прямого солнечного излучения каким-либо другим способом;

(c) показания с термометров следует снимать немедленно после прекращения аспирации, поскольку температура смоченного термометра сразу же начинает повышаться, и термометры начинают испытывать на себе влияние солнечного излучения.

4.2.5 Психрометр с предварительным подогревом воздуха

Принцип действия такого психрометра основан на том, что содержание водяного пара в каком-то объеме воздуха не изменяется, если его нагреть. Это свойство можно использовать для целей психрометрических измерений, поскольку тогда отпадает необходимость в измерениях смоченным термометром, резервуар которого покрыт слоем льда в условиях отрицательных значений температуры воздуха.

4.2.5.1 Описание

Воздух засасывается в канал и проходит над электронагревательным элементом, а затем попадает в измерительную камеру, в которой находятся сухой и смоченный термометры и резервуар с водой. Регулирующая схема нагревательного элемента обеспечивает такое состояние, при котором температура воздуха не опускается ниже какого-либо определенного уровня, чаще всего 10 °C. Аналогичным образом поддерживается и температура воды в резервуаре. Таким образом, ни вода в резервуаре, ни вода в фитиле не замерзает, конечно, при условии, что психрометрическая разность составляет менее 10 K и обеспечивается непрерывность действия психрометра, даже если температура воздуха ниже 0 °C. При температуре выше 10 °C нагреватель может автоматически отключаться, когда психрометр возвращается к обычному функционированию.

Принцип действия электрических термометров позволяет заключить их полностью вовнутрь измерительной камеры; при этом отсутствует необходимость в визуальном снятии показаний.

Второй сухой термометр размещается на входе во всасывающий канал с тем, чтобы обеспечивать измерение температуры окружающего воздуха. Таким образом, может быть определена относительная влажность окружающего воздуха.

Скорость воздуха, который благодаря вентиляции проходит по направлению оси резервуаров психрометрических термометров, составляет примерно 3 м/с[1].

4.2.5.2 Процедура наблюдений

Нагреваемый психрометр подходит для автоматических метеорологических станций.

4.2.5.3 Размещение и установка прибора

Сам прибор следует размещать вне психрометрической будки. Входное отверстие для воздуха, где измеряется температура окружающего воздуха, следует размещать внутри будки.

4.2.6 Эталонный психрометр ВМО

Эталонный психрометр и процедуры по его эксплуатации описаны в публикации ВМО (1992). Смоченный и сухой термометры заключены в вентилируемое защитное устройство для использования в качестве свободно стоящего прибора. Следует подчеркнуть, что психрометрический коэффициент рассчитывается на основе теории тепломассообмена на смоченном термометре и отличается от коэффициента для других психрометров; он составляет $6{,}53 \cdot 10^{-4}$ K^{-1} при относительной влажности 50 %, температуре воздуха 20 °C и атмосферном давлении 1000 гПа. Температура смоченного термометра в этом приборе очень близка к теоретическому значению (см. приложение 4.A, пункты 18 и 19). Это обеспечивается очень эффективным испарением со смоченного термометра и сведением к минимуму постороннего нагревания. Естественный поток воздуха, обдувающий резервуар смоченного термометра, контролируется с помощью тщательного подбора формы подводящего

воздух канала и формы резервуара термометра, а также скорости вентиляции. Используется двойное защитное устройство, внешняя поверхность которого характеризуется высокой отражательной способностью, а внутренняя – зачернена. Элементы термометров изолированы и отделены защитным устройством. Защитные устройства и элемент смоченного резервуара (который является и термометром) изготовлены из нержавеющей стали с тем, чтобы свести теплопроводность к минимуму.

Процедуры использования эталонного психрометра обеспечивают полное отсутствие жира на смоченном термометре и даже жира в мономолекулярных слоях, который обычно появляется от пальцев человека, работающего с теми или иными частями прибора. Возможно, это основная причина того, что психрометрический коэффициент эталонного психрометра ВМО очень близок к теоретическому значению и отличается от психрометрических коэффициентов других психрометров.

Эталонный психрометр позволяет достигать очень высокой точности: погрешность определения относительной влажности составляет ± 0,38 % при относительной влажности 50 % и температуре воздуха 20 °C. Такой психрометр также был принят в качестве эталонного психрометра ВМО. Он разработан для использования в полевых условиях, однако не пригоден для применения в повседневной практике. С ним следует работать только квалифицированному персоналу, который привык к очень тщательной лабораторной работе. Использование этого прибора в качестве эталонного рассматривается в разделе 4.9.7.

4.3 ВОЛОСНОЙ ГИГРОМЕТР

4.3.1 Общие сведения

Для любого абсорбирующего материала характерна тенденция к установлению равновесия с окружающей его средой, как в отношении температуры, так и в отношении влажности. Давление водяного пара над поверхностью материала определяется температурой и количеством воды, поглощенной этим материалом, и разность между ним и давлением водяного пара в окружающем воздухе будет уравниваться за счет обмена молекулами воды.

Длина волоса, как было обнаружено, является функцией, в первую очередь, относительной влажности воздуха по отношению к насыщению над водой в жидком состоянии (причем при температуре воздуха как выше, так и ниже 0 °C) и возрастает примерно на 2,0 – 2,5 % при изменении влажности от 0 до 100 %. Скручивание волос для получения поперечного сечения в форме эллипса и растворение жировых веществ с помощью спирта приводит к увеличению соотношения между площадью поверхности и замкнутым объемом и уменьшению коэффициента инерции, что особенно важно при использовании прибора при низких температурах воздуха. Кроме того, функция реагирования волос на изменение влажности становится ближе к линейной, хотя прочность их на растяжение уменьшается. Для точных измерений предпочтительно использовать элемент из одного волоса, однако для придания элементу определенной прочности используется, как правило, жгут из волос. Химическая обработка с помощью сульфидов бария (BaS) или натрия (Na_2S) позволяет еще больше приблизить функцию ответной реакции к линейной.

Волосной гигрограф, или гигрометр считается подходящим прибором для использования в таких ситуациях или в такие периоды, когда очень редки или совсем не наблюдаются экстремальные и очень низкие значения влажности. Механизм данного прибора должен быть по возможности максимально простым, даже если при этом возникает необходимость применения нелинейной шкалы; это особенно важно в промышленных районах, поскольку загрязняющие воздух вещества могут влиять на поверхность движущихся частей механизма и увеличивать трение между ними.

Скорость реагирования волосного гигрометра на изменение влажности воздуха сильно зависит от температуры воздуха. При температуре –10 °C инерция прибора примерно в три раза больше, чем при температуре 10 °C. При значениях температуры воздуха от 0 до 30 °C и относительной влажности от 20 до 80 % хороший гигрограф за период около 3 минут должен показать 90 % скачкообразного изменения влажности

Хороший гигрограф в надлежащем состоянии должен регистрировать относительную влажность при умеренных термических условиях с погрешностью ± 3 %. При более низкой температуре погрешность будет больше.

В случаях, когда необходимо получать достоверную информацию при низких температурах, следует использовать предварительно скрученные волосы (как это описано выше).

4.3.2 Описание

Детали механизма волосного гигрометра могут различаться в зависимости от производителя.

Некоторые приборы снабжены преобразователем для обеспечения электрического сигнала; при этом может также обеспечиваться функция линеаризации, так что общая реакция прибора становится линейной по отношению к изменениям относительной влажности.

Наиболее часто используемым видом прибора с волосным чувствительным элементом является гигрограф. В нем используется жгут из волос, удерживаемый под легким натяжением небольшой пружиной и соединенный с пишущим рычагом таким образом, чтобы отмечалось каждое изменение длины жгута. Перо на конце пишущего рычага находится в контакте с бумажной лентой, закрепленной вокруг металлического цилиндра, и регистрирует угловые перемещения рычага. Цилиндр вращается вокруг своей оси с постоянной скоростью, определяемой движением механических часов. Скорость вращения составляет, как правило, один оборот либо в неделю, либо в сутки. На бумажную ленту в виде шкалы нанесена ось времени, которая проходит по окружности цилиндра, и ось влажности, параллельная оси цилиндра. Цилиндр обычно устанавливают вертикально.

Механизм, связывающий пишущий рычаг со жгутом из волос, может включать в себя специально сконструированные кулачки, которые преобразуют нелинейное удлинение волос в ответ на изменения влажности в линейное угловое перемещение рычага.

В качестве волоса в гигрометрах может быть использовано и синтетическое волокно. При использовании человеческого волоса его обычно прежде обрабатывают (см. раздел 4.3.1) с целью повышения линейности его реакции и уменьшения инерции, хотя это и приводит к уменьшению прочности на растяжение.

Пишущий рычаг и часовое устройство помещают, как правило, в футляр со стеклянными стенками, которые позволяют наблюдать за регистрацией значений влажности, не прикасаясь к самому прибору; при этом одна стенка футляра открыта с тем, чтобы волосной элемент размещался на открытом пространстве за пределами футляра. Боковые стенки футляра отделены от основания, однако стенка, противоположная волосному элементу, прикреплена к основанию при помощи шарнира. Такое устройство обеспечивает свободный доступ к часовому цилиндру и к волосному элементу. Элемент может быть защищен открытым сетчатым ограждением.

4.3.3 Процедура наблюдений

Перед снятием показаний по волосному гигрографу следует слегка постучать пальцем с тем, чтобы снять какое бы то ни было трение в механической системе. Гигрограф не следует по возможности трогать в период между сменой бумажных лент, за исключением моментов, когда делаются пометки времени.

Показания с гигрометра и гигрографа, как правило, снимаются с округлением до одного процента относительной влажности. Необходимо учитывать тот факт, что волосной гигрометр измеряет относительную влажность по отношению к насыщению над водой в жидком состоянии даже при температуре воздуха ниже 0 C.

Влажность воздуха может изменяться очень быстро, и поэтому очень важно точно проставлять отметки времени на гигрографе. При этом пишущий рычаг следует перемещать только в направлении уменьшения влажности на бумажной ленте. Дело в том, что волосы в результате такого перемещения провисают, и для возвращения пера обратно в надлежащее положение используется натягивающая пружина. Однако при этом может наблюдаться эффект гистерезиса, который проявляется в невозможности для пера вернуться в его первоначальное положение.

4.3.4 Размещение и установка прибора

Гигрограф или гигрометр следует устанавливать в психрометрической будке. Аммиак оказывает сильное негативное влияние на натуральный волос, разрушая его. В связи с этим следует избегать размещения приборов в непосредственной близости от животноводческих помещений и промышленных предприятий, использующих аммиак.

При использовании гигрографа в полярных районах его предпочтительно размещать в специальной психрометрической будке, которая обеспечивает для прибора достаточную защиту от атмосферных осадков и метелей. Например, в целях предосторожности покрытие для психрометрической будки может быть выполнено из мелкоячеистой сетки (Mullergas), которая препятствует накоплению снежных кристаллов на волосном элементе и на несущих поверхностях механического соединения. Такой способ может использоваться лишь в том случае, если не существует опасности смачивания сетки в результате таяния снежных кристаллов.

4.3.5 Источники погрешностей

4.3.5.1 Смещение нуля

По не выясненным пока окончательно причинам нулевое показание гигрографа может измениться. Наиболее вероятная причина этого заключается в

том, что волосы были подвергнуты избыточному натяжению. Например, волосы могут вытягиваться, если отметки времени производятся в направлении увеличения влажности на бумажной ленте или в случае заклинивания механизма гигрографа при уменьшении влажности. Нулевое показание может также изменяться, если гигрограф содержится в течение длительного времени в очень сухом воздухе, однако это изменение можно устранить, поместив прибор на достаточный период времени в атмосферу, насыщенную водяным паром.

4.3.5.2 Погрешности, обусловленные загрязнением волоса

Загрязнение различными видами пыли в большинстве случаев приводит к возникновению существенных погрешностей в данных наблюдений (иногда до 15 % значений относительной влажности). Обычно эти погрешности можно устранить или, по крайней мере, уменьшить, прочищая и промывая жгут из волос. Однако содержащиеся в пыли вещества могут разрушительно действовать на волос (см. раздел 4.3.4).

4.3.5.3 Гистерезис

Гистерезис проявляется как в реакции волосного элемента, так и в действии регистрирующего механизма волосного гигрометра. Гистерезис в регистрирующем механизме можно уменьшить, используя жгут из волос, который позволяет увеличить силу для преодоления трения. Следует помнить, что на величину перемещения пишущего рычага влияет частично также и сила трения между пером и бумагой, и соответственно для преодоления этой силы необходимо пропорционально большее усилие со стороны волоса. Для уменьшения гистерезиса требуются, кроме того, правильная установка натяжения пружины, а также правильное функционирование всех частей всего преобразовательного механизма. Значительная часть общего трения приходится на долю основной опоры и механизма линеаризации в устройстве передачи перемещения.

Гистерезис в волосном элементе является, как правило, краткосрочным явлением, связанным с процессами абсорбции – десорбции, и перестает быть крупным источником погрешностей как только устанавливается равновесное давление пара (о результатах продолжительного пребывания в условиях низкой влажности см. раздел 4.3.5.1).

4.3.6 Калибровка и сравнения

Снятые с гигрографа показания следует проверять настолько часто, насколько это практически целесообразно. В случае, когда смоченный и сухой термометры размещены в одной психрометрической будке с волосным гигрометром, они могут использоваться для проведения сравнения, если преобладают стабильные приемлемые условия, однако в противном случае сравнения в полевых условиях имеют ограниченную ценность, поскольку скорости ответной реакции этих приборов различны.

Точную калибровку можно осуществить лишь при использовании камеры искусственного климата и проведении сравнений с эталонными приборами.

Можно провести проверку точки 100 %-ной влажности (предпочтительно это сделать в помещении с постоянной температурой воздуха), обернув прибор насыщенной водой тканью (хотя нельзя получить правильные показания, если на волосном влагочувствительном элементе образуются в значительном количестве капли воды).

Характерную для помещения влажность можно получить другой (низкой) контрольной точкой относительной влажности при сравнении с эталонным аспирационным психрометром. Соответственно следует снять не одно, а целый ряд показаний.

Долгосрочная стабильность и отклонения могут быть оценены путем представления результатов сравнений с эталонным аспирационным психрометром в виде корреляционной функции.

4.3.7 Уход за прибором

Наблюдателям рекомендуется содержать гигрометр в чистоте.

Волос следует часто промывать, используя дистиллированную воду с помощью мягкой щетки для устранения накопившихся на нем пыли или растворимых загрязняющих веществ. Волос ни в коем случае не следует трогать пальцами. Опорные части механизма необходимо содержать в чистоте и иногда применять немного масла, используемого для часовых механизмов. На долю несущих поверхностей любого линеаризирующего механизма приходится значительная часть общего трения в соединительном устройстве. Трение можно уменьшить, полируя поверхности с помощью графита. Такую операцию можно проводить, используя кусок промокательной бумаги, натертый графитовым карандашом.

При надлежащем уходе в условиях умеренного климата и при отсутствии сильных атмосферных загрязнений волосные элементы в приборе могут сохранять свои свойства в течение нескольких лет. Перекалибровка и подгонка потребуются лишь после замены их в приборе.

4.4 ГИГРОМЕТР ТОЧКИ РОСЫ С ОХЛАЖДАЕМЫМ ЗЕРКАЛОМ

4.4.1 Общие сведения

4.4.1.1 Теория

Гигрометр точки росы (или точки инея) используется для измерения температуры, при которой влажный воздух, будучи охлажденным, достигает насыщения и на твердой поверхности (в качестве которой обычно используют зеркало) можно обнаружить отложение росы (или инея). Такое отложение, как правило, определяется визуально. Принцип измерения описывается в разделе 4.1.4.5, а также ниже.

Термодинамическая точка росы определяется для случая плоской поверхности чистой воды. На практике капли имеют искривленную поверхность, над которой давление насыщенного пара выше, чем над плоской поверхностью (это явление известно под названием эффекта Кельвина). Гидрофобные загрязняющие вещества усиливают этот эффект, в то время как хорошо растворимые вещества обладают противоположным влиянием и понижают давление насыщенного пара (эффект Рауля). Эффекты Кельвина и Рауля (которые соответственно повышают и понижают реальную точку росы) сводятся к минимуму, если в качестве критических по размеру принимаются более крупные капли. В этом случае уменьшается влияние кривизны, а благодаря снижению концентрации растворимых загрязняющих веществ уменьшается и эффект Рауля.

4.4.1.2 Принципы

В случае, когда влажный воздух при температуре T, давлении p и отношении смеси r_w (или r_i) охлаждается, он в конечном итоге достигает точки насыщения относительно свободной поверхности воды (или относительно свободной поверхности льда при более низких значениях температуры), и на твердой негигроскопичной поверхности можно обнаружить отложение росы (или инея). Температура условий насыщения называется термодинамической точкой росы T_d (или термодинамической точкой инея T_f). Давление насыщенного пара относительно воды e'_w (или льда e'_i) является функцией T_d (или T_f). Соответствующие уравнения выглядят следующим образом:

$$e'_w(p,T_d) = f(p)\cdot e_w(T_d) = \frac{r\cdot p}{0{,}621\,98 + r} \qquad (4.3)$$

$$e'_i(p,T_f) = f(p)\cdot e_i(T_f) = \frac{r\cdot p}{0{,}621\,98 + r} \qquad (4.4)$$

Гигрометр измеряет T_d или T_f. Несмотря на большой диапазон содержания влаги в тропосфере, этот прибор позволяет определить как очень высокие, так и очень низкие концентрации водяного пара с помощью одного лишь датчика температуры.

Для охлаждения ранее использовалась жидкость с низкой точкой кипения, однако в настоящее время оно производится в основном другими способами за исключением случаев очень низких концентраций водяного пара.

Из вышесказанного следует, что когда температура поверхности соответствует точке замерзания воды или ниже нее, должна существовать также возможность для определения того, является ли конденсат переохлажденной жидкостью или льдом.

Гигрометр с охлаждаемым зеркалом используется[9] для метеорологических измерений, а также в качестве эталонного прибора, как в полевых, так и в лабораторных условиях.

4.4.2 Описание

4.4.2.1 Устройство датчика

В наиболее широко применяемых системах используется небольшая отражающая поверхность из отполированного металла, которая охлаждается с помощью электрического устройства, основанного на термоэлектрическом эффекте Пельтье. Датчик состоит из тонкого металлического зеркала небольшого диаметра (2 – 5 мм), температура которого регулируется с помощью охлаждающего узла (и по возможности нагревателя), и датчика температуры (термопары или платинового термометра сопротивления), смонтированного на нижней стороне зеркала. Зеркало должно обладать совокупностью таких свойств, как высокая теплопроводность, хорошая оптическая отражательная способность и коррозионная стойкость, и при этом его проницаемость для водяного пара должна быть низкой. Подходящими материалами для зеркала могут быть золото, покрытое родием серебро, хромированная медь и нержавеющая сталь.

Зеркало должно быть оборудовано устройством (предпочтительно автоматическим) для обнаружения загрязняющих веществ, которые могут повысить или понизить видимую точку росы (см. раздел 4.4.2.2) с тем, чтобы их можно было устранить.

4.4.2.2 Устройство оптического обнаружения

Электрооптическая система используется, как правило, для обнаружения образования конденсата и передачи таких данных в качестве входных в

систему автоматического регулирования температуры зеркала. На поверхность зеркала под углом примерно 55° направляется узкий луч света. В качестве источника света может использоваться лампа накаливания, однако в настоящее время чаще используется светоизлучающий диод (СИД). В простых системах интенсивность отраженного и рассеянного вперед света определяется фотодетектором, сигнал с которого регулирует через автоматическую систему контроля работу узла охлаждения и нагревания. Зеркальная отражающая способность поверхности уменьшается по мере того, как возрастает толщина конденсата; охлаждение следует прекращать, пока слой осажденной воды еще тонок, а уменьшение отражательной способности составляет от 5 до 40 %. В более сложных системах используется дополнительный фотодетектор, который обнаруживает свет, рассеянный конденсатом; два таких детектора способны обеспечить очень точный контроль. Для усовершенствования контрольной системы может быть использовано второе, неохлаждаемое зеркало.

Наивысшая точность достигается путем регулирования температуры зеркала при таком значении, при котором количество конденсата не увеличивается и не уменьшается, однако на практике в системе автоматического регулирования будут наблюдаться колебания вокруг этого значения температуры. Время реагирования зеркала на нагревание и охлаждение оказывает определяющее влияние на амплитуду этих колебаний, и оно должно составлять 1 – 2 секунды. Также важной для поддержания стабильного осаждения на зеркале является скорость потока воздуха. Считается, что можно определить температуру, при которой происходит конденсация, с точностью до 0,05 К.

Наблюдение за образованием капель воды с использованием микроскопа и регулирование температуры зеркала ручным способом практически возможны, однако выполнение такой задачи требует много времени и большого профессионального мастерства.

4.4.2.3 Устройство регулирования температуры

Устройство для переноса тепла с использованием термоэлектрического эффекта Пельтье простым реверсивным тепловым насосом; полярность подаваемого постоянного тока определяет поступление тепла либо к зеркалу, либо от зеркала. Это устройство присоединено к нижней части зеркала и находится с ним в хорошем тепловом контакте. При очень низких значениях температуры конденсации может потребоваться многоступенчатое устройство с использованием термоэлектрического эффекта Пельтье.

Регулирование температуры осуществляется при помощи электрической системы авторегулирования, которая в качестве входного сигнала воспринимает сигнал от оптической детекторной подсистемы. Современные системы действуют под контролем микропроцессора.

Для охлаждения может использоваться жидкость с низкой точкой кипения, например жидкий азот, однако такая техника уже почти не используется. Аналогичным образом, для нагревания может применяться проволока с высоким электрическим сопротивлением, однако в настоящее время вместо нее все шире используются небольшие устройства, основанные на термоэлектрическом эффекте Пельтье.

4.4.2.4 Система визуального отображения температуры

Температура зеркала, измеренная электрическим термометром, прикрепленным под нижней поверхностью зеркала, представляется наблюдателю как точка росы определенной пробы воздуха. Коммерческие приборы, как правило, включают электрическое устройство сопряжения термометра зеркала и цифрового дисплея, однако в них могут быть также предусмотрены цифровые и аналоговые электрические выходные устройства для работы с оборудованием для регистрации данных. Диаграммный самописец особенно полезен для мониторинга данных от прибора в случае, когда аналоговое выходное устройство обеспечивает постоянную регистрацию сигналов от термометра зеркала, а цифровой дисплей этого не обеспечивает.

4.4.2.5 Вспомогательные системы

Для того чтобы обеспечить возможность визуально различить капли переохлажденной воды и кристаллы льда при температуре зеркала ниже 0 °C, в прибор может быть встроен микроскоп. Некоторые приборы в целях обеспечения автоматической процедуры такого определения снабжены смонтированным на поверхности зеркала детектором (например, емкостным датчиком), в то время как в других приборах используется метод, основанный на отражательной способности.

В системе, основанной на микропроцессоре, могут быть предусмотрены алгоритмы для пересчета и визуального отображения значений относительной влажности. В этом случае важно обеспечить, чтобы прибор точно различал конденсат в виде воды и в виде льда.

Во многих приборах предусмотрена автоматическая процедура для сведения к минимуму последствий

загрязнения. Это может быть цикл регулярного нагревания, при котором летучие загрязняющие вещества испаряются и устраняются с потоком воздуха. Используются также и системы, предусматривающие автоматическое протирание зеркала.

Для проведения метеорологических измерений и для большинства лабораторных применений необходим небольшой насос, который прогонял бы пробу воздуха через измерительную камеру. Необходимо также и регулирующее устройство, которое позволяло бы устанавливать скорость потока воздуха, совместимую со стабильным функционированием системы авторегулирования температуры зеркала, и приемлемую скорость ответной реакции на изменения влажности. Оптимальная скорость потока воздуха зависит от влагосодержания пробы воздуха и обычно находится в пределах 0,25 – 1 л/минута.

4.4.3 Процедура наблюдения

Правильное функционирование гигрометра точки росы зависит от достижения надлежащей объемной скорости потока воздуха, проходящего через измерительную камеру. Установка регулятора для этой цели (как правило, дроссельного устройства), размещаемого по ходу потока за измерительной камерой, по-видимому, будет требовать корректировки с учетом суточных колебаний температуры воздуха. Корректировка потока воздуха будет нарушать работу гигрометра, и даже может быть целесообразно инициировать цикл нагревания. Обе эти меры следует принимать с достаточной заблаговременностью для того, чтобы достичь стабильной работы прибора прежде, чем будут сниматься показания. Необходимый для этого период времени будет зависеть от цикла регулирования каждого отдельного прибора. Следует ознакомиться с инструкциями производителя с тем, чтобы получить надлежащее представление о скорости потока воздуха, которую следует устанавливать, и о подробностях цикла регулирования конкретного прибора.

Следует часто проверять состояние зеркала; по мере необходимости зеркало следует очищать. Стабильная работа прибора необязательно означает, что зеркало является чистым. Его следует промывать дистиллированной водой и тщательно высушивать, протирая мягкой тканью или прикасаясь палочкой с ватой на конце для устранения любых растворимых загрязняющих веществ. При этом необходимо проявлять осторожность с тем, чтобы не поцарапать поверхность зеркала, особенно там, где она имеет тонкое покрытие для защиты основы или где вмонтирован детектор – идентификатор льда/жидкой воды. Если воздушный фильтр не используется, следует проводить очистку, по меньшей мере, ежедневно. В том случае, когда воздушный фильтр используется, его состояние надо проверять при проведении каждого наблюдения. Наблюдателю не следует стоять слишком близко к входному отверстию для воздуха; необходимо также следить за тем, чтобы выходное отверстие не было заблокировано.

При снятии показаний при температуре 0 °C или ниже наблюдателю следует определить, является ли конденсат на зеркале переохлажденной водой или льдом. Если не предусмотрено автоматическое определение, наблюдателю следует осмотреть зеркало. Правильность работы любой автоматической системы должна время от времени проверяться.

Для самых хороших приборов границы неопределенности составляют ±0,3 К в широком диапазоне значений точки росы (от –60 до 50 °C).

4.4.4 Размещение и установка прибора

Критерии, согласно которым следует устанавливать узел датчика, аналогичны критериям для любого аспирационного гигрометра, хотя они и менее строгие, чем для психрометра или датчика относительной влажности, с учетом того факта, что точка росы или точка инея в пробе воздуха не подвержена влиянию изменений температуры окружающей среды при условии, что она остается все время выше точки росы. По этой причине нет необходимости в установлении метеорологической будки. Датчик следует размещать на открытом пространстве, и он может быть смонтирован на столбе внутри защитного корпуса со входным отверстием для воздуха на необходимом уровне.

Необходима система для обеспечения подачи проб воздуха. Для этого обычно используется небольшой насос, который должен вытягивать воздух из выходного отверстия измерительной камеры и отбрасывать его подальше от канала, предназначенного для притока воздуха. Следует избегать рециркуляции воздушного потока, поскольку при этом метод забора проб считается неправильным, хотя при стабильной работе прибора содержание водяного пара в выходном отверстии должно быть в действительности таким же, как у входного отверстия. Рециркуляции воздуха можно избежать, если размещать выходное отверстие выше входного отверстия, хотя это может оказаться неэффективным, если в этом слое атмосферы вертикальный градиент температуры воздуха отрицательный.

В случае, когда прибор постоянно работает на открытом пространстве, необходимо предусмотреть наличие воздушного фильтра. Этот фильтр не должен создавать существенных препятствий потоку

воздуха, поскольку такое блокирование может привести к заметному падению давления воздуха и повлиять на температуру конденсации в измерительной камере. В качестве такого фильтра может быть использован металлокерамический фильтр, способный захватывать все частицы за исключением наимельчайших аэрозольных частиц. Его преимущество заключается в том, что он может легко прогреваться с помощью электрического элемента и таким образом поддерживаться в сухом состоянии при любых условиях. Он более прочный, чем фильтры мембранного типа, и лучше подходит для пропуска потока воздуха с относительно высокими скоростями, необходимыми при использовании метода с охлажденным зеркалом в сравнении с методом сорбции. Однако, с другой стороны, металлический фильтр может быть больше подвержен коррозии под воздействием находящихся в атмосфере загрязняющих веществ, чем некоторые мембранные фильтры.

4.4.5 Калибровка

Учитывая тот факт,: что прибор с охлаждаемым зеркалом, работающий в полевых условиях, подвержен влиянию целого ряда факторов, влияющих на его эффективность, следует регулярно проводить его сравнение с эталонным прибором, например с психрометром Асмана или другим гигрометром с охлаждаемым зеркалом. Прибор, который постоянно эксплуатируется в полевых условиях, должен еженедельно подвергаться процедуре контрольных измерений. Следует использовать возможности для проверки функционирования прибора при точках росы и точках инея. В случае, когда температура зеркала ниже 0 °C, следует наблюдать за появлением конденсата, если это возможно, визуально, с тем чтобы определить, что представляет собой конденсат – переохлажденную воду или лед.

Один из полезных методов контроля заключается в сравнении измеренных значений температуры зеркала со значениями температуры воздуха, в то время когда система терморегулирования гигрометра отключена. Следует обеспечить аспирацию в приборе и при этом измерить температуру воздуха около входного отверстия канала вентиляции гигрометра. Такую проверку лучше всего проводить при стабильных условиях и отсутствии конденсации. В ясный солнечный день следует обеспечить затенение датчика и всасывающего патрубка и дать возможность установиться термическому равновесию. Для этой проверки можно увеличить скорость аспирации.

Независимая калибровка в полевых условиях устройства преобразования сигнала от термометра зеркала может быть проведена при помощи имитации такого сигнала. В случае применения платинового термометра сопротивления могут быть использованы стандартный магазин сопротивлений или декадный магазин сопротивлений и комплект соответствующих таблиц. При этом может потребоваться также специальное устройство сопряжения имитатора с блоком регулирования гигрометра.

4.5 КОНДЕНСАЦИОННЫЙ ГИГРОМЕТР С ПОДОГРЕВАЕМЫМ РАСТВОРОМ ХЛОРИДА ЛИТИЯ (ПОДОГРЕВАЕМЫЙ ГИГРОМЕТР ТОЧКИ РОСЫ)

4.5.1 Общие сведения

4.5.1.1 Принципы

Физические принципы, на которых основан метод использования подогретого солевого раствора, рассматриваются в разделе 4.1.4.5.2. Равновесное давление водяного пара над поверхностью насыщенного раствора хлорида лития является весьма низким. Вследствие этого такой раствор хлорида лития чрезвычайно гигроскопичен при типичных значениях влажности приземной атмосферы; при условии, что давление находящегося в окружающем воздухе водяного пара превышает равновесное давление пара этого раствора, водяной пар конденсируется на нем (например, при температуре 0 °C водяной пар конденсируется над плоской поверхностью насыщенного раствора хлорида лития так, что относительная влажность составляет лишь примерно 15 %).

Если нагревать данный раствор, непосредственно пропуская через него электрический ток от источника с постоянным напряжением, то можно получить термодинамически саморегулирующееся устройство. Для предотвращения поляризации раствора следует использовать переменный ток. По мере того как электропроводность понижается, уменьшается и сила тока, нагревающего раствор, и в конечном итоге достигается точка равновесия, при которой поддерживается постоянная температура. Любое охлаждение раствора ведет в результате к конденсации водяного пара, что вызывает увеличение проводимости и соответственно силы тока, нагревающего раствор, и охлаждение сменяется на обратную тенденцию. Нагревание после достижения точки равновесия приводит к испарению водяного пара до тех пор, пока последовавшее понижение проводимости не вызовет такое уменьшение электрического нагревания, что его эффект будет меньше, чем потери тепла, и за этим последует охлаждение.

Из вышесказанного следует, что существует нижний предел давления водяного пара в окружающем

воздухе, которое может быть измерено таким образом при любой заданной температуре. Ниже этого предельного значения солевой раствор должен подвергаться охлаждению с тем, чтобы обеспечить конденсацию водяного пара. И тогда этот метод будет эквивалентен методу с использованием охлаждаемого зеркала. Разница заключается в том, что при использовании последнего из упомянутых методов конденсация происходит при более низкой температуре, когда достигается насыщение относительно поверхности чистой воды, а именно, при точке росы окружающего воздуха.

Рассматриваемому методу присуща некоторая степень неопределенности, поскольку существует четыре разных гидрата хлорида лития. При определенных критических температурах два из этих гидратов могут находиться в равновесии с водной фазой, и на достигнутую путем нагревания температуру равновесия оказывает влияние происходящее затем превращение гидрата. Наиболее значимые для метеорологических целей неопределенности возникают при точке росы окружающего воздуха ниже –12 °C. При точке росы окружающего воздуха –23 °C, потенциальная разность значений температуры равновесия, в соответствии с которыми происходят превращения одного из двух растворов гидратов, приводит в результате к погрешности в ±3,5 К в расчетном значении точки росы.

4.5.1.2 Описание

Гигрометр точки росы измеряет температуру, при которой равновесное давление пара для насыщенного раствора хлорида лития равно давлению водяного пара в окружающем воздухе. Эмпирические уравнения превращения, основанные на данных о давлении насыщенного пара для раствора хлорида лития и для чистой воды, позволяют получить значения давления водяного пара и точки росы окружающего воздуха относительно плоской поверхности чистой воды. Диапазону значений точки росы от –12 до 25 °C соответствуют значения температуры на элементе для определения точки росы в пределах от 17 до 71 °C.

4.5.1.3 Датчики с прямым нагревом

Датчик состоит из трубки или катушки и вмонтированного в нее вдоль оси термометра сопротивления. Внешняя поверхность этой трубки покрыта стекловолокнистым материалом (обычно накрученным в виде ленты вокруг и вдоль трубки), который пропитан водным раствором хлорида лития, куда иногда добавляют немного хлорида калия. Снаружи на покрытие катушки намотана бифилярная серебряная или золотая проволока с равными промежутками между витками. Два конца этой бифилярной обмотки подсоединены к источнику переменного электрического тока; как правило, в качестве источника используются обычные магистральных электрические сети (50 или 60 Гц). Степень электропроводности раствора хлорида лития определяется концентрацией растворенного вещества. Ток проходит между смежными бифилярными витками, которые действуют в качестве электродов, и через раствор. Прохождение тока нагревает раствор, что повышает его температуру.

За исключением условий, когда влажность чрезвычайно низка, давление водяного пара в окружающем воздухе будет выше, чем равновесное давление водяного пара над раствором хлорида лития при температуре окружающего воздуха, и водяной пар будет конденсироваться на растворе. По мере нагревания раствора под воздействием электрического тока температура в конце концов достигнет такого значения, выше которого равновесное давление пара превысит давление пара в окружающем воздухе, начнется испарение и концентрация раствора возрастет.

Для конкретного прибора существует рабочее значение температуры равновесия, зависящая соответствующее значению давления водяного пара в окружающем воздухе. При значениях температуры выше равновесной вследствие испарения концентрация раствора будет повышаться; в результате электрический ток и нагревание уменьшатся, и потери тепла приведут к понижению температуры раствора. При значениях температуры ниже равновесной конденсация будет приводить к уменьшению концентрации раствора; в результате электрический ток и нагревание будут увеличиваться и вызывать повышение температуры раствора. При равновесной температуре не происходит ни испарения, ни конденсации, поскольку равновесное давление пара и давление водяного пара в окружающем воздухе равны.

На практике на измеряемое значение равновесной температуры оказывают влияние индивидуальные характеристики конструкции датчика, и оно обычно выше, чем значение, которое можно предсказать на основе данных о равновесном давлении водяного пара для насыщенного раствора хлорида лития. Тем не менее, воспроизводимость результатов достаточно хороша для того, чтобы считать возможным использование стандартной функции преобразования для всех датчиков, сконструированных по какой-либо заданной спецификации.

Сильная вентиляция отрицательно сказывается на характеристиках датчика, связанных с передачей

тепла, а колебания скорости вентиляции нарушают стабильность работы прибора.

Для сведения к минимуму риска прохождения слишком сильного тока в момент включения гигрометра (поскольку сопротивление раствора при температуре окружающего воздуха является довольно низким) предусматривается наличие устройства для ограничения тока в виде маленькой лампочки, которая последовательно соединена с нагреваемым элементом. Лампочка выбирается таким образом, чтобы при нормальных рабочих токах в катушке сопротивление нити накала было бы достаточно низким для надлежащего функционирования гигрометра, в то время как рабочий ток для лампы накаливания (допустимый даже для катушки, у которой электрическое сопротивление очень небольшое) должен быть ниже значения, при котором мог бы повредиться нагревающий элемент.

Равновесное давление водяного пара для насыщенного раствора хлорида лития зависит от гидрата, находящегося в равновесии с водным раствором. При диапазоне температуры раствора, соответствующего температуре точки росы от –12 °C до 41 °C, как правило, возникает моногидрат, ниже –12 °C – дигидрат, а выше 41 °C – безводный хлорид лития. Вблизи точек этих превращений работа гигрометра является нестабильной, и показания носят неопределенный характер. Однако при добавлении небольшого количества хлорида калия (KCl) нижний предел точки росы (–12 °C) может быть понижен до –30 °C.

4.5.1.4 Датчики с косвенным нагревом

Повышение точности результатов по сравнению с точностью, которая может быть получена при использовании устройства, описанного в разделе 4.5.1.2, можно достичь, если нагревать раствор хлорида лития косвенным путем. Проводимость раствора измеряется между двумя платиновыми электродами и результат измерения используется для регулирования электрического тока через нагревательную спираль.

4.5.2 Эксплуатация прибора

При использовании прибора измеряется равновесная температура катушки и применяется функция преобразования для получения температуры точки росы.

Следует предотвращать воздействие каких-либо помех работе датчика, поскольку равновесная температура чувствительна к изменениям в теплоотдаче с поверхности катушки.

Прибор должен постоянно находиться под напряжением. Если прибор по каким-либо причинам охлаждается в течение некоторого времени до температуры ниже равновесной, происходит конденсация, и электролит начинает стекать.

Следует регулярно проводить контрольные измерения, используя для сравнений рабочий эталонный гигрометр. Прибор рекомендуется по мере необходимости чистить и заново пропитывать раствором хлорида лития.

В том случае, если производителем не предусмотрено устройство для ограничения тока, его следует установить. При отсутствии такого устройства в момент включения возможны высокие значения силы тока, что может привести к повреждению датчика.

4.5.3 Размещение и установка прибора

Гигрометр следует размещать на открытой площадке в метеорологическом экране, который защищает его от воздействия ветра и дождя. Необходимо наличие системы для обеспечения постоянной скорости аспирации.

Тепло, исходящее от гигрометра, может повлиять на работу других приборов, и это следует принимать во внимание при выборе места для установки прибора.

На работу прибора могут оказать влияние находящиеся в атмосфере загрязняющие вещества, особенно вещества, которые диссоциируют в растворе, приводя к значительной концентрации в нем ионов.

4.5.4 Источники ошибок

Для измерения равновесной температуры используется электрический термометр сопротивления, и, следовательно, присутствуют обычные для этого вида термометрии источники ошибок.

Достигаемая равновесная температура определяется свойствами растворенного вещества, и значительное количество загрязняющих веществ может привести к непредсказуемым последствиям.

Колебания скорости вентиляции влияют на механизмы теплообмена и, таким образом, на стабильность работы прибора. Для стабильной работы прибора необходима постоянная скорость вентиляции.

4.5.5 Калибровка

По меньшей мере один раз в месяц следует проводить калибровку в полевых условиях путем

сравнения с рабочим эталонным прибором. Регулярно следует проводить также калибровку термометра катушки и устройства для визуального отображения температуры, как и других рабочих термометров и систем визуального отображения.

4.5.6 Уход за прибором

Необходимо регулярно обновлять раствор хлорида лития. Такая процедура может потребоваться один раз в месяц, однако это зависит от уровня загрязнения атмосферы. При обновлении раствора следует сначала промыть катушку дистиллированной водой и затем использовать свежий раствор. В это же время следует очистить корпус прибора и метеорологический экран.

Свежий раствор можно приготовить, смешав пять весовых частей безводного хлорида лития со ста весовыми частями дистиллированной воды. Это эквивалентно смеси 1 г безводного хлорида лития и 20 мл воды.

Уход за устройством для определения температуры следует осуществлять в соответствии с рекомендациями для электрических приборов, используемых для измерений температуры воздуха, не забывая, однако, при этом о разнице в диапазоне измеряемых температур.

4.6 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ГИГРОМЕТРЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ И ЕМКОСТИ

4.6.1 Общие сведения

Электрические свойства некоторых гигроскопичных материалов изменяются в зависимости от относительной влажности окружающего воздуха и при этом очень слабо зависят от температуры.

Электрические датчики относительной влажности все шире используются для дистанционных измерений, особенно там, где необходимо визуальное отображение значений относительной влажности. В связи с тем, что для многих из них характерны весьма нелинейные ответные реакции на изменения влажности, производители часто поставляют их вместе со специальными системами обработки и визуального отображения данных.

4.6.2 Электрическое сопротивление

Для метеорологических измерений могут использоваться датчики, изготовленные из химически обработанного материала, имеющего электропроводный поверхностный слой, составляющий одно целое с основой из непроводящего материала. Удельное сопротивление поверхности изменяется в зависимости от относительной влажности окружающего воздуха. Доминирующим является процесс адсорбции, а не абсорбции, поскольку чувствительной к влажности частью такого датчика является лишь поверхностный слой. В результате датчики этого типа способны быстро реагировать на изменения влажности окружающего воздуха.

В этот класс входят различные датчики электролитического типа, в которых наличие проводящих ионов в гигроскопичном электролите является функцией количества адсорбированного водяного пара. Электролит может иметь различную физическую форму: это может быть жидкий или гелиевый раствор либо ионообменная смола. Измерение изменения полного сопротивления переменному току, предпочтительней чем постоянному; такой выбор делается для того, чтобы избежать поляризации электролита. При этом можно использовать низкочастотное возбуждение, принимая во внимание, что должно быть измерено сопротивление постоянному току и, следовательно, можно применять достаточно длинные соединительные провода между датчиком и его электрическим интерфейсом.

4.6.3 Электрическая емкость

Данный метод основан на явлении изменения диэлектрических свойств твердого гигроскопичного материала в зависимости от относительной влажности окружающего воздуха. Наиболее часто используются полимерные материалы. Вода, находящаяся в связанном состоянии в полимере, изменяет его диэлектрические свойства вследствие большого дипольного момента молекулы воды.

Активная часть датчика влажности состоит из полимерной пленки и двух электродов, между которыми эту пленку помещают с целью образования конденсатора. Полное сопротивление этого конденсатора служит основой для измерения относительной влажности. Номинальное значение емкости может составлять лишь несколько сот пикофарад в зависимости от размера электродов и толщины диэлектрика. Это, в свою очередь, влияет на диапазон частоты возбуждения, которая используется для измерения полного сопротивления данного устройства и, как правило, составляет, по меньшей мере, несколько килогерц; соответственно требуется, чтобы между датчиком и электрическим интерфейсом соединения были короткими для сведения к минимуму паразитной емкости. Таким образом, устройство электрического сопряжения датчиков емкости встроено, как правило, в элемент связи, и

необходимо учитывать влияние температуры окружающей среды на функционирование компонентов данной цепи.

4.6.4 Процедура наблюдения

Датчики, работа которых основана на изменениях электрических свойств гигроскопичных материалов, часто используются для дистанционного измерения относительной влажности, а также в автоматических метеорологических станциях.

4.6.5 Размещение и установка прибора

Датчики следует монтировать внутри психрометрической будки, руководствуясь инструкциями производителей относительно установки каждого конкретного датчика. Использование защитных фильтров является обязательным. Прямой контакт с водой в жидком состоянии может серьезно повредить датчики, в которых в качестве чувствительного элемента используется гигроскопичный электролит. Соответственно следует очень внимательно следить за тем, чтобы вода в жидком состоянии не попала на чувствительный элемент таких датчиков.

4.6.6 Калибровка

Калибровка, как в полевых, так и в лабораторных условиях, должна проводиться так же, как и для волосных гигрометров. Для большинства датчиков данного типа имеется подходящее вспомогательное оборудование, позволяющее проводить проверки с использованием соляных растворов.

4.6.7 Уход за прибором

Наблюдателям следует содержать гигрометр в чистоте (см. раздел 4.1.4.10).

4.7 ГИГРОМЕТРЫ, ОСНОВАННЫЕ НА ПОГЛОЩЕНИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Молекула воды поглощает электромагнитное излучение (ЭМИ) в ряде диапазонов длин волн и на дискретных длинах волн, и это свойство можно использовать для определения молекулярной концентрации водяного пара в газе. Наиболее подходящими для этой цели участками электромагнитного спектра являются ультрафиолетовая и инфракрасная области. Соответственно эти методы часто классифицируются как оптическая гигрометрия или, что более правильно, абсорбционная электромагнитная гигрометрия.

Данный метод основан на измерении ослабления излучения в полосах поглощения водяным паром на трассе между источником излучения и принимающим устройством. Существуют два основных метода для определения степени ослабления излучения:

(a) передача излучения с фиксированной интенсивностью в узком диапазоне к прокалиброванному принимающему устройству. Наиболее часто в качестве источника излучения используется газообразный водород: спектр излучения водорода включает спектральную линию Лаймана-α (121,6 нм), которая совпадает с полосой поглощения водяным паром в ультрафиолетовой области, где наблюдается совсем незначительная абсорбция со стороны других обычных атмосферных газов. Длина измерительной базы составляет, как правило, несколько сантиметров;

(b) передача излучения на двух длинах волн, на одной из которых оно активно поглощается водяным паром, а на другой – либо совсем не поглощается, либо поглощается очень слабо. В том случае, когда для генерации излучения на двух разных длинах волн используется один и тот же источник, можно иметь точные сведения о соотношении значений их интенсивности. Измеряя соотношения значений их интенсивности на принимающем устройстве, можно определить ослабление абсорбированного излучения с известной длиной волны. Наиболее часто в качестве источника при этом используется вольфрамовая лампа накаливания, оборудованная светофильтром для выделения пары длин волн в инфракрасном диапазоне. Длина измерительной базы составляет в данном случае, как правило, более 1 м.

Оба типа гигрометров, основанных на ослаблении электромагнитного излучения, требуют частой калибровки и больше пригодны для измерения изменений концентрации водяного пара, чем для измерения абсолютных значений. Наиболее часто такие гигрометры применяются для мониторинга происходящих с большой частотой изменений влажности, поскольку при этом методе не требуется достижения равновесия давления водяного пара с пробой. Постоянная времени оптического гигрометра составляет обычно всего несколько миллисекунд. Использование оптических гигрометров ограничивается лишь научно-исследовательской деятельностью.

4.8 ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

При измерениях влажности достаточно широко используются химические вещества. Свойства таких веществ должны быть хорошо известны работающему

с ними персоналу. Все химические вещества следует держать в безопасной таре с четкими этикетками и хранить в надлежащих условиях. Местными властями могут предписываться правила, касающиеся использования токсических веществ.

При измерениях влажности широко используются насыщенные солевые растворы. Ниже приводятся краткие рекомендации относительно безопасного использования некоторых наиболее часто применяемых солей:

(a) хлорид бария ($BaCl_2$): вещество в виде бесцветных кристаллов; легко растворяется в воде; устойчивое, но при пожаре может испускать токсичный дым; никаких опасных реакций с водой, кислотами, основаниями, окислителями или горючими веществами; при проглатывании возникает тошнота, рвота, боли в животе и диарея; опасно при вдыхании в виде пыли, при контакте с кожей, раздражает глаза; при контакте смывать большим количеством воды, а в случае проглатывания обращаться за медицинской помощью;

(b) хлорид кальция ($CaCl_2$): вещество в виде бесцветных кристаллов, поглощающее влагу из воздуха; легко растворяется в воде, причем растворение идет с большим выделением тепла; инициирует экзотермическую полимеризацию метилвинилового эфира; может реагировать с цинком, высвобождая водород; никаких опасных реакций с кислотами, основаниями, окислителями или горючими веществами; оказывает раздражающее действие на кожу, глаза и систему дыхания; проглатывание вызывает раздражение желудочно-кишечного тракта; проглатывание большого количества может привести к гиперкальциемии, обезвоживанию организма и повреждению почек; при необходимости промывать обильно водой и обращаться за медицинской помощью;

(c) хлорид лития (LiCl): вещество в виде бесцветных кристаллов; устойчивое, если хранится в сухих условиях; легко растворяется в воде; при пожаре испускает токсичный дым; проглатывание может повлиять на ионный баланс крови и привести к анорексии, диарее, рвоте, головокружению и нарушениям работы центральной нервной системы; если прием натрия недостаточен, может наступить повреждение почек (необходимо давать пострадавшему много воды и обратиться за медицинской помощью); никаких опасных реакций с водой, кислотами, основаниями, окислителями или горючими веществами;

(d) нитрат магния ($Mg(NO_3)_2$): вещество в виде бесцветных кристаллов; легко впитывает влагу; легко растворяется в воде; может воспламенить горючий материал; может очень активно реагировать с восстанавливающими материалами, может самопроизвольно разложиться, превратившись в диметилформамид; при пожаре может испускать токсичный дым (бороться с огнем следует при помощи водяной струи); проглатывание большого количества может привести к фатальному исходу (пострадавшему следует давать много воды и обратиться за медицинской помощью); может оказывать раздражающее действие на кожу и глаза (промывать водой);

(e) нитрат калия (KNO_3): вещество в виде белых кристаллов или кристаллического порошка; легко растворяется в воде; устойчиво, однако при пожаре может выделять ядовитый дым (бороться с огнем следует при помощи водяной струи); проглатывание большого количества может привести к рвоте, однако это вещество быстро выделяется с мочой (пострадавшему следует давать много воды); может вызвать раздражение глаз (следует промывать глаза водой); никаких опасных реакций с водой, кислотами, основаниями, окислителями или горючими веществами;

(f) хлорид натрия (NaCl): вещество в виде бесцветных кристаллов или белого порошка; легко растворяется в воде; устойчиво; никаких опасных реакций с водой, кислотами, основаниями, окислителями или горючими веществами; проглатывание большого количества может привести к диарее, тошноте, рвоте, глубокому и быстрому дыханию и судорогам (в тяжелых случаях следует обращаться за медицинской помощью).

Рекомендации относительно безопасного использования ртути приведены в части I, глава 3.

4.9 ЭТАЛОННЫЕ ПРИБОРЫ И КАЛИБРОВКА

4.9.1 Принципы калибровки гигрометров

Точность, необходимая при калибровке датчиков влажности, обусловливает ряд особых проблем, которые в значительной степени связаны с тем, что в пробе воздуха при нормальной температуре может содержаться относительно небольшое количество водяного пара, а также с тем, что в целом трудно изолировать газы в каком-либо контейнере, и в частности водяной пар. Упорядоченная иерархия международного единства эталонных

измерений влажности начинает формироваться лишь сейчас.

Абсолютный эталон для измерения влажности (а именно, реализация физического определения влагосодержания) может быть реализован на использовании методов и средств гравиметрической гигрометрии. Эталонный психрометр (в рамках его ограниченного диапазона) также является одним из видов первичного эталона, поскольку его рабочие характеристики могут быть рассчитаны. Калибровка вторичных, сравнительных и рабочих эталонов производится в несколько этапов. В таблице 4.4 в компактной форме представлены эталонные средства измерения и воспроизведения значений влажности и их основные характеристики.

На практике калибровка в полевых условиях обычно производится при помощи хорошо сконструированных аспирационных психрометров и датчиков точки росы в качестве рабочих эталонов. Эти специальные виды эталонов путем тщательных процедур должны быть сравнены с эталонами более высокого уровня. Любой прибор, используемый в качестве

Таблица 4.4. Эталонные приборы для измерений влажности

Эталонный прибор	*Точка росы*			*Относительная влажность*		
	Диапазон, °C		*Неопределенность, K*	*Диапазон, %*		*Неопределенность, K*
	от	*до*		*от*	*до*	
Первичный стандарт						
Требование	–60	–15	0,3	5	100	0,2
	–15	40	0,1	5	100	0,2
Гравиметрический (весовой) гигрометр	–60	–35	0,25			
	–35	35	0,03			
	35	60	0,25			
Эталонный двухтемпературный генератор влажности	–75	–15	0,25			
	–15	30	0,1			
	30	80	0,2			
Эталонный генератор влажности на двух давлениях	–75	30	0,2			
Вторичный эталон						
Требование	–80	–15	0,75	5	100	0,5
	–15	40	0,25			
Гирометр с охлаждаемым зеркальцем	–60	–40	0,15			
Контрольный психрометр				5	100	0,6
Контрольный эталон						
Требование	–80	–15	1,0	5	100	1,5
	–15	40	0,3			
Контрольный психрометр				5	100	0,6
Гирометр с охлаждаемым зеркальцем	–60	40	0,3			
Рабочий эталон						
Требование	–15	40	0,5	5	100	2
Психрометр Ассмана	–10	25		40	90	1
Гирометр с охлаждаемым зеркальцем	–10	30	0,5			

эталона, должен быть индивидуально прокалиброван по всем параметрам, связанным с расчетом влажности (температура воздуха, температура смоченного термометра, точка росы и т. д.). Должны быть учтены также и другие факторы, влияющие на работу этих приборов, такие как скорость воздушного потока.

4.9.2 Интервалы и методы калибровки

Все датчики влажности, работающие в полевых условиях, должны регулярно проходить процедуру поверки. В случае гигрометров с охлаждаемым зеркалом и нагреваемых гигрометров точки росы, в которых используется измерительный преобразователь температуры, состояние калибровки этого элемента может проверяться каждый раз, когда проводится регулярная установленная процедура обслуживания. Сравнения с рабочим эталоном, таким как психрометр Ассмана, следует проводить, по меньшей мере, один раз в месяц.

Преимущество использования аспирационного психрометра эталонного типа, такого как психрометр Ассмана, в качестве рабочего эталона заключается в том, что путем сравнения показаний смоченного и сухого термометров можно проверить безошибочность его собственной работы и что от хорошо работающего вентилятора можно ожидать надлежащей аспирации. Эталонный прибор должен и сам проходить калибровку через установленные для его типа интервалы времени.

Насыщенные растворы солей применяются при работе с такими датчиками, для которых необходим лишь небольшой объем воздуха. При этом требуется очень стабильная температура окружающего воздуха, и поэтому трудно быть уверенным в надежности результатов их использования в полевых условиях. В случае использования растворов солей для контрольных целей следует иметь в виду, что номинальное значение влажности, приписываемое тому или иному раствору, не связано с каким-либо первичным эталоном.

4.9.3 Лабораторная калибровка

Лабораторная калибровка, необходимая для поддержания требуемой точности, производится следующим образом:

(a) Используемые в полевых и рабочих условиях эталонные приборы: лабораторная калибровка используемых в полевых и рабочих условиях эталонных приборов должна проводиться на той же самой регулярной основе, что и для рабочих термометров. Для этой цели блок датчика с охлаждаемым зеркалом может рассматриваться отдельно от блока управления. Термометр зеркала тогда может проходить автономную калибровку, а блок управления следует калибровать на той же самой регулярной основе, что и другие элементы прецизионного электронного оборудования. Калибровка используемого в полевых условиях прибора в генераторе влажности не является строго обязательной, если его компоненты были прокалиброваны отдельно, как это описано выше.

Правильность работы прибора может быть проверена в стабильных условиях в помещении путем сравнения с образцовым прибором, таким как психрометр Асмана или эталонный гигрометр с охлаждаемым зеркалом. В том случае, когда в используемый в полевых условиях прибор встроен детектор льда, следует проверять правильность работы и этой системы.

(b) Образцовые и эталонные приборы: для лабораторной калибровки образцовых и эталонных приборов требуются прецизионный генератор влажности и подходящий переносной эталонный гигрометр. Генераторы влажности с использованием двух значений температуры и двух значений давления могут обеспечить соответствующий контролируемый поток воздуха при заранее определенной температуре воздуха и точке росы. Калибровку следует проводить, по меньшей мере, каждые 12 месяцев и для полного диапазона применений данного прибора в качестве образца. Калибровка термометра зеркала и системы визуального отображения температуры должна проводиться независимо, по меньшей мере, один раз в 12 месяцев.

4.9.4 Первичные эталоны

4.9.4.1 Гравиметрическая гигрометрия

Гравиметрический метод позволяет получить абсолютную меру содержания водяного пара в пробе воздуха, выраженную в виде его отношения смеси. Это достигается путем первоначального извлечения водяного пара из пробы воздуха с использованием известной массы сушильного агента, такого как безводная пятиокись фосфора (P_2O5) или перхлорат магния ($M_8(ClO_4)_2$). Масса водяного пара определяется путем взвешивания сушильного агента перед абсорбцией пара и после нее. Масса сухого образца определяется либо путем взвешивания, либо путем измерения его объема (если известна его плотность).

Сложность устройства, необходимого для точного проведения описанной процедуры, ограничивает

применение данного метода лишь лабораторными условиями. Кроме того, для проведения точных измерений требуется значительная по объему проба воздуха, а для используемого на практике устройства необходим устойчивый поток влажного газа в течение ряда часов в зависимости от влажности с тем, чтобы извлечь достаточную массу водяного пара для точного измерения путем взвешивания. Вследствие этого применение данного метода ограничивается калибровкой лишь абсолютного сравнительного эталона. Такой прибор используется главным образом в национальных лабораториях для калибровки эталонов.

4.9.4.2 Динамический эталонный генератор влажности с использованием двух давлений

Данное лабораторное устройство служит в качестве источника влажного газа, относительная влажность которого определяется абсолютным методом. Поток газа-носителя (воздуха) пропускается через камеру насыщения при давлении P_1 и затем изотермически расширяется во второй камере при более низком давлении P_2. В обеих камерах поддерживается одна и та же температура с помощью масляной ванны, в которую они помещены. Влажность смеси водяного пара и газа находится в прямой взаимосвязи с общим давлением в каждой из двух камер, согласно закону Дальтона о парциальном давлении газов, т. е. отношение парциального давления e' пара в камере с низким давлением к давлению насыщенного пара e'_w будет таким же, как и отношение общего давления в камере насыщения с высоким давлением к общему давлению в камере с низким давлением. Таким образом, относительная влажность U_w рассчитывается по формуле:

$$U_w = 100 \cdot e'/e'_w = 100 \cdot P_1/P_2 \qquad (4.5)$$

Это соотношение также верно для твердой фазы, если газ насыщен относительно льда при давлении P_1:

$$U_i = 100 \cdot e'/e'_i = 100 \cdot P_1/P_2 \qquad (4.6)$$

4.9.4.3 Динамический эталонный генератор влажности с использованием двух температур

Данное лабораторное устройство обеспечивает поток увлажненного газа с температурой T_1 температура точки росы или точки инея которого составляет T_2. Две терморегулируемые ванны, каждая из которых оборудована теплообменниками и, кроме того, одна – камерой насыщения, содержащей либо воду, либо лед, используются для того, чтобы сначала насытить поток воздуха при температуре T_1 а затем изобарически нагреть его до температуры T_2. В практических конструкциях поток воздуха постоянно циркулирует для обеспечения насыщения. Калибруемые приборы пропускают через себя часть воздуха при температуре T_2 со скоростью, значение которой невелико по сравнению со скоростью основной циркуляции.

4.9.5 Вторичные эталоны

Вторичный эталонный прибор следует хранить очень бережно и выносить из калибровочной лаборатории только для калибровки в сравнении с первичным эталоном или взаимосравнения с другими вторичными эталонами. Вторичные эталоны могут использоваться как переходные от первичных эталонов.

Гигрометр с охлаждаемым зеркалом может использоваться в качестве вторичного эталонного прибора при контролируемых условиях температуры, влажности и давления воздуха. Для этого он должен иметь документы о калибровке от какой-либо признанной, официально уполномоченной лаборатории, в которых приведены пределы неопределенности для всего рабочего диапазона данного прибора. Эта калибровка должна напрямую по первичному эталону. Калибровку следует повторять через надлежащий интервал времени (как правило, один раз в 12 месяцев).

Общие сведения о гигрометре с охлаждаемым зеркалом приведены в разделе 4.4. Этот гигрометр основан на одном из фундаментальных методов определения влажности атмосферы. При условии, что прибор обслуживается и эксплуатируется в полном соответствии с инструкциями производителя, он может обеспечивать первичное измерение точки росы и точки инея в пределах неопределенности, зависящей от соотношения между температурой поверхности зеркала в надлежащей точке цикла конденсации/испарения и температурой, зарегистрированной термометром зеркала во время наблюдения. При использовании этого метода необходимо учитывать эффекты Кельвина и Рауля в отношении температуры конденсации, а при использовании соотношения, приведенного в разделе 4.4.1.2, следует принимать во внимание любые изменения давления воздуха, связанные с техникой отбора проб.

4.9.6 Рабочие эталоны (и образцовые приборы для полевых условий)

Гигрометр с охлаждаемым зеркалом или психрометр Ассмана могут использоваться в качестве рабочего эталона для сравнений в окружающей

среде в полевых или лабораторных условиях. Для этой цели необходимо проводить сравнения, по меньшей мере, на уровне сравнительного эталона и делать это не реже одного раза в 12 месяцев в стабильных условиях внутри помещения. Для рабочего эталона требуется надлежащее аспирационное устройство для отбора проб воздуха.

4.9.7 Эталонный психрометр ВМО

Психрометр этого типа является по существу первичным эталоном, поскольку эксплуатационные характеристики данного прибора могут быть установлены с помощью расчетов. Однако в основном он используется в качестве высокоточного образцового прибора, и в частности, для типовой поверки других приборных систем в полевых условиях. Он предназначен для использования в качестве автономного прибора, размещаемого рядом с приборами в метеорологической будке или в других полевых условиях, и это должно быть сделано в полном соответствии с его общей спецификацией. Данный прибор должен эксплуатироваться высококвалифицированным персоналом, имеющим опыт выполнения точных измерений в лабораторных условиях; при этом необходимо уделять надлежащее внимание аспирации и очень тщательно следить за тем, чтобы не происходило загрязнения смоченного термометра от пальцев оператора или от других предметов. Существуют, однако, простые контрольные проверки, при помощи которых можно определить правильность показаний в любой момент времени, и к этим поверкам следует часто прибегать в ходе работы. Описание и инструкции по оперативной эксплуатации психрометра приведены в публикации ВМО (1992).

4.9.8 Насыщенные растворы солей

Для калибровки датчиков относительной влажности могут быть использованы сосуды, содержащие насыщенные растворы определенных солей. Ниже перечислены наиболее часто используемые соли и значения относительной влажности над насыщенным раствором соли при температуре 25 °C:

Хлорид бария ($BaCl_2$): 90,3 %
Хлорид натрия (NaCl): 75,3 %
Нитрат магния ($Mg(NO_3)_2$): 52,9 %
Хлорид кальция ($CaCl_2$): 29,0 %
Хлорид лития (LiCl): 11,1 %

Важно, чтобы площадь поверхности раствора была достаточно велика по сравнению с площадью влагочувствительного элемента датчика и находящимся над раствором объемом воздуха, изолированным от внешней среды, с тем, чтобы можно было быстро достичь равновесия; при этом для проверяемого датчика требуется непроницаемое для внешнего воздуха входное отверстие. Температуру сосуда следует измерять и поддерживать постоянной, поскольку для большинства солей существует значительная температурная зависимость равновесного значения относительной влажности над поверхностью насыщенного водного раствора соответствующей соли.

При использовании насыщенных растворов солей следует проявлять осторожность. Работающий с этими растворами персонал должен быть осведомлен о степени токсичности и коррозионной активности этих растворов. Использование перечисленных выше солей довольно безопасно, однако важно избегать их контактов с кожей, их проглатывания и попадания в глаза. Эти соли следует всегда хранить в безопасной и тщательно промаркированной таре, на которой должны быть подробно указаны все возможные последствия неосторожного обращения с ними. Необходимо проявлять осторожность при растворении кристаллов хлорида кальция в воде, поскольку при этом выделяется много тепла. Более подробные сведения об опасности при обращении с этими химическими веществами изложены в разделе 4.8.

Несмотря на то, что использование насыщенных растворов солей обеспечивает простой метод регулировки некоторых датчиков (относительной) влажности, такая их регулировка не может рассматриваться как калибровка по эталонам. (Номинальные) значения влажности для растворов солей в настоящее время не сопоставляются со значениями от эталонов. Измерения, проводимые датчиками, отрегулированными при помощи метода насыщенных растворов солей, следует всегда проверять после такой регулировки с помощью эталонов для калибровки.

ПРИЛОЖЕНИЕ 4.A

ВОДЯНОЙ ПАР В АТМОСФЕРЕ – ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

(принятые на основе Технического регламента (ВМО-№. 49), том I, Приложение B)

(1) ***Отношение смеси r*** влажного воздуха есть отношение массы водяного пара m_v к массе сухого воздуха m_a, с которой водяной пар находится в смеси:

$$r = \frac{m_v}{m_a} \qquad (4.A.1)$$

(2) ***Удельная влажность, массовая доля или содержание влаги q*** влажного воздуха есть отношение массы водяного пара mv к массе влажного воздуха $m_v + m_a$, в котором содержится водяной пар массой m_v:

$$q = \frac{m_v}{m_v + m_a} \qquad (4.A.2)$$

(3) ***Концентрация пара (плотность водяного пара в смеси), или абсолютная влажность:*** Для смеси водяного пара и сухого воздуха концентрация пара *v* определяется как отношение массы пара mv к объему *V*, занимаемому смесью:

$$\rho_v = \frac{m_v}{V} \qquad (4.A.3)$$

(4) ***Молярная доля водяного пара пробы влажного воздуха***: Молярная доля x_v водяного пара в пробе влажного воздуха, состоящей из сухого воздуха массой m_a и водяного пара массой m_v определяется отношением числа грамм-молекул водяного пара ($n_v = m_v/M_v$) к общему числу грамм-молекул пробы $n_v + n_a$, где n_a число грамм-молекул сухого воздуха ($n_a = m_a/M_a$) испытуемого образца. В результате получаем:

$$x_v = \frac{n_v}{n_a + n_v} \qquad (4.A.4)$$

или:

$$x_v = \frac{r}{0{,}621\,98 + r} \qquad (4.A.5)$$

где *r* – отношение смеси ($r = m_v/m_a$) водяного пара пробы влажного воздуха.

(5) ***Парциальное давление водяного пара e'*** во влажном воздухе при общем давлении *p* и при отношении смеси *r* определяется следующим образом:

$$e' = \frac{r}{0{,}621\,98 + r}\, p = x_v \cdot p \qquad (4.A.6)$$

(6) ***Насыщение:*** Влажный воздух при данных температуре и давлении считается насыщенным, если его отношение смеси таково, что этот влажный воздух находится в состоянии безразличного равновесия относительно конденсированной фазы (жидкой или твердой) при тех же температуре и давлении, причем поверхность раздела плоская.

(7) ***Отношение смеси при насыщении:*** Символ rw обозначает отношение смеси насыщенного влажного воздуха над плоской поверхностью жидкости. Символ r_i обозначает отношение смеси насыщенного влажного воздуха над плоской поверхностью твердой фазы. Понятия жидкой и твердой фазы относятся к почти чистой воде и почти чистому льду соответственно; каждая их этих субстанций содержит определенное количество растворенного воздуха.

(8) ***Давление насыщенного водяного пара в чистой фазе:*** Давление чистого водяного пара e_w в состоянии насыщения есть давление пара в состоянии его безразличного равновесия над плоской поверхностью химически чистой воды при неизменных значениях температуры и давления; точно так же можно определить e_i по отношению ко льду; e_w и e_i – функции, зависящие исключительно от температуры, а именно:

$$e_w = e_w\,(T) \qquad (4.A.7)$$

$$e_i = e_i\,(T) \qquad (4.A.8)$$

(9) ***Молярная доля водяного пара во влажном воздухе, насыщенном относительно воды:*** Молярная доля водяного пара, насыщенного по отношению к воде при давлении p и температуре *T*, есть молярная доля x_{vw} водяного пара пробы влажного воздуха при тех же температуре и давлении, которая находится в устойчивом равновесии над плоской поверхностью воды, содержащей некоторое количество растворенного воздуха, соответствующее состоянию равновесия. Подобным образом через x_{vi} обозначена молярная доля водяного пара, насыщенного относительно плоской поверхности льда и содержащего соответственно равновесное количество растворенного воздуха.

(10) ***Давление насыщенного водяного пара влажного воздуха:*** Давление насыщенного пара e'_w во влажном воздухе относительно воды при давлении p и температуре T определяется по следующей формуле:

$$e'_w = \frac{r_w}{0{,}62198 + r_w} \cdot p = x_{vw} \cdot p \qquad (4.A.9)$$

Подобным образом давление насыщенного пара во влажном воздухе относительно льда e'_i при давлении p и температуре T определяется по формуле:

$$e'_i = \frac{r_i}{0{,}62198 + r_i} \cdot p = x_{vi} \cdot p \qquad (4.A.10)$$

(11) ***Соотношение между давлением насыщенного пара в чистой фазе и во влажном воздухе:*** В метеорологическом диапазоне изменения атмосферного давления и температуры справедливы следующие равенства при ошибке не более 0,5 %:

$$e'_w = e_w \qquad (4.A.11)$$

$$e'_i = e_i \qquad (4.A.12)$$

(12) ***Термодинамическая температура точки росы T_d*** влажного воздуха при давлении p и отношении смеси r есть температура, при которой отношение смеси насыщения r_w влажного воздуха, насыщенного по отношению к поверхности воды при том же давлении, равно данному отношению смеси r.

(13) ***Термодинамическая температура точки инея T_f*** влажного воздуха при давлении p и отношении смеси r есть температура, при которой отношение смеси насыщения r_i влажного воздуха, насыщенного по отношению к поверхности льда при том же давлении, равно данному отношению смеси r.

(14) ***Температуры точки росы и точки инея***, определенные указанным образом, связаны с отношением смеси r и давлением p следующими уравнениями:

$$e'_w(P, T_d) = f(p) \cdot e_w(T_d) = x_v \cdot p = \frac{r \cdot p}{0{,}62198 + r} \qquad (4.A.13)$$

$$e'_i(P, T_f) = f(p) \cdot e_i(T_f) = x_v \cdot p = \frac{r \cdot p}{0{,}62198 + r} \qquad (4.A.14)$$

(15)[1] ***Относительная влажность воздуха U_w по отношению к воде*** при давлении p и температуре T есть процентное отношение молярной доли водяного пара x_v к молярной доле пара x_{vw} которая имелась бы во влажном воздухе, если бы он был насыщен по отношению к воде при тех же значениях давления p и температуры T. Таким образом:

$$U_w = 100\left(\frac{x_v}{x_{vw}}\right)_{p,T} = 100\left(\frac{px_v}{px_{vw}}\right)_{p,T} = 100\left(\frac{e'}{e'_w}\right)_{p,T} \qquad (4.A.15)$$

где индексы p,T указывают, что каждый член уравнения соответствует идентичным условиям в отношении давления и температуры. Последнее выражение формально подобно классическому определению, основанному на положении закона Дальтона о парциальном давлении.

U_w также связано с отношением смеси r следующим образом:

$$U_w = 100\frac{r}{r_w} \cdot \frac{0{,}62198 + r_w}{0{,}62198 + r} \qquad (4.A.16)$$

где e_{rw} – отношение смеси насыщения при давлении и температуре влажного воздуха.

(16)[2] ***Относительная влажность воздуха U_i по отношению ко льду*** при давлении p и температуре T есть процентное отношение молярной доли водяного пара x_v к молярной доле пара x_{vi} которая содержалась бы в воздухе, если бы он был насыщен по отношению ко льду при тех же значениях давления p и температуры T. В соответствии с уравнением, приведенным в пункте 15, получаем:

$$U_i = 100\left(\frac{x_v}{x_{vi}}\right)_{p,T} = 100\left(\frac{px_v}{px_{vi}}\right)_{p,T} = 100\left(\frac{e'}{e'_i}\right)_{p,T} \qquad (4.A.17)$$

(17) ***Относительная влажность при значениях температуры ниже 0 °C*** должна оцениваться по отношению к воде. Такая процедура имеет следующие преимущества:

(a) большинство гигрометров определяет относительную влажность по отношению к воде при всех значениях температуры;

(b) большинство облаков при температуре ниже 0 °C состоят из воды или преимущественно из воды;

(c) относительная влажность, превышающая 100 %, как правило, не наблюдается; это особенно важно для синоптических сводок

1 Уравнения 4.A.15 и 4.A.17 не применяются для влажного воздуха, когда давление p меньше, чем давление насыщенного пара относительно чистой воды и льда, соответственно при температуре T.

2 Энтальпия системы в состоянии равновесия при давлении p и температуре T определяется как $E + pV$, где E внутренняя энергия системы, а V – ее объем. Сумма энтальпий фаз закрытой системы сохраняется в адиабатических изобарических процессах.

погоды, поскольку атмосфера часто перенасыщена по отношению ко льду при значениях температуры ниже 0 °C;

(d) большая часть существующего массива данных об относительной влажности при значениях температуры ниже 0 °C содержит значения, определенные при насыщении по отношению к воде.

(18) ***Термодинамическая температура смоченного термометра во влажном воздухе*** при давлении p, температуре T и отношении смеси r есть температура T_w, которую имел бы влажный воздух, если его адиабатически привести к насыщению при давлении p посредством испарения воды в жидком состоянии при тех же давлении p и температуре T_w и в которой содержится некоторое количество растворенного воздуха, соответствующее состоянию равновесия с насыщенным воздухом при тех же давлении и температуре. Значение T_w определяется по уравнению:

$$h(p,T,r)+[r_w(p,T_w)-r]h_w(p,T_w) = h(p,T_w,r_w(p,T_w)) \qquad (4.A.18)$$

где $r_w(p,T_w)$ – отношение смеси насыщенного влажного воздуха при давлении p и температуре T_w; $h_w(p,T_w)$ – энтальпия[3] 1 грамма чистой воды при давлении p и температуре T_w; $h(p,T,r)$ – энтальпия 1 + r_w граммов влажного воздуха, состоящего из 1 грамма сухого воздуха и r граммов водяного пара, при давлении p и температуре T; и $h(p,T_w,r_w(p,T_w))$ – энтальпия 1 + r_w граммов насыщенного воздуха, состоящего из 1 грамма сухого воздуха и r_w граммов водяного пара, при давлении p и температуре T_w. (Это функция исключительно p и T_w и может быть обозначена соответственно как $h_{sw}(p,T_w)$.)

Если воздух и водяной пар рассматриваются как идеальные газы с постоянной удельной теплотой, то приводимое выше уравнение принимает вид:

$$T-T_w=\frac{[r_w(p,T_w)-r]L_v(T_w)}{c_{pa}+rc_{pv}} \qquad (4.A.19)$$

где $L_v(T_w)$ – теплота парообразования воды при температуре T_w, c_{pa} – удельная теплоемкость сухого воздуха при постоянном давлении; и c_{pv} – удельная теплоемкость водяного пара при постоянном давлении.

Примечание: Термодинамическая температура смоченного термометра, как она определена здесь, в течение некоторого времени называлась инженерами по кондиционированию воздуха «температурой адиабатического насыщения».

(19) ***Термодинамическая температура смоченного термометра, покрытого льдом, во влажном воздухе*** при давлении p, температуре T и отношении смеси r есть температура T_i, при которой чистый лед при давлении p должен испаряться во влажный воздух, чтобы адиабатически привести его к состоянию насыщения при давлении p и температуре T_i. Насыщение определяется по отношению ко льду. Значение T_i находится из уравнения:

$$h(p,T,r)+[r_i(p,T_i)-r]h_i(p,T_i) = h(p,T_i,r_i(p,T_i)) \qquad (4.A.20)$$

где $r_i(p, T_i)$ – отношение смеси насыщенного влажного воздуха при давлении p и температуре T_i; $h_i(p, T_i)$ – энтальпия 1 грамма чистого льда при давлении p и температуре T_i; $h(p,T,r)$ – энтальпия 1 + r граммов влажного воздуха, состоящего из 1 грамма сухого воздуха и r граммов водяного пара, при давлении p и температуре T; и $h(p,T_i,r_i(p,T_i))$ – энтальпия 1 + r_i граммов насыщенного воздуха, состоящего из 1 грамма сухого воздуха и r_i граммов водяного пара, при давлении p и температуре T_i. (Это функция исключительно p и T_i и может быть обозначена соответственно через $h_{si}(p,T_i)$.)

Если воздух и водяной пар рассматриваются как идеальные газы с постоянной удельной теплоемкостью, приведенное выше уравнение принимает вид:

$$T-T_i=\frac{[r_i(p,T_i)-r]L_s(T_i)}{c_p+rc_{pv}} \qquad (4.A.21)$$

где Ls(Ti) есть теплота сублимации льда при температуре T_i.

Связь между T_w и T_i и температура смоченного водой или покрытого льдом резервуара термометра согласно показаниям отдельного психрометра – это вопрос, который должен определяться посредством тщательно контролируемого эксперимента с учетом разнообразных параметров, например вентиляции, размера резервуара и радиации.

3 Энтальпия системы в состоянии равновесия при давлении p и температуре T определяется как $E + pV$, где E внутренняя энергия системы, а V – ее объем. Сумма энтальпий фаз закрытой системы сохраняется в адиабатических изобарических процессах.

ПРИЛОЖЕНИЕ 4.B

ФОРМУЛЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК ВЛАЖНОСТИ

(см. также раздел 4.1.2)

Давление насыщенного пара:

$e_w(t) = 6.112 \exp [17.62\, t/(243.12 + t)]$ — Вода (от –45 до 60 °C) (чистая фаза)

$e'_w(p,t) = f(p) \cdot e_w(t)$ — Влажный воздух

$e_i(t) = 6.112 \exp [22.46\, t/(272.62 + t)]$ — Лед (от –65 до 0 °C) (чистая фаза)

$e'_i(p,t) = f(p) \cdot e_i(t)$ — Влажный воздух

$f(p) = 1.0016 + 3.15 \cdot 10^{-6}\, p - 0.074\, p^{-1}$ — [см. Примечание]

Точка росы и точка инея:

$$t_d = \frac{243.12 \cdot \ln\left[e' / 6.112 f(p)\right]}{17.62 - \ln\left[e' / 6.112 f(p)\right]}$$ — Вода (от –45 до 60 °C)

$$t_f = \frac{272.62 \cdot \ln\left[e' / 6.112 f(p)\right]}{22.46 - \ln\left[e' / 6.112 f(p)\right]}$$ — Лед (от –65 до 0 °C)

Психрометрические формулы для психрометра Ассмана:

$e' = e'_w(p,t_w) - 6.53 \,.\, 10^{-4} \cdot (1 + 0.000\,944\, t_w) \cdot p \cdot (t - t_w)$ — Вода

$e' = e'_i(p,t_i) - 5.75 \,.\, 10^{-4} \cdot p \cdot (t - t_i)$ — Лед

Относительная влажность:

$U = 100\, e'/e'_w(p,t)$ %

$U = 100\, e'_w(p,t_d)/e'_w(p,t)$ %

Условные обозначения:

t = температура воздуха (температура сухого термометра);
t_w = температура смоченного термометра;
t_i = температура смоченного термометра, покрытого льдом;
t_d = точка росы;
t_f = точка инея;
p = давление влажного воздуха;
$e_w(t)$ = давление насыщенного водяного пара в чистой фазе относительно воды при температуре сухого термометра;
$e_w(t_w)$ = давление насыщенного водяного пара в чистой фазе относительно воды при температуре смоченного термометра;
$e_i(t)$ = давление насыщенного водяного пара в чистой фазе относительно льда при температуре сухого термометра;
$e_i(t_i)$ = давление насыщенного водяного пара в чистой фазе относительно льда при температуре смоченного термометра, покрытого льдом;
$e'_w(t)$ = давление насыщенного водяного пара влажного воздуха относительно воды при температуре сухого термометра;

$e'_w(t_w)$ = давление насыщенного водяного пара влажного воздуха относительно воды при температуре смоченного термометра;

$e'_i(t)$ = давление насыщенного водяного пара влажного воздуха относительно льда при температуре сухого термометра;

$e'_i(t_i)$ = давление насыщенного водяного пара влажного воздуха относительно льда при температуре смоченного термометра, покрытого льдом;

U = относительная влажность.

Примечание: Фактически, f является функцией, как давления, так и температуры, т.е., $f = f(p, t)$, как поясняется в публикации ВМО(1966) во введении к таблице 4.10. На практике, зависимость от температуры (±0,1 %) намного ниже чем от давления (от 0 до +0,6 %). Поэтому, зависимость от температуры в формуле, приведенной выше, можно опустить (см. также публикацию ВМО (1989*a*), глава 10). Тем не менее, эту формулу следует использовать только для значения давления около 1000 гПа (т.е., для приземных наблюдений), а не для аэрологических измерений, для которых следует использовать таблицу 4.10 в публикации ВМО (1966).

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Всемирная Метеорологическая Организация, 1988: *Технический регламент*. Том I, ВМО-№. 49, Женева.

Bindon, H.H., 1965: A critical review of tables and charts used in psychrometry [Критический обзор таблиц и карт, используемых в психрометрии]. In: A. Wexler (ed.), *Humidity and Moisture*, Volume 1, Reinhold, New York, pp. 3 – 15.

Sonntag, D., 1990: Important new values of the physical constants of 1986, vapour pressure formulations based on the ITS-90 and psychrometer formulae [Важные новые значения физических констант 1986 г., формулы давления водяного пара на основе МТШ-90 и психрометрические формулы]. *Zeitschrift für Meteorologie*, Volume 40, Number 5, pp. 340 – 344.

Sonntag, D., 1994: Advancements in the field of hygrometry [Достижения в области гигрометрии]. *Zeitschrift für Meteorologie*, Volume 3, Number 2, pp. 51 – 66.

Wexler, A. (ed.), 1965: *Humidity and Moisture* [Влажность и влага]. Volumes 1 and 3, Reinhold, New York.

World Meteorological Organization, 1966: *International Meteorological Tables* [Международные метеорологические таблицы (S. Letestu, ed.). WMO-No. 188.TP. 94, Geneva.

World Meteorological Organization, 1989*a*: WMO *Assmann Aspiration Psychrometer Intercomparison* [Взаимосравнение аспирационных психрометров Асмана под эгидой ВМО] (D. Sonntag). Instruments and Observing Methods Report No. 34, WMO/TD-No. 289, Geneva.

World Meteorological Organization, 1989*b*: WMO *International Hygrometer Intercomparison* [Международное взаимосравнение гигрометров под эгидой ВМО] (J. Skaar, K. Hegg, T. Moe and K. Smedstud). Instruments and Observing Methods Report No. 38, WMO/TD-No. 316, Geneva.

World Meteorological Organization, 1992: *Measurement of Temperature and Humidity* [Измерение температуры и влажности] (R.G. Wylie and T. Lalas). Technical Note No. 194, WMO-No. 759, Geneva.

ГЛАВА 5

ИЗМЕРЕНИЕ ПРИЗЕМНОГО ВЕТРА

5.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

5.1.1 Определения

В этой главе используются следующие определения (более подробную информацию см. в Mazzarella, 1972):

Скорость ветра – это трехмерная векторная величина со случайными мелкомасштабными колебаниями в пространстве и времени, наложенными на крупномасштабный организованный поток. Такое определение ветра используется, например, применительно к анализу загрязнения воздуха и при обеспечении посадки самолетов. Однако, в настоящем Руководстве приземный ветер будет рассматриваться в основном как двумерная векторная величина, заданная двумя числовыми значениями, характеризующими направление и скорость. Короткопериодные пульсации ветра характеризуют его порывистость, а индивидуальные пульсации называются порывами.

Большинству пользователей информации о ветре требуются осредненный горизонтальный ветер, обычно представленный в полярной системе координат значениями скорости и направления. Во все большем количестве областей применения данных о ветре требуется информация об изменчивости или порывистости ветра. С этой целью используются три параметра, а именно: максимальный порыв и средние квадратические отклонения скорости и направления ветра.

Средние значения – это значения (например, горизонтальной скорости ветра), которые осредняются за период времени от 10 до 60 мин. В этой главе мы имеем дело преимущественно с осреднением за период времени 10 мин, что необходимо для целей прогноза. Климатические обобщения обычно требуют осреднения за полный час или сутки. Для аэронавигационных целей часто используются более короткие периоды осреднения; (см. главу 2 части II). Периоды осреднения менее нескольких минут не в достаточной мере сглаживают естественные турбулентные пульсации ветра, поэтому значения ветра , осредненного за 1 мин, следует рассматривать как длительный порыв ветра.

Максимальный порыв – это максимальная наблюденная скорость ветра за определенный период времени. При ежечасных наблюдениях максимальный порыв представляет собой предельное значение скорости ветра за последний полный час.

Продолжительность порыва – это мера длительности максимального наблюдаемого порыва. Продолжительность порыва определяется чувствительностью измерительного устройства. Медленно срабатывающие устройства сглаживают экстремальные значения и измеряют продолжительные сглаженные порывы; быстро срабатывающие устройства могут регистрировать резкие порывы малой продолжительности на фронте волны.

Для определения продолжительности порыва используется идеализированная измерительная цепочка, а именно, единичный фильтр скользящего осреднения колебаний ветра на интервале t_0 секунд. Максимальные значения ветра, полученные на выходе такого фильтра, считаются максимальными порывами продолжительностью t_0. Считается, что другие измерительные системы с различными фильтрующими элементами пригодны для измерения порывов продолжительностью t_0 в том случае, если фильтр скользящего осреднения на интервале t_0 выдает такое же экстремальное значение (подробности см. в Beljaars, 1987; WMO, 1987).

Среднее квадратическое отклонение – это:

$$s_u = \sqrt{\overline{(u_i - U)^2}} = \sqrt{\left(\left(\sum\left(u_i^2\right) - \left(\sum u_i\right)^2 / n\right) / n\right)} \qquad (5.1)$$

где u– это изменяющийся во времени величина (например, горизонтальная скорость ветра) со средним значением U, а верхняя черта означает временное осреднение выборки из n значений u_i. Среднее квадратическое отклонение используется для характеристики колебаний конкретной величины.

Постоянная времени (системы первого порядка) – это время, необходимое для того, чтобы прибор обнаружил и выдал информацию примерно о 63 % ступенчатого изменения сигнала

Длина пути воздушной частицы до момента срабатывания датчика – это приблизительное расстояние (в метрах), которое проходит воздушный поток до того, как на выходе датчик ветра покажет примерно 63 % ступенчатого изменения входной скорости ветра.

Критическое затухание (для датчика, такого, как флюгарка, чувствительность которого наилучшим образом описывается дифференциальным уравнением второго порядка) – это то значение затухания, при котором датчик наиболее быстро воспроизводит ступенчатое изменение характеристики при отсутствии выброса в показании.

Степень затухания – это отношение истинного затухания к критическому затуханию.

Длина естественной незатухающей волны – это расстояние, которое проходит воздух, необходимое для прохождения флюгаркой одного периода колебания в условиях отсутствия затухания. Оно меньше реальной «затухающей» длины волны в $\sqrt{(1-D^2)}$ раз, где D – степень затухания.

Неустойчивый ветер, не имеющий среднего направления – это ветер, при котором полная изменчивость среднего направления ветра в течение 10 мин составляет не менее 60°, но не достигает 180°, а скорость ветра составляет менее 6 км/час (3 узлов) или когда общая изменчивость равна или превышает 180°

5.1.2 Единицы и шкалы измерения

Скорость ветра должна указываться в метрах в секунду с разрешением 0,5 м/с или в узлах (0,515 м/с) и округлением до ближайшей единицы измерения, и, в случае включения в синоптические сводки, осредняться за 10 . Для аэронавигационных целей могут потребоваться средние значения за более короткий период времени (см. главу 2 части II).

Направление ветра следует указывать в градусах с точностью до 10° в цифрах кода от 01 до 36 (например, код 02 означает, что направление ветра находится между 15 и 25°) и осреднять за 10 минут (см. главу 2 части II). Направление ветра определяется как направление, откуда дует ветер, и измеряется по часовой стрелке от географического севера, точнее, истинного севера.

Термин «штиль» должен применяться в том случае, когда средняя скорость ветра меньше 1 узла (0,5 м/с). В этом случае направление ветра кодируется 00.

Направление ветра на станциях, лежащих в пределах 1° от Северного полюса или 1° от Южного полюса, должно измеряться таким образом, чтобы ноль азимутного круга совпадал с 0° по Гринвичскому меридиану.

Измерения и передача данных о скорости и направлении ветра на аэродромах для обеспечения взлета и посадки самолетов имеют важные отличия от наблюдений для синоптических целей (см. главу 2 части II). Так, на всех метеорологических станциях направление ветра должно измеряться по азимуту, отсчитываемому от истинного севера. На аэродромах же, при авиаметеорологических наблюдениях направление ветра должно определяться и передаваться относительно магнитного севера и с осреднением в 2 мин. В тех случаях, когда данные о ветре на аэродроме передаются за пределы аэродрома и включаются в синоптические сводки, направление ветра должно указываться относительно истинного севера и с осреднением в 10 мин.

5.1.3 Метеорологические требования

Наблюдения за ветром требуются для мониторинга и прогноза погоды, для климатологических обобщений ветровых нагрузок, для оценки вероятности ущерба от сильного ветра и оценки энергии ветра, а также в качестве составной части оценки приземных потоков, например для оценки испарения в интересах сельскохозяйственного производства и определения распространения загрязнения воздуха. Необходимые требования к измерениям приведены в главе 1 части I. Обычно при измерении скорости достаточной считается точность до 0,5 м/с при скорости менее 5 м/с и не хуже 10 % при скорости свыше 5 м/с. Направление ветра должно измеряться с точностью до 5°. Кроме средних значений скорости и направления ветра, для многих применений требуются данные о среднем квадратическом отклонении и экстремальных значениях (см. раздел 5.8.2). Современные приборы позволяют без особых усилий получить необходимую точность измерений. Наиболее трудным моментом при проведении наблюдений за ветром является выбор места размещения анеморумбометра. Так как почти невозможно найти место, где скорость ветра является репрезентативной для большой территории, рекомендуется оценить ошибки, обусловленные нерепрезентативностью места размещения анеморумбометра (см. раздел 5.9).

Для многих применений требуется информация о порывистости ветра. Она необходима для сверхкраткосрочных прогнозов метеоусловий при взлете и посадки самолетов, климатических обобщений значений ветровой нагрузки, расчета распространения загрязнения воздуха и корректировки размещения анеморумбометров. Требованиям рутинных наблюдений удовлетворяют два параметра, а именно: средние квадратические отклонения направления и скорости ветра и максимальный порыв при трехсекундном осреднении (см. рекомендации 3 и 4 КПМН-X) (ВМО, 1990).

5.1.4 Методы измерения и наблюдения

Обычно для измерения скорости приземного ветра используются флюгер и чашечный или крыльчатый анемометры. В тех случаях, когда приборы временно не функционируют или их нет в наличии, направление и силу ветра можно определять субъективно (в таблице приводятся эквиваленты скорости ветра для повседневного использования при оценках).

Рассматриваемые здесь приборы и методы измерений – это лишь некоторые более подходящие из возможного набора. В конце этой главы приведен достаточно полный список литературы по данному вопросу.

Датчики, кратко описанные ниже – это вращающиеся чашечные и крыльчатые анемометры, а также флюгеры для измерения направления ветра. Чашечная вертушка и флюгер, лопастная вертушка и флюгер и просто крыльчатые вертушки – наиболее часто встречающиеся комбинации. Другие датчики, как например, трубка Пито, реже используются для проведения стандартных наблюдений, хотя также могут давать удовлетворительные

Таблица 5.1 Эквиваленты скорости ветра

Баллы по шкале Бофорта и их описание		*Скорость ветра на стандартной высоте 10 м над открытой ровной поверхностью*				*Признаки для оценки скорости ветра над сушей*
		(узлы)	*(м/с)*	*(км/ч)*	*(миль/ч)*	
0	Штиль	< 1	0 – 0,2	< 1	< 1	Тихо, дым поднимается вертикально
1	Тихий	1 – 3	0,3 – 1,5	1 – 5	1 – 3	Направление ветра определяется по сносу дыма, но не по флюгеру
2	Легкий	4 – 6	1,6 – 3,3	6 – 11	4 – 7	Ветер ощущается лицом; листья шелестят; ветер приводит в движение обычный флюгер
3	Слабый	7 – 10	3,4– 5,4	12 – 19	8 –12	Листья и тонкие ветки деревьев все время колышутся; ветер развевает легкие флаги
4	Умеренный	11 – 16	5,5 – 7,9	20 – 28	13 – 18	Ветер поднимает пыль и обрывки бумаги; приводит в движение тонкие ветки деревьев
5	Свежий	17 – 21	8,0 – 10,7	29 – 38	19 – 24	Небольшие деревья с листвой качаются; на воде внутренних водоемов появляются небольшие волны с гребнями
6	Сильный	22 – 27	10,8 – 13,8	39 – 49	25 – 31	Качаются толстые ветви деревьев; гудят телеграфные провода; зонты удерживаются с трудом
7	Крепкий	28 – 33	13,9 – 17,1	50 – 61	32 – 38	Качаются стволы деревьев; идти против ветра трудно
8	Очень крепкий	34 – 40	17,2 – 20,7	62 – 74	39 – 46	Ветер ломает ветви деревьев; препятствует движению
9	Шторм	41 – 47	20,8 – 24,4	75 – 88	47 – 54	Небольшие повреждения (ветер срывает оголовники дымовых труб и черепицу)
10	Сильный шторм	48 – 55	24,5 – 28,4	89 – 102	55 – 63	На суше бывает редко; деревья вырывает с корнями; значительные разрушения строений
11	Жестокий шторм	56 – 63	28,5 – 32,6	103 – 117	64 – 72	Наблюдается очень редко; сопровождается широкомасштабными разрушениями
12	Ураган	64 и более	32,7 и более	118 и более	73 и более	

Таблица 5.2 Эквиваленты скорости ветра для Арктических районов и районов без растительности

Баллы по шкале Бофорта и описание		*Скорость ветра на стандартной высоте 10 м над открытой ровной площадкой*				*Признаки для оценки скорости ветра для Арктических районов и районов без растительности*
		(узлы)	*(м/с)*	*(км/ч)*	*(миль/ч)*	
0	Штиль	< 1	0 – 0,2	< 1	< 1	
1	Тихий	1 – 3	0,3 – 1,5	1 – 5	1 – 3	Ветер не ощущается. Дым поднимается вертикально
2	Легкий	4 – 6	1,6 – 3,3	6 – 11	4 – 7	Ветер ощущается лицом; листья шелестят
3	Слабый	7 – 10	3,4– 5,4	12 – 19	8 –12	Ветер шевелит волосы, колыхает одежду
4	Умеренный	11 – 16	5,5 – 7,9	20 – 28	13 – 18	Ветер поднимает пыль и бумажный мусор, перепутывает волосы
5	Свежий	17 – 21	8,0 – 10,7	29 – 38	19 – 24	Сила ветра ощущается туловищем. Предел приемлемого ветра на суше
6	Сильный	22 – 27	10,8 – 13,8	39 – 49	25 – 31	Некоторые неудобства при ходьбе
7	Крепкий	28 – 33	13,9 – 17,1	50 – 61	32 – 38	Трудно идти против ветра
8	Очень крепкий	34 – 40	17,2 – 20,7	62 – 74	39 – 46	Трудно выдерживать вертикальное положение при ходьбе
9	Шторм	41 – 47	20,8 – 24,4	75 – 88	47 – 54	Опасность быть снесенным ветром
10	Сильный шторм	48 – 55	24,5 – 28,4	89 – 102	55 – 63	Деревья вырывает с корнем, значительный ущерб сооружениям
11	Жестокий шторм	56 – 63	28,5 – 32,6	103 – 117	64 – 72	
12	Ураган	64 и более	32,7 и более	118 и более	73 и более	

результаты. Приборы, находящиеся на стадии разработки или применяемые в настоящее время для исследовательских целей, с развитием техники могут найти практическое применение при стандартных наблюдениях.

Почти для всех приложений, необходимо измерять средние значения скорости и направления ветра. Во многих случаях требуются данные о порывах. Таким образом, любая ветроизмерительная система состоит не только из датчика, но также из блоков обработки и записи. Обработка предназначена для осреднения и расчета средних квадратических отклонений и экстремумов. В простейшем случае, обработка может состоять из записи ветра перьевым самописцем и оценки среднего и экстремального значений при считывании записи.

5.2 ВИЗУАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВЕТРА

При отсутствии приборов для измерения ветра его следует оценивать визуально. При такой оценке ошибки могут быть довольно значительными, но если пользоваться данными наблюдений с

осторожностью, то этот метод может быть оправдан, поскольку он дает данные, которые в противном случае не могли бы быть получены вообще. В тех случаях, когда на какой-либо станции данные о ветре временно или постоянно были получены путем оценивания, а не измерения, этот факт должен быть занесен в журнал наблюдений станции и стать известным пользователям.

5.2.1 Скорость ветра

Оценки основываются на влиянии ветра на подвижные предметы. Можно использовать почти все предметы, способные свободно перемещаться под влиянием ветра, но лучше всего воспользоваться признаками, содержащимися в описании шкалы силы ветра Бофорта, приведенной в таблицах 5.1 – 5.2.

При оценке скорости ветра наблюдатель (и подвижный предмет) должен находиться на открытой ровной местности как можно дальше от препятствий. Необходимо помнить, что даже небольшие препятствия вызывают серьезные изменения скорости ветра и отклонения в его направлении, особенно с их подветренной стороны.

5.2.2 Направление ветра

В случае отсутствия или неисправности приборов направление следует оценивать по направлению движения дыма из высокой трубы, движению листьев и т. д. на открытом месте, либо наблюдая за указателем направления или вымпелом, прикрепленным к высокому флагштоку. Кроме того, в аэропорту может быть использован ветровой конус, если скорость ветра достаточна для приведения его в движение.

Какое бы из этих средств не использовалось, возможны ошибки, обусловленные перспективой, если наблюдатель не стоит непосредственно под указателем ветра. Следует быть осторожным, чтобы ошибочно не принять местные вихри, образуемые сооружениями и т. д., за генеральное направление ветра.

На открытой местности направление приземного ветра можно определить довольно точно, если стать к нему лицом. При этом не следует учитывать направление движения облаков, какими бы низкими они ни были.

5.2.3 Пульсации ветра

Не следует проводить оценку максимальных порывов или средних квадратических отклонений при отсутствии надлежащих приборов и регистрирующих устройств.

5.3 ПРОСТЫЕ МЕТОДЫ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Те станции, на которых нет возможности установить традиционные анемометры, можно обеспечить любыми недорогостоящими простыми приборами, которые позволят сделать наблюдения несколько более надежными, чем те, которые выполнены без помощи приборов.

5.3.1 Скорость ветра

В случае применения простых ручных анемометров, их следует настраивать и снимать с них показания в соответствии с инструкциями изготовителя. Наблюдения следует проводить в месте, открытом воздействию ветра, а не с подветренной стороны препятствий, таких как здания, деревья и холмы. При отсутствии такой возможности место для наблюдения должно быть достаточно удалено от препятствий, именно на расстояние, по меньшей мере в 10 раз превышающее высоту самого препятствия . В случае расположения места наблюдения с наветренной стороны или в стороне от препятствия, удаление от него должно по меньшей мере двукратно превышать его высоту.

5.3.2 Направление ветра

Направление ветра можно оценивать по флюгеру (или вымпелу), установленному на столбе, к которому прикреплены указатели основных румбов компаса. Наблюдения за флюгером проводятся снизу, а направление ветра можно оценивать с точностью до 16-й доли азимутального круга. Если флюгер колеблется на ветру, то определяется среднее направление ветра в пределах его колебаний.

5.4 ЧАШЕЧНЫЕ И КРЫЛЬЧАТЫЕ АНЕМОМЕТРЫ

Обычно для измерения скорости ветра используются чашечные и крыльчатые анемометры, которые состоят из двух узлов: вертушки и генератора сигнала. В хорошо сконструированных системах угловая скорость чашечной и крыльчатой вертушки прямо пропорциональна скорости ветра или, в случае крыльчатой вертушки, составляющей скорости ветра, параллельной оси вращения. Кроме того, в таких хорошо сконструированных анемометрах калибровочная кривая линейна, не зависит от плотности воздуха, имеет устойчивое нулевое значение и диапазон изменчивости, легко воспроизводится в заводских условиях. Вблизи порога чувствительности, т.е., при скорости ветра менее 4 м/с,

калибровочная кривая чашечных анемометров может существенно отклоняться от линейной для случаев, когда длина штыря, соединяющего чашку с осью вращения, значительно больше диаметра чашки (Patterson, 1926).

Характеристикой реакции датчиков чашечного и крыльчатого типа на изменение скорости ветра является длина пути воздушной частицы до момента срабатывания датчика , величина которого прямо пропорциональна моменту инерции вертушки и, кроме того, зависит от ряда геометрических параметров (Busch and Kristensen, 1976; Coppin, 1982).

Большинство датчиков скорости ветра чашечного и крыльчатого типа быстрее реагируют на увеличение скорости ветра, чем на ее уменьшение, поэтому эти вертушки завышают фактическую среднюю скорость ветра. Более того, колебания вертикальной компоненты скорости могут также привести к завышению скорости чашечными анемометрами в результате ослабления взаимодействия чашки с наклоненным к горизонту потоком (MacCready, 1966). Общее завышение скорости может составлять 10 % для некоторых конструкций и при высокой турбулентности ветрового потока (для чашечного анемометра на высоте 10 м с расстоянием отклика 5 м над крайне неоднородной поверхностью (Coppin, 1982). Этот недостаток можно свести к минимуму путем использования анемометров с быстрым откликом (малой инерцией) – либо чашечных анемометров с хорошей реакцией на наклонный к горизонту поток, либо крыльчатые анемометры, которые, фактически, не реагируют на вертикальную составляющую скорости. В случае, когда нет возможности исследовать характеристики анемометра в аэродинамической трубе, можно провести его сверку с поверенным прибором в полевых условиях (Albers, Klug and Westermann, 2000).

Поскольку и чашечные, и крыльчатые вертушки вращаются с угловой скоростью, прямо пропорциональной скорости ветра или его компоненте вдоль оси вращения, они особенно удобны для приведения в действие генераторов сигнала различной конструкции. Применяются генераторы сигнала переменного и постоянного тока, оптические и магнитно-импульсные генераторы, счетчики оборотов, а также самописцы. Выбор генератора сигналов или датчика в значительной степени зависит от используемого средства обработки и способа считывания данных. Необходимо принять меры для того, чтобы подшипники и генераторы сигналов характеризовались низкими начальным и вращающим моментами трения, а также чтобы момент инерции генератора сигнала не приводила бы к росту времени реакции анемометра на изменение скорости потока. В случае передачи генерированного датчиком электрического сигнала на большое расстояние, он ослабевает за счет сопротивления кабеля, что делает использование импульсного сигнала более предпочтительным, поскольку он не столь подвержен изменениям при передаче на расстояние.

Требуемые и реально достижимые характеристики датчиков скорости ветра приведены в Приложении 1.В Части I, Главе 1

5.5 ФЛЮГЕРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ НАПРАВЛЕНИЯ ВЕТРА

Для получения удовлетворительных результатов измерений целесообразно использовать флюгер, который должен быть сбалансирован таким образом, чтобы он не стремился занять какую-либо предпочтительную позицию в случае, если его ось отклонится от вертикали. Желательно, чтобы элементы оперения флюгера были параллельны его оси, поскольку флюгер с двумя элементами оперения, располагающимися под углом более 10° к его оси имеет два устойчивых положения, каждое из которых существенно отличается от действительного направления ветра (Wieringa and van Lindert, 1971).

Реакция обычного флюгера с докритическим затуханием на резкое изменение направления ветра обычно характеризуется поворотом на угол, превышающий угол реального поворота ветра, с дальнейшими колебаниями вблизи истинного направления ветра, при этом амплитуда колебаний экспоненциально уменьшается со временем. Для описания такой реакции используются два параметра: «естественная частота колебаний с докритическим затуханием» или «длина волны» и «степень затухания» (т. е. отношение истинного затухания к критическому) (MacCready, 1966; Mazzarella, 1972). Степень затухания в пределах от 0,3 до 0,7 считается удовлетворительной, поскольку при этом не возникают слишком большие отклонения направления флюгера от реального направления ветра, а реакция флюгера остается достаточно быстрой (Wieringa 1967). Само собой разумеется, что в тех случаях, когда необходимо рассчитать среднее за длительный период на основе данных, полученных для короткого временного интервала, могут быть использованы датчики с меньшей степенью затухания.

Генератор сигнала представляет собой, в сущности, преобразователь угол-код. Используется несколько видов генератора сигнала, такие как потенциометры, сельсины переменного и постоянного тока, цифровые дисковые преобразователи угол-код, угломерные круги прямого считывания,

поворотные переключатели. Выбор генератора сигнала в основном зависит от используемого средства обработки и способа считывания данных. Необходимо принимать меры для того, чтобы подшипники флюгарки и генератора характеризовались низкими значениями трения покоя и вращения. Простейший метод записи сигнала состоит в том, что перо самописца медленно перемещается сверху вниз по листу бумаги, обмотанному вокруг цилиндра, вращающемуся вместе с осью флюгера.

Абсолютная точность измерения направления ветра зависит также от тщательности, с которой прибор ориентирован относительно истинного севера. Требуемые и реально достижимые характеристики флюгеров для измерения направления ветра приведены в Приложении 1.B к Главе 1 Части I.

5.6 ДРУГИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВЕТРА

Для измерения направления и скорости ветра можно использовать множество физических принципов , каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки. Для специальных целей, таких как измерение мелкомасштабных пульсаций и исследование загрязнения воздуха, разрабатываются все новые измерительные системы (см., например, Smith (1980)). При этом используются следующие нестандартные типы датчиков:

(a) Анемометры, основанные на принципе трубки Пито, измеряющей избыточное давление в трубке, ориентируемой по направлению ветра с помощью флюгера (см. описание анемометра Динеса в Gold (1936) and WMO (1984a)). Линеализированная система регистрации Динеса решает проблему осреднения скорости вызванную параболической формой уравнения связи между скоростью ветра и давлением, а также обеспечивает запись данных о порывах без использования электроэнергии.

(b) Акустические анемометры, измеряющие время между излучением и приемом ультразвукового импульса, распространяющегося вдоль фиксированного отрезка (Kaimal, 1980). Поскольку акустические анемометры, в силу физических принципов их работы, не содержат движущихся элементов, они отличаются большим временем службы и сравнительно медленным ухудшением точности измерений со временем.

(c) Анемометры с горячим диском – недавно разработанные твердотельные приборы, измеряющие градиент температуры внутри чипа. Это позволяет получить как скорость, так и направление вера с точностью, находящейся в пределах спецификаций, приведенных в Приложении 1.B Главы 1 Части I(Van Oudheusden and Huijsing, 1991; Makinwa, Huijsing and Hagedoorn, 2001). Они прочны и имеют устойчивую во времени калибровку, но опыт их применения пока ограничен.

(d) Анемометры с горячей нитью измеряют степень охлаждения тонкой разогретой нити. Они довольно ненадежны при ежедневном использовании из-за своей чрезмерной хрупкости , а также из-за довольно быстрой изменчивости калибровки в условиях загрязненной и влажной окружающей среды. Их не рекомендуется использовать при выпадении осадков.

(e) Устаревшие флюгеры с качающейся доской ненамного лучше полного отсутствия приборов.

(f) Технологии дистанционного зондирования поля ветра с помощью звуковых (сонар), световых (лидар) или электромагнитных (радар) волн нетипичны для обычных метеорологических сетей и не будут обсуждаться в настоящем Руководстве. Они подробно описаны в Lenschow (1986).

5.7 ДАТЧИКИ И ИХ КОМБИНАЦИИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СОСТАВЛЯЮЩИХ ВЕТРА

Крыльчатые вертушки, которые чувствительны только к составляющей скорости ветра, параллельной оси вращения вертушки, можно располагать перпендикулярно друг другу, что дает возможность получать два показания, прямо пропорциональных ортогональным составляющим вектора ветра. Другие датчики, такие как двухосный акустический анемометр, выполняют ту же функцию за счет более сложных дополнительных электронных блоков. Недостаток ортогонально-ориентированных крыльчатых вертушек состоит в том, что трудно достичь т.н. косинусоидального разрешения (т.е., чувствительность непосредственно к составляющей ветра). При вычислении компонент ветра по результатам измерения скорости и направления ветра в качестве устройств для измерения составляющих ветра можно также использовать комбинацию чашечный анемометр-флюгер или крыльчатый анемометр с флюгаркой.

5.8 МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Данные измерений с помощью комбинаций анемометра и флюгера могут обрабатываться и осредняться самыми различными способами. Прежде чем рассматривать особенности полной цепочки измерения параметров ветра (установка датчика,

измерения, передача, фильтрация, регистрация и обработка данных), полезно обсудить вопрос осреднения. В этом Руководстве рассматриваются следующие результаты измерения ветра: осредненные значения параметров горизонтального ветра (составляющие или скорость/направление), средние квадратические отклонения и максимальный порыв.

5.8.1 Осреднение

Осреднение векторов ветра или его составляющих – в принципе задача несложная, но здесь имеются несколько трудных моментов. Во-первых, осреднение всех мгновенных значений скорости ветра дает небольшое (обычно на несколько процентов) завышение средней векторной скорости ветра U (MacCready, 1966; Wieringa 1980*a*). При необходимости, это различие можно скорректировать в случае, если определяется среднее квадратическое отклонение ветра s_d; соотношение между U и средними значениями составляющих ветра равно (Frenkiel, 1951):

$$U\Big/\sqrt{\left(u_i^2 + v_i^2\right)} = 1 - s_d^2/2 \qquad (5.2)$$

Это влияние ортогональных к среднему направлению ветра турбулентных пульсаций часто путают с завышением скорости, вызывающей искажения в значениях среднего квадратического отклонения s_u (см. раздел 5.4)

Во-вторых, это отсутствие непрерывности направления ветра между 0 и 360°. Эта проблема решается путем осуществления записи на цилиндр или расширения диапазона регистрации, например, до 540° (при этом электронное устройство производит переключение диапазона с 0 до 360° и с 540 до 180°), или путем использования компьютерной программы, которая, в случае необходимости, позволяет сделать последовательные серии измерений непрерывными путем прибавления или вычитания 360°. Скорость реакции чашечного анемометра и флюгера несопоставимы, поскольку чашечный анемометр обладает чувствительностью первого порядка, а флюгер – чувствительностью второго порядка. Эта проблема, однако, не существенна, поскольку различия в чувствительности проявляются только в высокочастотной части спектра пульсаций ветра.

С точки зрения теории, предпочтительнее осреднять составляющие ветра, нежели измеренные независимо друг от друга его скорость и направление. Однако различия очень незначительны, и для большинства применений средние значения составляющих ветра можно легко получить из средних значений его скорости и направления. Это также относится к соответствующим средним квадратическим отклонениям. С технической точки зрения, по целому ряду соображений предпочтение следует отдать независимой обработке значений скорости и направления. Во-первых, обработка данных о скорости и направления ветра являются независимыми друг от друга, что позволяет продолжать работу с одним прибором в случае, если другой выходит из строя. Во-вторых, такой тип обработки данных проще, чем в случае, когда нужно вычислять составляющие ветра. Наконец, независимая обработка значений скорости и направления ветра позволяет получить данные в формате, широко применяемом в практических целях (включая кодирование по SYNOP и SHIP).

Средние значения горизонтальной составляющей скорости ветра могут быть получены с помощью различных приборов – как механических, так и электрических. Вероятнее всего, самым простым из них является счетчик оборотов чашечного анемометра, который, как правило, используется для оценки скорости ветра за определенный промежуток времени. На другом конце линейки сложности находятся электроимпульсные генераторы, управляющие специализированными процессорами, которые легко вычисляют средние значения, максимальные порывы и средние квадратические отклонения.

Если скорость и направление ветра регистрируются в виде непрерывного графика, то наблюдатель может оценивать десятиминутные средние значения этих параметров достаточно точно по записи пера регистратора. Эту же запись можно также использовать для считывания максимальных порывов ветра. Использование для наблюдений цифровых дисковых преобразователей или других измерительных приборов позволяет получить представление о скорости и изменчивости ветра, но приводит к значительным ошибкам при получении средних значений. Мгновенные отсчеты, таким образом, менее подходят для тех случаев, когда требуются десятиминутные средние значения для стандартных сводок погоды.

5.8.2 Максимальные порывы и средние квадратические отклонения

Результаты вычислений или регистрации пульсаций ветра предельно чувствительны к характеристикам реакции – динамическим характеристикам – всех элементов измерительной цепочки, включая такие параметры датчиков как длина пути воздушной частицы до момента срабатывания датчика и степень затухания. Кроме того, динамические характеристики всей системы в целом определяют продолжительность измеряемых максимальных порывов, как это описано в разделе 5.1.1. Медленно реагирующие системы сглаживают экстремумы и регистрируют

длительные порывы с малой амплитудой, а высокочувствительные системы – высокие и узкие пики скорости (порывы малой продолжительности). Ясно, что динамические характеристики систем для измерения параметров ветра следует тщательно проектировать с тем, чтобы получать данные о порывах, сопоставимые с данными регистрации на других станциях, а также получать точные и надежные значения средних квадратических отклонений.

Прежде чем задать динамические характеристики систем для измерения параметров ветра, необходимо определить минимальную регистрируемую продолжительность порыва с учетом потребностей пользователя. Экстремальные значения параметров ветра в основном используются для подготовки предупреждений об опасных явлениях, а также для климатологических обобщений экстремальной нагрузки на здания , сооружения и самолеты. Важно понимать, что кратковременные порывы ни по времени, ни по горизонтальной протяженности не способны в полной мере оказать разрушающее воздействие на большие сооружения. Согласно заключению ВМО (WMO (1987)) , данные о порывах продолжительностью три секунды удовлетворяют требованиям большинства потенциальных пользователей. При сильном ветре порывы продолжительностью около трех секунд соответствуют «пробегу ветра» (продолжительность порыва, умноженная на среднюю скорость ветра) от 50 до 100 м. Этого достаточно для того, чтобы разрушить сооружения характерного размера для пригорода / города или подвергнуть их максимальной нагрузке от потенциально разрушительного порыва.

Средние квадратические отклонения направления и скорости ветра можно легко вычислить для выборки с интервалом около одной секунды с помощью оборудования со встроенным микрокомпьютером. Частота выборки не должна быть слишком большой, поскольку датчик сам по себе сглаживает ветер в пределах длины пути воздушной частицы до момента срабатывания датчика (Wieringa, 1980*b*). В большинстве случаев достаточна частота выборки в 0,25 Гц, но это зависит от длины пути воздушной частицы до момента срабатывания датчика и скорости ветра. Теоретические основы определения частоты выборки подробна рассмотрены в Главе 2 Части III.

Одновременное вычисление среднего квадратического отклонения горизонтальной составляющей ветра за 10 мин совместно с выявлением порывов с продолжительностью в несколько секунд предъявляет интересные требования к электронным фильтрам. Характеристики регистрируемых порывов особенно зависят от параметров фильтра, так что на практике системы оптимизируются именно для них. Любой низкочастотный фильтр, применяемый для определения максимальных порывов, измеренных с помощью высокочастотных анемометров, сглаживающих данные на интервале в несколько секунд, может занизить среднее квадратическое отклонение на величину до 10 %. Это занижение можно скорректировать, если только известны характеристики фильтров в измерительной цепочке. На практике занижение часто оказывается меньшим, поскольку, когда среднее значение скорости ветра имеет положительный или отрицательный тренд, среднее квадратическое отклонение увеличивается. С другой стороны, можно независимо записывать исходный сигнал без какой-либо фильтрации с целью получения несмещенной оценки среднего квадратического отклонения. В следующем разделе даны рекомендации по созданию систем для измерения ветра с конкретными значениями характеристик фильтров.

Для точного измерения максимальных порывов желательно делать выборку из ряда отфильтрованных значений характеристик ветра каждые 0,25 с (частота 4 Гц). Можно использовать выборку более низкой частоты, однако следует принимать во внимание, что оценка максимального значения будет в большинстве случаев занижена, поскольку экстремальное значение порыва в отфильтрованном ряде может попасть в промежуток между отсчетами.

Что касается направления ветра, то следует избегать какой-либо дополнительной фильтрации помимо возникающей за счет инерции флюгера. Это означает, что для большинства моделей флюгера стандартное отклонение направления ветра может быть определено с точностью до 2 %.

Для точного расчета среднего квадратического отклонения направления ветра требуется минимальная разрешающая способность процесса оцифровки сигнала, которое часто осуществляется посредством цифрового кодирующего устройства, установленного на оси флюгера. В этом случае вполне достаточным является разрешение 7 бит, так как при этом среднее квадратическое отклонение в 5° может быть измерено с точностью до 1 % (WMO, 1987).

5.8.3 Рекомендации по конструированию систем для измерения ветра[1]

Системы для измерения параметров ветра могут иметь самые разные конструкции, так что в данном

1 Рекомендовано на 10-й сессии Комиссии по приборам и методам наблюдений (1989 г.).

Руководстве невозможно описать все возможные варианты. Здесь описаны две наиболее распространенные системы: одна с преимущественно аналоговой обработкой сигнала, другая – с обработкой цифровых данных (WMO, 1987).

Первая система состоит из анемометра, для которого длина пути воздушной частицы до момента срабатывания датчика составляет 5 м, импульсного генератора, вырабатывающего импульсы с частотой, пропорциональной скорости вращения анемометра (желательно, несколько импульсов за один оборот), счетчика, который считает импульсы с интервалом в 0,25 с, и микропроцессора для вычисления средних значений скорости ветра и стандартного отклонения за десятиминутные периоды времени на основе данных, получаемых каждые 0,25 с. Предельные значения должны определяться на основе трехсекундных средних, например, посредством скользящего осреднения данных последних 12 замеров. Скользящее осреднение следует производить каждые 0,25 с (т. е. с перекрытием трехсекундных интервалов осреднения каждые 0,25 с). Направление ветра измеряется с помощью флюгера (для которого длина незатухающей волны составляет 5 м, степень затухания – 0,3), снабженного цифровым преобразователем в 7 бит, производящим выборку данные каждую секунду. Средние значения и стандартные отклонения вычисляются за десятиминутные периоды времени, в течение которых последовательные выборки проверяются на непрерывность. Если две следующих друг за другом выборки направления ветра отличаются более чем на 180°, то разница сокращается за счет прибавления к значениям второй выборки или вычитания из них 360° . Если длина пути воздушной частицы до момента срабатывания датчика составляет 5 м для анемометра и флюгера (степень затухания 0,3; длина незатухающей волны 10 м), то средние квадратические отклонения скорости и направления ветра уменьшаются на 7 и 2 % соответственно. Продолжительность порыва, соответствующая такой измерительной цепочке (в соответствии с определением в разделе 5.1.1) составляет около трех секунд.

Вторая система состоит из анемометра, расстояние отклика которого составляет 5 м, генератора напряжения, вырабатывающего напряжение, пропорциональное скорости вращения анемометра при ежесекундном преобразовании сигнала из аналоговой формы в цифровую, и цифровой обработки измерений. Для измерения направления ветра используется флюгер с длиной незатухающей волны 5 м и степенью затухания 0,3 при ежесекундном преобразовании из аналоговой формы в цифровую и последующем вычислении средних значений направления и его стандартных отклонений для цифровых выборок. Для определения максимального порыва ветра генерируемое датчиком напряжение фильтруется с помощью фильтра системы первого порядка при постоянной времени, составляющей одну секунду, и преобразуется из аналоговой формы в цифровую каждые 0,25 с. Что касается фильтрации, эта система немного отличается от первой: стандартные отклонения скорости ветра и его направления сглаживаются на 12 процентов и 2 процента соответственно, а минимальная продолжительность порыва составляет примерно три секунды. В этой системе вместо преобразователя из аналоговой формы в цифровую также может быть использован перьевой самописец, соединенный с аналоговым выходом устройства. В этом случае можно считывать только средние и предельные значения скорости и направления ветра, а продолжительность измеряемого порыва составляет около трех секунд, если только используемый перьевой самописец не сглаживает сигнал сильнее, чем цифровой фильтр первого порядка.

Описанная выше процедура обработки сигнала соответствует Рекомендации 3 КПМН-X (ВМО, 1990) и гарантирует оптимальную точность. Однако эта процедура довольно сложна и требует применения скользящего осреднения и сравнительно высокой частоты выборки. Для многих применений совершенно приемлемо сократить дискретность измерения до одного измерения каждые три секунды при условии, что сигнал осредняется по непересекающимся трехсекундным интервалам. В результате минимальная регистрируемая продолжительность порыва составляет пять секунд, а среднее квадратическое отклонение уменьшается на 12 % (Beljaars, 1987; WMO, 1987).

5.9 РАЗМЕЩЕНИЕ ПРИБОРОВ ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ВЕТРОМ

5.9.1 Общее описание проблем

Скорость ветра значительно увеличивается с высотой, особенно над неровной поверхностью. В связи с этим была определена стандартная высота установки ветроизмерительных приборов на открытой местности, равная 10 м. Соответствующий сдвиг направления ветра с высотой над открытой местностью относительно мал и при наблюдениях за ветром у поверхности земли им можно пренебречь. Оптимальным местом для наблюдения за ветром является такое, где наблюдаемый ветер является репрезентативным для участка местности размером по меньшей мере в несколько километров или где ветер может быть легко приведен к репрезентативному.

Если местность неровная, пересеченная или с неоднородной поверхностью, то и скорость, и направление ветра могут значительно искажаться. Во многих случаях возможна корректировка наблюдений за ветром и уже появляются средства для расчета соответствующих поправок. С целью улучшения репрезентативности данных о ветре следует передавать пользователям необходимую информацию для проведения таких корректировок в дополнение к данным прямых измерений.

5.9.2 Размещение анемометров над сушей

Стандартная высота установки приборов для наблюдений за ветром над ровной открытой местностью составляет 10 м над поверхностью земли. Открытым считается участок местности, на котором расстояние между анемометром и любым препятствием равен не менее, чем десятикратной высоте препятствия. Наблюдения за ветром, проводимые с подветренной стороны от группы деревьев, зданий или других препятствий, не представляют особой ценности и содержат мало информации о невозмущенном потоке воздуха. Поскольку волновые возмущения воздушного потока могут распространяться на расстояние, равное 12 – 15-кратной высоте препятствия, требование об удалении от препятствий на расстояние, равное их десятикратной высоте является абсолютно минимальным. На практике часто бывает трудно найти хорошее или даже удовлетворительное место размещения станции для измерения ветра. Важность оптимального выбора расположения места измерения ветра трудно переоценить, тем ни менее, трудно дать универсальные рекомендации по этому вопросу.

Необходимо учитывать два важнейших аспекта. Во-первых, анеморумбометры следует, насколько это возможно, располагать подальше от местных препятствий. В тех случаях, когда измерения ветра проводятся не на вершине мачты или вышки, а сбоку от нее, приборы следует размещать на выносных штангах, длина которых составляет, как минимум, три ширины мачты или вышки (Gill and others, 1967). При размещении приборов на зданиях, они должны быть приподняты над крышей не менее, чем на ширину здания. Во-вторых, следует тщательно описывать состояние окружающей местности (Wieringa, 1983). Должна быть, как минимум, составлена карта окрестностей станции в радиусе не менее 2 км, описывающая расположение и высоту препятствий и растительности, орографию местности и т.п. Изменения, происходящие в окрестностях станции, такие как, строительство зданий или увеличение высоты деревьев, должны быть исчерпывающе описаны в документации станции. Также должны быть подробно описаны размещенные на станции приборы.

В тех случаях, когда стандартная установка невозможна, анеморумбометр должен устанавливаться на такой высоте, чтобы на его показания не влияли местные препятствия, а также чтобы эти показания, по-возможности, давали представление о том, каким был бы ветер на высоте 10 м при отсутствии поблизости каких-либо препятствий. Если изменения рельефа местности по азимуту незначительные, то анеморумбометр обычно помещают на уровень, превышающий 10 м на величину, зависящую от показателя шероховатости окружающей местности z_0 (см. приложение): около 13 м при z_0 = 0,1 м и около 19 м при z_0 = 0,5 м. Как показано в Wieringa (1980*b*) , стратегия повышения уровня размещения анеморумбометра не работает в случае, когда высота рельефа значительно изменяется с азимутом. Сейчас имеются простые методы количественной оценки влияния топографии местности (Walmsley and others, 1990), а для определения поправок на размещение прибора в условиях неоднородной окружающей местности используются климатологические ряды данных о порывистости ветра (Verkaik, 2000). Evans and Lee (1981) и Grimmond и др. (1998) рассматривают характер этой проблемы для условий города (см. также Главу 11 Части II.

В условиях погоды с отрицательной температурой необходимо принимать особые меры для защиты ветровых приборов от гололеда и обледенения. В некоторых районах, возможно, следует предусмотреть искусственный обогрев открытых частей ветровых приборов с помощью, например, инфракрасного излучателя с автоматическим поддержанием заданной температуры. Для определенных видов ветроизмерительных приборов уже разработаны специальные экраны для защиты от гололеда и обледенения (Curran and others, 1977).

5.9.3 Размещение анемометров на море

Все более насущной становится потребность в инструментальных измерениях ветра на море, особенно с помощью необслуживаемых автоматических систем (см. также Главу 4 в Части II). Решение этой задачи сопряжено с определенными трудностями, поскольку в морских условиях, из-за состояния моря и/или колебания уровня при приливе и отливе, не всегда можно выполнить стандартное требование, разработанное для суши, по установке приборов на высоте 10 м. Очевидное распространение на морские условия критерия установки прибора на суше приводит к мысли о том, что на заякоренных буях, например, следует устанавливать анеморумбометр на высоте

10 м над ватерлинией буя. Однако другие источники ошибок зачастую являются более значительными, чем те, которые связаны с различной высотой размещения ветровых приборов (см. обзор в WMO, 1981). В случае стационарных платформ и судов очень важно, чтобы датчики ветра устанавливались достаточно высоко над платформой и ее надстройками, для того чтобы избежать зачастую довольно сильного влияния самой платформы на локальную структуру поля ветра. В общем случае, нельзя с полной уверенностью утверждать, что на датчик ветра не влияет конструкция платформы, даже если он расположен по крайней мере на 10 м выше самого высокого препятствия на платформе, за исключением тех случаев, когда платформа относительно мала. В обзоре ВМО WMO (1981) делается вывод о том, что для получения точных и полезных результатов измерений ветра следует отдавать приоритет правильному расположению приборов в морских условиях, а не размещению приборов на стандартной высоте 10 м (WMO, 1989). Несмотря на тщательный выбор размещения анеморумбометра, на практике зачастую невозможно избежать связанных с этим ошибок. С целью обеспечения возможности проведения корректировки данных с учетом высоты измерения и возмущения воздушного потока необходимо иметь запись и подробную информацию о размещении анеморумбометра, а также о платформе или типе судна (геометрическая форма, размер). В случае, когда скорость ветра измеряется на высоте существенно большей 10 м (т.е., когда соответствующий коэффициент приведения превышает 1.2), необходимо привести скорость ветра к уровню 10 м путем процедур, рекомендуемых в следующем параграфе, и с использованием постоянной, соответствующей «открытому морю» в таблице, приведенной в приложении.

5.9.4 Корректировка данных с учетом размещения датчиков

При наблюдениях за приземным ветром вряд ли возможно избежать проблем, связанных с размещением приборов. Требование относительно размещения станции на открытой ровной местности выполнить сложно, поэтому для большинства станций на суше, где производятся измерения ветра, возникают трудности, связанные с возмущениями ветра, вызванными либо орографией, либо неоднородностью поверхности, либо с тем и другим одновременно (WMO, 1987; Wieringa, 1996).

Ясно, что ошибки, допущенные при размещении датчиков ветра, создают проблемы для пользователей данных о ветре и зачастую делают эти данные бесполезными. Эта проблема является особенно серьезной при использовании данных в численных моделях прогноза погоды, где существует тенденция к раздельному анализу полей ветра и давления. Данные о приземном ветре, однако, могут быть использованы для инициализации модели только в том случае, если они являются репрезентативными для большой территории. Это означает, что ошибки, связанные с местными условиями и/или нестандартной высотой наблюдения, должны быть устранены.

Корректировка данных наблюдений за ветром для локальных условий размещения может производиться только при наличии данных измерений приемлемого качества и полученные для участков с не слишком шероховатой ($z_0 \leq 0{,}5$ м) и относительно ровной поверхностью. Не следует пытаться корректировать данные измерений, которые едва ли характеризуют средние значения по региону. Так, данные о ветре, полученные на станции в глубокой долине, где преобладают стоковые ветры, могут быть полезны для локальных прогнозов, но не являются репрезентативными для региона в целом.

Если U – это о скорость ветра , измеренная на высоте z, то скорректированная скорость ветра U_c, которая наблюдалась бы на уровне 10 м над поверхностью с шероховатостью z_0 определяется из:

$$U_c = U \cdot C_F \cdot C_T \cdot \frac{\ln\left(10/z_{0u}\right)}{\ln\left(z/z_{0u}\right)} \cdot \frac{\ln\left(60/z_{0u}\right)\ln\left(10/z_0\right)}{\ln\left(10/z_{0u}\right)\ln\left(60/z_0\right)} \qquad (5.3)$$

где C_F – поправка на искажение потока; C_T – поправочный множитель, учитывающий влияние рельефа местности; z_{0u} – обобщенный параметр шероховатости поверхности с наветренной стороны от места наблюдений; z_0 – высота уровня шероховатости, принятая в данном виде расчетов (например, в пределах расчетной ячейки численной модели прогноза). В этом соотношении значения z, z_0 и z_{0u} выражены в метрах. Различные поправки означают следующее:

(a) искажение потока: поправка на искажение потока C_p учитывает влияние крупных местных объектов. Это особенно важно для анеморумбометров, установленных на буровых установках, судах и морских платформах. Лучшим способом определения C_p как функции направления ветра является моделирование в аэродинамической трубе (Mollo-Christensen and Seesholtz, 1967). Также могут проводиться оценки, основанные на соотношениях для потенциального потока вокруг простых конструкций (Wyngaard, 1981; WMO, 1984b). В случае измерения ветра на вершине одиноко стоящей мачты возмущением воздушного потока можно пренебречь ($C_p = 1$);

(b) влияние орографии: эта поправка учитывает влияние высоты местности, окружающей

станцию для измерения ветра. C_p представляет собой отношение осредненной по региону скорости ветра (осредненная скорость на высоте 10 м над горными хребтами и долинами в данном регионе) и скорости ветра, наблюдаемой на станции. Если станция расположена на вершине отдельного холма, C_p должно быть менее единицы , чтобы учесть влияние усиления ветра, вызванного холмом, и сделать результат репрезентативным не только для вершины холма, но и для всей местности в целом. Для ровной местности C_p = 1. Для отдельно стоящих холмов и горных хребтов оценки C_p могут проводиться на основе простых рекомендаций (Taylor and Lee, 1984). В более сложных орографических условиях требуются модельные расчеты на основе подробных карт рельефа окружающей станцию местности Walmsley and others, 1990). Такие расчеты в достаточной сложны, но должны производиться только один раз для одной станции для получения таблицы значений C_p как функции направления ветра;

(c) нестандартная высота наблюдения: этот эффект легко скорректировать, допуская логарифмический профиль ветра в сочетании с параметром шероховатости z_{0u} подстилающей поверхности с наветренной стороны от места измерения. Для морских станций этот способ приведения к стандартной высоте может иметь большое значение. В этом случае поправки на устойчивость стратификации довольно незначительны, что оправдывает логарифмическую форму зависимости поправки от высоты;

(d) влияние шероховатости: влияние на ветер шероховатости поверхности с наветренной стороны, а также наземных препятствий может корректироваться путем экстраполяции скорости ветра по логарифмическому закону на высоту 60 м с учетом параметра шероховатости для конкретной станции z_{0u} и последующей обратной интерполяцией на высоту 10 м с использованием параметра шероховатости z_0, выбираемого в зависимости от вида применения данных. Параметр шероховатости z_{0u} должен быть репрезентативным для двухкилометровой области с наветренной стороны от станции; величина z_{0u} обычно зависит от направления ветра. Методика определения z_{0u} описана в приложении.

Если возмущение потока и влияние орографии незначительны или были скорректированы, применяется (c) к поправке на расположение анемометра (d) с помощью формулы 5.3 при z = 10 м и z_0 = 0,03 м. В этом случае исправленная скорость ветра будет эквивалентна той, которая была бы измерена на гипотетической станции, расположенной в данном месте и отвечающей требованиям ВМО в части выполнения измерений на высоте 10 м. Скорость ветра, скорректированная таким образом, именуется потенциальной скоростью ветра (WMO, 2001).

Здесь уместно сделать два замечания. Во-первых, высоту экстраполяции 60 м не следует рассматривать как твердо определенную величину. Высота 40 – 80 м является вполне допустимой; выбор высоты 60 м является наиболее корректным применительно к двухкилометровой области, для которой величина z_{0u} является репрезентативной, и, как показано в Wieringa, 1986, дает удовлетворительные результаты. Во-вторых, в диапазоне высот 10 – 60 м поправки профиля ветра на степень устойчивости вертикальной стратификации не могут не приниматься во внимание. Однако, при данной формулировке влияние степени устойчивости относительно мало, так как поправки на устойчивость при экстраполяции скорости ветра вверх и интерполяции ее вниз приблизительно компенсируют друг друга. Практический пример применения методов коррекции ветра в оперативной работе приведены в WMO (2000) and WMO (2001). Хотя большинство поправок на размещение приборов можно ввести непосредственно к измеренному ветру, включать в сводки надо как непосредственно измеренные (уровень I), так и скорректированные (уровень II) значения ветра.

5.10 КАЛИБРОВКА И ОБСЛУЖИВАНИЕ

Полностью надежная калибровка чашечных и крыльчатых анемометров, а также анеморумбометров возможна лишь в аэродинамической трубе. Однако в настоящее время эксплуатационные качества таких приборов хорошо известны, и для большинства видов использования приборов, когда они находятся в хорошем состоянии, можно полагаться на калибровку изготовителя. Исследования в аэродинамической трубе полезны для специальных проектов или испытаний новых моделей приборов.

В полевых условиях анеморумбометры подвержены износу, поэтому рекомендуются их регулярные поверки. Изменение характеристик датчика, приводящее к ухудшению качества данных о ветре, может произойти в результате физического повреждения приборов, усиление трения в подшипнике или ухудшения процесса преобразования (например, снижения производительности чашечного или крыльчатого генератора в результате износа щетки).

Изучение записи в аналоговом режиме позволит выявить неисправности, такие как неверное положение нуля отсчета, ступенчатая форма кривых, вызванная трением, шум (который может проявляться при небольших скоростях ветра), низкий уровень чувствительности (при малых скоростях), а также нерегулярная или заниженная изменчивость регистрируемого ветра.

Следует проверять приборы на наличие повреждений путем поверки положения нуля анеморумбометра методом фиксирования чашек или лопастей, а ориентацию флюгера – путем фиксирования его в изначально заданном положении или положениях. Датчики, как правило, целесообразно ремонтировать только в условиях мастерской.

Следует регулярно проводить поверки системы путем контроля электрических и электронных компонентов электрических регистрирующих и телеметрических приборов. Поверять нулевую отметку и диапазон измерения следует у датчиков как скорости, так и направления ветра.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ИНТЕГРАЛЬНЫЙ ПАРАМЕТР ШЕРОХОВАТОСТИ

Для целей корректировки размещения ветроизмерительных приборов требуется информация о параметре шероховатости z_0, репрезентативном для двухкилометровой области, расположенной с наветренной стороны от станции, как функции направления ветра. Эффективность введения поправки на шероховатость существенно зависит от точности определения этого параметра.

В морских условиях задача определения параметра шероховатости не вызывает трудностей благодаря однородности подстилающей поверхности. Может быть использована так называемая зависимость Чарнока, выражающая связь между шероховатостью морской поверхности, скоростью трения u^* и ускорением свободного падения g с помощью уравнения $z_{0u} = \alpha\, u^{*2}/g$, где α – эмпирическая константа, приблизительно равная 0,014. Связь скорости трения с вертикальным профилем ветра при нейтральной стратификации можно выразить с помощью уравнения $U(z) = (u^*/K) \ln (z/z_{0u})$, где K – постоянная Кармана (0,4), а z – высота наблюдения. Эти два уравнения приходится решать методом итерации, применение которого следует начать со значения z_{0u}, равного 0,0001, и вычислить u^* для логарифмического профиля ветра, затем еще раз рассчитать z_{0u} и повторять эту процедуру расчета несколько раз.

Параметр шероховатости подстилающей поверхности зависит от типа поверхности и вида ее использования и поэтому, как правило, трудно поддается оценке. Субъективный способ определения z_{0u} основан на визуальном обследовании территории вокруг станции и использовании приведенной ниже таблицы, справедливость которой была недавно подтверждена (Davenport and others, 2000). Наиболее приемлемым способом является задание секторов в 30° по направлению ветра до расстояния 2 км. В условиях высокой степени неоднородности подстилающей поверхности интегральный параметр ее шероховатости должен определяться путем осреднения значений ln (z_{0u}), а не собственно z_{0u}.

Лучшим способом определения z_{0u} является его оценка на основе рядов средних квадратических отклонений длиной в 1 год. Средние квадратические отклонения скорости ветра и его направления связаны с параметром шероховатости поверхности на участках протяженностью в несколько километров и могут быть использованы для объективной оценки z_{0u}. Как среднее квадратическое отклонение скорости ветра s_u, так и среднее квадратическое отклонение направления ветра s_d (в радианах) могут использоваться при расчетах z_{0u} с помощью следующих формул:

$$s_u / U = c_u \kappa \, [\ln (z/z_{0u})]^{-1} \qquad \text{A.1}$$

$$s_d / U = c_v \kappa \, [\ln (z/z_{0u})]^{-1} \qquad \text{A.2}$$

где c_u=2,2, c_v= 1,9 и κ = 0,4 в случае, когда значения su и s_d основаны на нефильтрованных измерениях. Для измерительных систем, описанных в разделе 5.8.3, фильтрация сигнала приводит к уменьшению среднего квадратического отклонения скорости ветра приблизительно на 12 %, а направления ветра – на 2 %, что означает уменьшение c_u и c_v до 1,94 и 1,86 соответственно. Для применения вышеуказанных уравнений необходимо выбрать случаи сильного ветра (U > 4 м/с) и осреднить σ_u/U и/или σ_θ для всех имеющихся данных и секторов направления ветра (шириной 30°) и сезонов (шероховатость подстилающей поверхности зависит, например, от степени покрытия деревьев листвой). После этого можно определить значение z_{0u} с помощью вышеуказанных уравнений, а сравнение результатов расчетов с использованием σ_u и σ_θ даст некоторое представление о полученной точности.

В случаях, когда отсутствуют данные о среднем квадратическом отклонении, а максимальный порыв определяется за период осреднения ветра (10 мин или 1 час), для расчетов z_{0u} можно также использовать отношение максимальных порывов к средним значениям за тот же период (коэффициент порывистости, Verkaik, 2000). Для применения этого подхода необходимы сведения о динамике системы, а именно о длине пути воздушной частицы до момента срабатывания датчика и времени реакции измерительной цепочки.

Классификация местности по Davenport (1960), адаптированная Wieringa (1980) применительно к аэродинамическому параметру шероховатости z_0

Класс	*Краткое описание местности*	z_0 *(м)*
1	Открытое море, при длине участка морской поверхности не менее 5 км	0,000 2
2	Плоская грязевая равнина, снег; отсутствие растительности, препятствий	0,005
3	Открытая плоская поверхность; трава, редкие отдельно стоящие препятствия	0,03
4	Невысокие сельскохозяйственные культуры; редкие большие препятствия, $x/H > 20$	0,10
5	Высокие сельскохозяйственные культуры; умеренное количество препятствий, $15 < x/H < 20$	0,25
6	Парковые насаждения, кусты; многочисленные препятствия, $x/H \approx 10$	0,5
7	Зона с регулярно расположенными высокими препятствиями (городская окраина, лес)	1,0
8	Городской центр с высокими и низкими зданиями	≥2

ПРИМЕЧАНИЕ. Здесь x – типичное расстояние от препятствия с наветренной стороны от него , а H – высота соответствующих крупных препятствий. Более детальное и современное описание классов местности содержится в Davenport and others (2000) (см. также табл. 11.2 в Главе 11 Части II)

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Всемирная Метеорологическая Организация, 1990: *Комиссия по приборам и методам наблюдений. Сокращенный окончательный отчет десятой сессии*. ВМО-№ 727, Женева.

Всемирная Метеорологическая организация, 1995: *Наставление по кодам*. Том 1.1. ВМО-№ 306, Женева.

Ackermann, G.R., 1983: Means and standard deviations of horizontal wind components. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 22, pp. 959–961.

Albers, A., H. Klug and D. Westermann, 2000: Outdoor Comparison of Cup Anemometers. *DEWI Magazin*, No. 17, August 2000.

Beljaars, A.C.M., 1987: The influence of sampling and filtering on measured wind gusts. *Journal of At-mospheric and Oceanic Technology*, 4, pp. 613–626.

Busch, N.E. and L. Kristensen, 1976: Cup anemometer overspeeding. *Journal of Applied Meteorology*, 15, pp. 1328–1332.

Coppin, P.A., 1982: An examination of cup anemometer overspeeding. *Meteorologische Rundschau*, 35, pp. 1–11.

Curran, J.C., G.E. Peckham, D. Smith, A.S. Thom, J.S.G. McCulloch and I.C. Strangeways, 1977: Cairngorm summit automatic weather station. *Weather*, 32, pp. 60–63.

Davenport, A.G., 1960: Rationale for determining design wind velocities. *Journal of the Structural Division*, American Society of Civil Engineers, 86, pp. 39–68.

Davenport, A.G., C.S.B. Grimmond, T.R. Oke and J.Wieringa, 2000: Estimating the roughness of cities and sheltered country. *Preprints of the Twelfth American Meteorological Society Conference on Applied Climatology* (Asheville, NC , United States), pp. 96–99.

Evans, R.A. and B.E. Lee, 1981: The problem of anemometer exposure in urban areas: a wind-tunnel study. *Meteorological Magazine*, 110, pp. 188–189.

Frenkiel, F.N., 1951: Frequency distributions of velocities in turbulent flow. *Journal of Meteorology*, 8, pp. 316–320.

Gill, G.C., L.E. Olsson, J. Sela and M. Suda, 1967: Accuracy of wind measurements on towers or stacks. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 48, pp. 665–674.

Gold, E., 1936: Wind in Britain – The Dines and some notable records during the last 40 years. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 62, pp. 167–206.

Grimmond, C.S.B., T.S. King, M. Roth and T.R. Oke, 1998: Aerodynamic roughness of urban areas derived from wind observations. *Boundary Layer Meteorology*, 89, pp. 1–24.

Kaimal, J.C., 1980: Sonic anemometers. *Air-sea Interaction: Instruments and Methods* (F. Dobson, L. Hasse and R. Davis, eds), Plenum Press, New York, pp. 81–96.

Lenschow, D.H. (ed.), 1986: *Probing the Atmospheric Boundary Layer.* American Meteorological Society, Boston.

MacCready, P.B., 1966: Mean wind speed measurements in turbulence. *Journal of Applied Meteorology*, 5, pp. 219–225.

MacCready, P.B. and H.R. Jex, 1964: Response characteristics and meteorological utilization of propeller and vane wind sensors. Journal of Applied Meteorology, 3, pp. 182–193.

Makinwa, K.A.A., J.H. Huijsing and A. Hagedoorn, 2001: Industrial design of a solid-state wind sensor. *Proceedings of the First ISA/IEEE Conference*, Houston, November 2001, pp. 68–71.

Mazzarella, D.A., 1972: An inventory of specifications for wind-measuring instruments. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 53, pp. 860–871.

Mollo-Christensen, E. and J.R. Seesholtz, 1967: Wind tunnel measurements of the wind disturbance field of a model of the Buzzards Bay Entrance Light Tower. *Journal of Geophysical Research*, 72, pp. 3549–3556.

Patterson, J., 1926: The cup anemometer. *Transactions of the Royal Society of Canada*, 20, Series III, pp. 1–54.

Smith, S.D., 1980: Dynamic anemometers. *Air-sea Interaction: Instruments and Methods* (F. Dobson, L. Hasse and R. Davis, eds.). Plenum Press, New York, pp. 65–80.

Taylor, P.A. and R.J. Lee, 1984: Simple guidelines for estimating wind speed variations due to small scale topographic features. *Climatological Bulletin*, Canadian Meteorological and Oceanographic Society, 18, pp. 3–22.

Van Oudheusden, B.W. and J.H. Huijsing, 1991: Microelectronic thermal anemometer for the measurement of surface wind. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 8, pp. 374–384.

Verkaik, J.W., 2000: Evaluation of two gustiness models for exposure correction calculations. *Journal of Applied Meteorology*, 39, pp. 1613–1626.

Walmsley, J.L., I.B. Troen, D.P. Lalas and P.J. Mason, 1990: Surface-layer flow in complex terrain: Comparison of models and full-scale observations. *Boundary-Layer Meteorology*, 52, pp. 259–281.

Wieringa, J., 1967: Evaluation and design of wind vanes. *Journal of Applied Meteorology*, 6, pp. 1114–1122.

Wieringa, J., 1980*a*: A revaluation of the Kansas mast influence on measurements of stress and cup anemometer overspeeding. *Boundary-Layer Meteorology*, 18, pp. 411–430.

Wieringa, J., 1980*b*: Representativeness of wind observations at airports. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 61, pp. 962–971.

Wieringa, J., 1983: Description requirements for assessment of non-ideal wind stations, for example Aachen. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 11, pp. 121–131.

Wieringa, J., 1986: Roughness-dependent geographical interpolation of surface wind speed averages. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 112, pp. 867–889.

Wieringa, J., 1996: Does representative wind information exist? *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 65, pp. 1–12.

Wieringa, J. and F.X.C.M. van Lindert, 1971: Application limits of double-fin and coupled wind vanes. *Journal of Applied Meteorology*, 10, pp. 137–145.

World Meteorological Organization, 1981: *Review of Reference Height for and Averaging Time of Surface Wind Measurements at Sea* (F.W. Dobson). Marine Meteorology and Related Oceanographic Activities Report No. 3, Geneva.

World Meteorological Organization, 1984*a*: *Compendium of Lecture Notes for Training Class IV Meteorological Personnel* (B.J. Retallack). Volume II – Meteorology (second edition), WMO-No. 266, Geneva.

World Meteorological Organization, 1984*b*: Distortion of the wind field by the Cabauw Meteorological Tower (H.R.A. Wessels). *Papers Presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Cost-effective Meteorological Observations (TECEMO)*, Instruments and Observing Methods Report No. 15, Geneva.

World Meteorological Organization, 1987: *The Measurement of Gustiness at Routine Wind Stations: A Review* (A.C.M. Beljaars). Instruments and Observing Methods Report No. 31, Geneva.

World Meteorological Organization, 1989: *Wind Measurements Reduction to a Standard Level* (R.J. Shearman and A.A. Zelenko). Marine Meteorology and Related Oceanographic Activities Report No. 22, WMO/TD-No 311, Geneva.

World Meteorological Organization, 1991: *Guidance on the Establishment of Algorithms for Use in Synoptic Automatic Weather Stations: Processing of Surface Wind Data* (D. Painting). Report of the CIMO Working Group on Surface Measurements, Instruments and Observing Methods Report No. 47, WMO/TD-No. 452, Geneva.

World Meteorological Organization, 2000: Wind measurements: Potential wind speed derived from wind speed fluctuations measurements, and the representativity of wind stations (J.P. van der Meulen). *Papers Presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2000)*, Instruments and Observing Methods Report No. 74, WMO/TD-No. 1028, p. 72, Geneva.

World Meteorological Organization, 2001: Lecture notes for training agricultural meteorological personnel (second edition; J. Wieringa and J. Lomas). WMO-No. 551, Geneva (sections 5.3.3 and 9.2.4).

Wyngaard, J.C., 1981: The effects of probe-induced flow distortion on atmospheric turbulence measurements. *Journal of Applied Meteorology*, 20, pp. 784–794.

ГЛАВА 6

ИЗМЕРЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА ОСАДКОВ

6.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В настоящей главе описаны хорошо известные методы измерения количества осадков на наземных станциях. В ней не рассматриваются измерения, при которых определяются структура и характер осадков, требующие специализированных приборов или не относящиеся к стандартным метеорологическим наблюдениям (например, определение распределения капель по размерам). Радиолокационные, спутниковые и морские наблюдения рассматриваются в части II.

Информация об измерении количества осадков, которая включает, в частности, более подробные описания измерений снежного покрова, помещена также в публикациях WMO (1992*a*; 1998).

Общая проблема репрезентативности особенно остро стоит при измерении осадков. На измерения количества осадков существенное влияние оказывают местоположение приборов, ветер и топография, в связи с чем особую важность для потребителей представляют метаданные, описывающие условия, в которых проводятся измерения.

Анализ данных об осадках становится более простым и надежным, если по всей сети используются одни и те же осадкомеры и критерии размещения осадкомерных постов. Это должно быть основным соображением при проектировании сетей.

6.1.1 Определения

Под осадками подразумеваются жидкие или твердые продукты конденсации водяного пара, выпадающие из облаков или осаждающиеся из воздуха на землю, – дождь, град, снег, роса, изморозь, иней и туман. Общее количество осадков, которое достигает земной поверхности за какой-то определенный период времени, выражается высотой слоя воды (или водным эквивалентом в случае твердых осадков), который покрыл бы в жидком состоянии горизонтальную проекцию земной поверхности. Количество выпавшего снега также измеряется высотой слоя свежевыпавшего снега, покрывающего ровную горизонтальную поверхность (см. раздел 6.7)

6.1.2 Единицы измерения

Единица измерений осадков представляет собой линейную высоту, которая обычно для жидких осадков выражается в миллиметрах (объем/площадь) или в кг/м^2 (масса/площадь). Суточное количество осадков следует определять с точностью до 0,2 мм, а если возможно, то до 0,1 мм. Недельное или месячное количество осадков надо определять с точностью, по меньшей мере, до 1 мм. Суточные измерения осадков следует производить в одно и то же время, общее для всей сети или всех сетей, где производятся измерения. Если количество осадков не превышает 0,1 мм (в Соединенных Штатах Америки – 0,2 мм), обычно говорят о следах осадков. Скорость выпадения осадков (интенсивность) также выражается в виде линейной меры в единицу времени, обычно в миллиметрах в час.

Количество выпавшего снега измеряется в целых и десятых долях сантиметра с точностью до 0,2 см. Количество снега, не превышающее 0,2 см, обычно называется следом. Высота снежного покрова на земле, как правило, измеряется ежедневно в целых сантиметрах.

6.1.3 Метеорологические и гидрологические требования

В приложении 1.B к главе 1 части 1 устанавливаются общие требования к точности, диапазону и разрешению измерений количества осадков и в качестве достижимой точности задается значение 5 % (на уровне значимости 95 %).

Обычно для синоптических, климатологических и гидрологических целей наблюдения производят ежечасно, через 3 часа и ежесуточно. Для некоторых целей требуется гораздо большее временное разрешение, например для измерения очень интенсивных осадков за очень короткие периоды. Некоторые прикладные задачи требуют использования суммарных осадкомеров, и интервалы наблюдений составляют недели или месяцы, а в горах и пустынях, даже год.

6.1.4 Методы измерений

6.1.4.1 Приборы

Осадкомеры (или дождемеры, когда можно измерить только жидкие осадки) являются наиболее распространенными для измерения количества осадков приборами. Как правило, используется открытая емкость с вертикальными стенками, имеющая форму правильного цилиндра с воронкой,

если основная цель состоит в измерении дождевых осадков. Поскольку размеры и форма приемного отверстия и высота осадкомеров в разных странах различаются, результаты измерений не являются строго сопоставимыми (WMO, 1989*a*). Измеряется объем или масса осадков, собранных в осадкомере, причем последнее относится, прежде всего, к твердым осадкам. Приемное отверстие осадкомера может располагаться на одной из многих точно заданных высот над поверхностью земли или на одном уровне с поверхностью земли. Отверстие должно находиться выше уровня, соответствующего максимальной высоте предполагаемого слоя снежного покрова, и на такой высоте, чтобы исключить попадание брызг с поверхности земли. В случае измерения твердых осадков приемное отверстие располагается над поверхностью земли, а вокруг него устанавливается искусственная защита. Чаще всего в более, чем 100 странах, отверстие осадкомера располагается на высоте от 0,5 до 1,5 м над поверхностью земли (WMO, 1989*a*).

Измерение осадков существенно зависит от местоположения прибора и, особенно, от ветра. Местоположение прибора обсуждается в разделе 6.2, а в разделе 6.4 довольно подробно описываются ошибки, характерные для измерений, произведенных осадкомерами, и возможные вводимые поправки.

В настоящей главе описаны также некоторые специальные методы измерения других типов осадков (роса, лед и т.п.) и снежного покрова. Однако, некоторые новые методы и приборы, которые начинают использоваться для оперативного применения, здесь не рассматриваются. Одним из таких приборов является оптический осадкомер, в основу которого положен принцип оптического рассеяния. Полезную информацию о новых разрабатываемых методах можно почерпнуть из отчетов регулярно проводимых конференций, таких как международные учебно-практические семинары по измерениям количества осадков (Slovak Hydrometeorological Institute and Swiss Federal Institute of Technology, 1993; WMO, 1989*b*), а также конференций, организуемых Комиссией по приборам и методам наблюдений (WMO, 1998).

Измерения осадков в точках служат в качестве основного источника данных для анализа осадков по площади. Однако даже наилучшие измерения осадков в одной точке репрезентативны лишь для ограниченного района, размеры которого представляют собой функцию длительности периода накопления, физико-географической однородности района, местной топографии и осадкообразующего процесса. Радиолокаторы, а с недавних пор и спутники используются для определения и количественного выражения пространственного распределения осадков. Эти методы описываются в части II настоящего Руководства. В принципе можно ожидать, что соответствующая интеграция всех трех источников данных об осадках по площади (автоматические осадкомеры, радиолокаторы и спутники) в национальных осадкомерных сетях обеспечит достаточно точные оценки осадков по площади на оперативной основе для широкого круга потребителей данных об осадках.

Приборы, которые позволяют обнаруживать осадки и определять их тип отдельно от их измерения, могут использоваться в качестве современных детекторов погоды, о которых говорится в главе 14. части I.

6.1.4.2 Эталонные осадкомеры и взаимные сравнения

Несколько типов осадкомеров используется в качестве эталонных приборов. Основная особенность их конструкции состоит в том, что уменьшается или регулируется влияние ветра на количество осадков, попавших в прибор. Это влияние является основной причиной различий в показаниях осадкомеров. Эталонные осадкомеры выбираются также для уменьшения других ошибок, описанных в разделе 6.4.

Осадкомеры, установленные на одном уровне с поверхностью земли, используются в качестве эталонных приборов для измерения жидких осадков. Ввиду отсутствия ошибки, обусловленной влиянием ветра, они в целом регистрируют больше осадков, чем любой другой осадкомер, расположенный над поверхностью земли (WMO, 1984). Осадкомер устанавливается в углублении таким образом, чтобы его приемное отверстие находилось на уровне земли в достаточном отдалении от ближайшего края углубления, чтобы исключить попадание брызг с поверхности земли. Углубление должно закрываться прочной пластиковой или металлической решеткой для защиты от брызг с отверстием в середине для осадкомера. Необходимо принять меры для осушения углубления. Чертежи ямочного осадкомера приведены в публикации WMO (1984).

Эталонный осадкомер для измерения твердых осадков представляет собой так называемый эталон с двойной заборной защитой, предназначенный для взаимных сравнений. Он снабжен восьмиугольной вертикальной двойной заборной защитой; она устанавливается вокруг осадкомера Третьякова, который сам по себе имеет специальную форму ветровой защиты. Чертежи и описание содержатся в публикациях Goodison, Sevruk and Klemm (1989) и WMO (1985), а также в итоговом отчете ВМО о взаимных сравнениях измерителей твердых

осадков (WMO, 1998).Рекомендации по сравнению осадкомеров с эталонными осадкомерами приводятся в приложении 6. A[1]

6.1.4.3 Документация

На результаты измерений количества осадков очень сильно влияет местоположение прибора, поэтому при составлении полного исторического описания станции, используемого при климатологических и других исследованиях и для обеспечения качества данных, необходимо тщательно зарегистрировать метаданные, т. е. условия измерений.

В разделе 6.2 приводится информация о размещении осадкомерных пунктов, которую необходимо хранить, а именно: подробное описание площадки, включая угловую высоту значительных препятствий вокруг осадкомера, конфигурации осадкомера, высоты расположения приемного отверстия осадкомера над поверхностью земли и высоты над поверхностью земли прибора, измеряющего скорость ветра.

Изменения в методах наблюдений за осадками, главным образом, использование различных типов осадкомеров и изменение места размещения и высоты установки приборов может привести к возникновению неоднородностей во временных рядах данных об осадках (см. часть 2 главы III). Использование различных типов осадкомеров и различия в их размещении приводят к возникновению пространственных неоднородностей. Это связано с систематическими ошибками в измерении осадков, в основном с ошибками, вызванными влиянием ветра. Статистические методы корректировки позволяют устранить неоднородности в измерениях, произведенных осадкомерами, расположенными по соседству друг от друга, а внесение в результаты измерений поправок, корректирующих ошибки, вызванные влиянием ветра, позволяет устранить погрешность в измерениях, произведенных любыми типами осадкомеров.

В последующих разделах (особенно в разделе 6.4), посвященных различным типам приборов, описаны поправки, которые могут вводиться в результаты измерений количества осадков. Такие поправки могут также иметь погрешности, поэтому необходимо хранить первоначальные результаты измерений и формулы, по которым поправки рассчитывались.

Следует также документировать любые изменения в методах наблюдений.

1 Предложены Комиссией по приборам и методам наблюдений на одиннадцатой сессии (1994 г.).

6.2 РАЗМЕЩЕНИЕ И УСТАНОВКА

Все методы измерения количества осадков должны быть направлены на получение пробы, репрезентативной по отношению к истинному количеству осадков, выпадающему в исследуемом районе синоптического, мезо- или микромасштаба. Поэтому важен выбор места, а также определение систематической погрешности измерений. Влияние выбора места обсуждается в публикации Sevruk and Zahlavova (1994).

Немаловажным является размещение осадкомерных пунктов в исследуемом районе, так как число этих пунктов и их расположение определяют, насколько репрезентативны произведенные измерения количества осадков для данного района. Более подробная информация о репрезентативности данных о дожде и снеге приведена в публикации WMO (1992*a*). Введение в литературу, посвященную расчету осадков по площади и поправкам на топографию, содержится в публикации WMO (1994).

Влияние на поле ветра предметов, расположенных поблизости от осадкомерного пункта, может приводить к регистрации локальных излишков или дефицита осадков в месте расположения осадкомера. Желательно, чтобы никакие объекты не находились от осадкомера на расстоянии, меньшем их удвоенной высоты над отверстием осадкомера. Для каждого осадкомерного пункта следует рассчитать среднюю угловую высоту препятствий и составить план пункта. Следует избегать установки осадкомеров на наклонной поверхности или на крыше здания. Пункты, выбранные для измерения количества выпавшего снега и/или высоты снежного покрова, следует располагать в местах, возможно более защищенных от ветра. Наилучшие места для расположения осадкомерных пунктов часто находятся на лесных полянах или в садах, среди деревьев, в кустарниковом редколесье или там, где другие объекты представляют собой эффективную защиту от ветра со всех направлений.

Однако воздействие ветра и влияние места размещения прибора на степень этого воздействия можно уменьшить, используя для измерения жидких осадков осадкомер, расположенный на уровне поверхности земли, или заставив поток воздуха проходить горизонтально над приемным отверстием осадкомера при помощи следующих методов (перечислены в порядке уменьшения их эффективности):

(a) в районах с однородной густой растительностью; высоту растительности при помощи регулярного подрезания следует поддерживать таким образом, чтобы она равнялась высоте приемного отверстия осадкомера;

(b) в других районах следует стимулировать эффект, описанный в пункте а), путем применения соответствующих ограждений;

(c) следует использовать ветровую защиту вокруг осадкомера.

Поверхность, окружающая осадкомер, может быть покрыта низкой травой, гравием или галькой, но необходимо избегать твердых гладких покрытий, таких как бетон, с целью предотвращения излишнего попадания брызг в осадкомер

6.3 НЕРЕГИСТРИРУЮЩИЕ ОСАДКОМЕРЫ

6.3.1 Обычные осадкомеры

6.3.1.1 Приборы

Повсеместно используемый осадкомер состоит из коллектора, помещенного над воронкой, соединенной с контейнером, в котором вода или растаявший снег накапливаются и хранятся между сроками наблюдений. Как показано на рис. 6.1, в мире используются осадкомеры разной формы. Там, где твердые осадки выпадают часто и в большом количестве, для повышения точности измерений используется ряд специальных модификаций. Такие модификации включают удаление воронки дождемера перед началом снежного сезона или применение специального снегозадерживающего щита (см. WMO, 1998) для защиты от выдувания снега. Ветровая защита вокруг осадкомера сокращает ошибку, обусловленную деформацией поля ветра над осадкомером и задуванием снега в осадкомер. Она рекомендована для измерения количества осадков и необходима для измерения количества выпавшего снега. Используемые осадкомеры. весьма разнообразны по конструкции (см. WMO, 1989 *a*).

Накопленная вода либо собирается в измерительном сосуде, либо переливается из контейнера в измерительный сосуд, либо ее уровень в контейнере измеряется непосредственно с помощью проградуированной рейки. Размер приемного отверстия

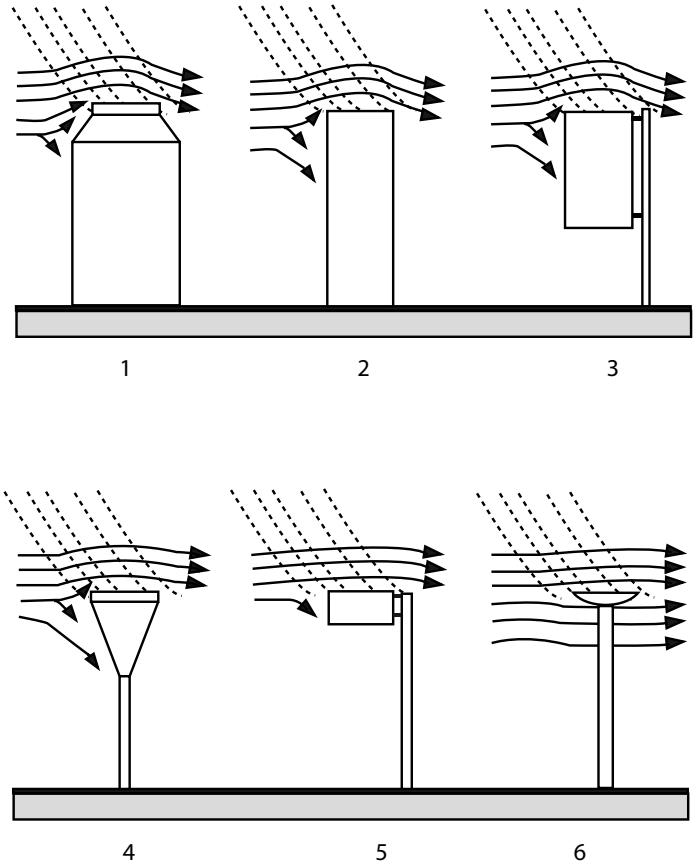


Рис. 6.1 Различные формы стандартных осадкомеров. Сплошные линии показывают линии тока воздуха, а пунктирные – траектории частиц осадков. Первый осадкомер вызывает наибольшую деформацию ветрового поля над верхней частью прибора, а последний – наименьшее. Следовательно, ветровая погрешность для первого осадкомера больше,чем для последнего (Sevruk и Nespor).

коллектора не оказывает существенного влияния на измерение жидких осадков, но если ожидается значительное количество твердых осадков, то площадь отверстия должна составлять по меньшей мере 200 см^2. Площадь от 200 до 500 см^2 будет, вероятно, наиболее подходящей. Основные требования, предъявляемые к осадкомеру, сводятся к следующему:

(a) ободок коллектора должен иметь острый край и быть строго вертикальным внутри и пологим снаружи; конструкция осадкомеров для измерения количества снега должна быть такой, чтобы сужение приемного отверстия из-за скопления мокрого снега вокруг ободка не могло быть значительным;

(b) площадь приемного отверстия должна быть известна с точностью до 0,5 %, и конструкция осадкомера должна быть такой, чтобы эта площадь оставалась постоянной при обычном использовании осадкомера;

(c) коллектор должен быть сконструирован так, чтобы осадки не выбрызгивались изнутри наружу и чтобы брызги не попадали внутрь. Этого можно достичь, если вертикальная стенка достаточно высока и наклон воронки достаточно пологий (по крайней мере 45 %). Целесообразное устройство коллекторов показано на рисунке 6.2;

(d) конструкция должна быть такой, чтобы свести к минимуму потери на смачивание;

(e) входное отверстие контейнера должно быть узким, и контейнер должен быть в достаточной мере защищен от воздействия солнечных лучей, чтобы свести потери за счет испарения до минимума. Осадкомеры, используемые в местах, где целесообразно снимать показания прибора один раз в неделю или в месяц, должны быть аналогичными по конструкции осадкомерам, применяемым для суточных измерений, но с контейнером большей емкости и более прочной конструкции

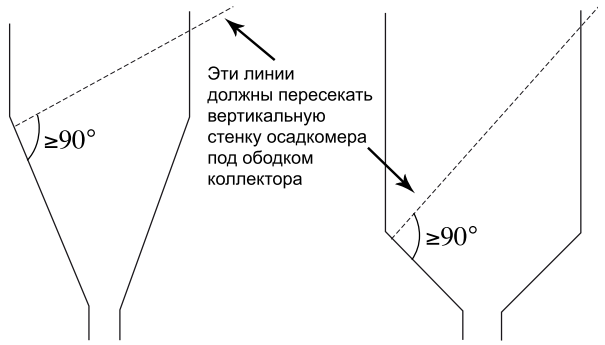


Рис. 6.2 Целесообразное устройство коллектора осадкомера

Мерный стакан должен изготавливаться из прозрачного стекла или пластика с подходящим коэффициентом теплового расширения и иметь четкую маркировку, указывающую размер или тип осадкомера, с которым его следует использовать. Его диаметр должен составлять не более 33 % диаметра приемного отверстия прибора; чем меньше соответствующий диаметр, тем выше точность измерения. Деления следует наносить четко; вообще деления рекомендуется наносить с интервалом 0,2 мм и четко оцифровывать линии каждого целого миллиметра. Кроме этого, желательно, чтобы была нанесена линия-риска, соответствующая 0,1 мм. Максимальная погрешность градуировки не должна превышать ± 0,05 мм у отметки 2 мм или выше и ± 0,02 мм ниже этой отметки.

Для того чтобы измерить небольшое количество осадков с достаточной точностью, внутренний диаметр мерного стакана должен уменьшаться к основанию. При всех измерениях уровень воды определяется по нижнему краю мениска, и при снятии показаний мерный стакан следует держать вертикально во избежание ошибок параллакса. Нанесение основных градуировочных линий на внутреннюю сторону стакана также помогает уменьшить такие ошибки.

Мерные рейки следует изготавливать из кедра или другого подходящего материала, который слабо поглощает воду и имеет незначительный коэффициент капиллярности. Деревянные мерные рейки непригодны, если в коллектор для уменьшения испарения добавлено масло. В этом случае рекомендуется использовать рейки из металла или других материалов, с которых масло легко удаляется. Неметаллические рейки во избежание быстрого износа должны быть снабжены латунным наконечником и градуироваться в соответствии с соотношением площадей поперечного сечения приемного отверстия осадкомера и коллектора; деления должны наноситься, по крайней мере, через каждые 10 мм, и следует предусматривать поправку на вытеснение жидкости самой мерной рейкой. Максимальная ошибка градуировки мерной рейки не должна превышать ±0,5 мм в любой точке. Измерения, проводимые при помощи мерной рейки, рекомендуется, где это возможно, проверять по мерному стакану.

6.3.1.2 **Эксплуатация**

При снятии показаний наблюдатель должен держать мерный стакан вертикально во избежание ошибок параллакса. Снег, накопленный в нерегистрирующих осадкомерах, должен либо взвешиваться, либо растапливаться сразу после каждого наблюдения, а

затем измеряться с использованием стандартного градуированного мерного стакана. Количество собранных осадков можно также измерять точным взвешиванием. Этот метод имеет некоторые преимущества. Определяется общая масса мерного сосуда и его содержимого, затем вычитается масса сосуда, которая известна заранее. В этом случае возможность разлить воду маловероятна, и любое количество жидкости, оставшееся в мерном сосуде, включается в эту массу. Однако обычно используемые методы являются более простыми и дешевыми.

6.3.1.3 Калибровка и техническое обслуживание

Градуировка мерного стакана или рейки должна, разумеется, соответствовать выбранному размеру коллектора. Поэтому калибровка осадкомера включает проверку диаметра приемного отверстия осадкомера: следует обеспечить, чтобы он находился в пределах разрешаемого допуска. Калибровка также включает объемные проверки мерного стакана и рейки.

Регулярное техническое обслуживание должно включать поддержание в любое время уровня осадкомера для предотвращения нарушения его горизонтальности (см. Rinehart, 1983; Sevruk, 1984). Согласно требованиям, должны периодически очищаться внешний контейнер осадкомера (как внутри, так и снаружи), а также градуировка. Для мытья используются щетка с длинной ручкой и мыльная вода; затем производится ополаскивание чистой водой. Изношенные, поврежденные или сломанные части должны по необходимости заменяться. Растительность вокруг осадкомера должна подрезаться на высоте 5 см (где это применимо). Следует проверять и фиксировать местоположение с точки зрения подверженности внешним воздействиям.

6.3.2 Суммарные осадкомеры

Суммарные осадкомеры используются для измерений общего сезонного количества осадков в отдаленных и малонаселенных районах. Такие осадкомеры состоят из коллектора, помещенного над воронкой, соединенной с контейнером, объем которого достаточен для того, чтобы вместить сезонный сбор (или месячный сбор в районах с повышенной влажностью). Для уменьшения испарения в контейнер необходимо налить слой подходящего масла толщиной не менее 5 мм или другого вещества, препятствующего испарению (WMO, 1972). Осадки должны иметь возможность свободно попадать в раствор, находящийся под этим слоем.

В контейнер может быть налит раствор антифриза для превращения снега, попадающего в осадкомер, в жидкость. Важно, чтобы раствор антифриза оставался диспергированным. Смесь, состоящая на 37,5 % по массе из технического хлористого кальция (степень чистоты 78 %) и на 62,5 % из воды, образует удовлетворительный раствор антифриза. Кроме этого, можно использовать водные растворы этиленгликоля или смесь этиленгликоля с метиловым спиртом. Хотя эти растворы более дорогостоящие, они в меньшей степени вызывают коррозию, чем хлористый кальций, и предохраняют от замерзания при большей степени разбавления, которое происходит в результате последующего попадания осадков. Объем раствора, первоначально помещаемого в контейнер, не должен превышать 33 % общего объема осадкомера.

В некоторых странах такой раствор антифриза и масла считается токсичным отходом и, следовательно, представляет угрозу для окружающей среды. Рекомендации по удалению токсичных веществ следует получить у местных органов по охране окружающей среды.

Сезонный сбор осадков определяется путем взвешивания или измерения объема содержимого контейнера (как для обычных осадкомеров; см. раздел 6.3.1). Следует точно учитывать количество масла и антифриза, помещенных в контейнер в начале сезона, и любое уменьшение его объема при проведении объемных измерений. Поправки могут вводиться те же, что и в случае обычных осадкомеров.

Функционирование и техническое обслуживание суммарных осадкомеров в отдаленных районах создает ряд проблем, таких как занесение прибора снегом, трудность в установке осадкомера в местах, удобных для снятия показаний и т. д., которые требуют специального контроля. Особенно большое внимание следует уделять оценке качества данных, полученных с помощью таких осадкомеров.

6.4 ПОГРЕШНОСТИ И ПОПРАВКИ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ КОЛИЧЕСТВА ОСАДКОВ

На этом этапе уместно описать погрешности и поправки, которые касаются в определенной степени большинства осадкомеров, будь то регистрирующие или нерегистрирующие приборы. Особые случаи, касающиеся регистрирующих приборов, описаны в разделе 6.5.

Всестороннее описание погрешностей и поправок можно найти в публикациях WMO (1982; 1984; 1986), а конкретно для снега – в публикации WMO (1998).

Подробные сведения о моделях, используемых в настоящее время для коррекции необработанных данных об осадках в Канаде, Дании, Финляндии, Швейцарии, России и США, приводятся в публикации WMO (1982). В публикации WMO (1989*a*) описывается происхождение погрешностей. В публикациях WMO (1986 и 1989*b*) собраны доклады конференций по этой теме.

Количество осадков, измеряемых при помощи повсеместно используемых осадкомеров, может быть меньше фактического количества осадков, достигающих поверхности земли, и эта разница может достигать 30 % и даже более. Систематические потери изменяются в зависимости от типа осадков (снег, снег с дождем и дождь). Систематическая погрешность измерений твердых осадков, как правило, велика и может на порядок величины превышать погрешности, обычно характерные для измерения жидких осадков.

Для многих гидрологических целей необходимо сначала произвести коррекцию данных с учетом погрешностей, прежде чем делать расчеты. Такая коррекция, конечно, не может быть точной (и даже может увеличить погрешность). Поэтому исходные данные рекомендуется хранить в основном архиве как для того, чтобы поддерживать однородность, так и для того, чтобы иметь наилучшую основу для проведения более совершенной коррекции в будущем, если это будет возможно.

Истинное количество осадков рекомендуется оценивать с учетом поправок, учитывая некоторые или все причины возникновения погрешностей, перечисленные ниже:

(a) погрешность из-за систематической деформации поля ветра над приемным отверстием осадкомера: как правило, составляет 2 – 10 % в случае дождя и 10 – 50 % в случае снега;
(b) погрешность из-за потерь на смачивание внутренних стенок коллектора;
(c) погрешность из-за потерь жидкости, остающейся в контейнере при его опорожнении: обычно 2 – 15 % летом и 1 – 8 % зимой для (b)и (c) взятых вместе;
(d) погрешность из-за испарения жидкости из контейнера (особенно важна для мест с жарким климатом): 0 – 4 %;
(e) погрешность из-за низовой метели и поземка;
(f) погрешность из-за попадания брызг в контейнер и выбрызгивания воды из контейнера: 1 – 2 %
(g) случайные ошибки наблюдений и погрешности приборов.

Первые шесть компонентов погрешностей ошибок носят систематический характер и перечислены в порядке их значимости. Суммарная погрешность из-за низовой метели и поземка и из-за выбрызгивания воды из контейнера и попадания брызг в контейнер может быть как положительной, так и отрицательной, в то время как систематические погрешности, возникающие из-за деформации поля ветра и других факторов, являются отрицательными. Поскольку погрешности, указанные выше, в пунктах (e) и (f), как правило, количественно оценить трудно, общая модель для коррекции данных большинства осадкомеров принимает следующий вид:

$$P_k = kP_c = k\,(P_g + \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3) \qquad (6.1)$$

где P_k – скорректированное количество осадков; k (см. рис. 6.3) – поправочный коэффициент для учета влияния деформации поля ветра; P_c – количество осадков, собранных в коллекторе прибора; P_g – измеренное количество осадков в осадкомере; ΔP_1 – поправка на потерю жидкости за счет смачивания внутренних стенок коллектора; ΔP_2 – поправка на потерю жидкости, остающейся в контейнере после его опорожнения; ΔP_3 – поправка на испарение из контейнера.

Эти поправки вводятся для суточных и месячных сумм осадков, а иногда – для отдельных случаев измерения количества осадков.

Вообще, для выполнения такой коррекции необходимы вспомогательные данные, в частности скорость ветра над приемным отверстием осадкомера во время выпадения осадков, размер капель, интенсивность выпадения осадков, температура и влажность воздуха и характеристики места установки осадкомера. Хотя температура воздуха и оказывает некоторое воздействие на занижение количества осадков, попадающих в контейнер осадкомера, это воздействие не такое значительное, как воздействие скорости ветра на высоте установки прибора (Yang, D., et al. 1993, Yang, D., et al. 1995). Скорость ветра, тип осадков или их интенсивность могут быть достаточными параметрами для определения поправок. Иногда используется только скорость ветра. На постах, где такие наблюдения не проводятся, для выполнения коррекции можно использовать данные, полученные путем интерполяции данных наблюдений с соседних станций, но с осторожностью и только для месячных сумм осадков.

Для большинства осадкомеров наиболее важным фактором окружающей среды, приводящим к занижению результатов измерений твердых осадков, является скорость ветра. Данные о ветре с целью проведения суточной коррекции следует получать путем стандартных метеорологических наблюдений на станции. В отдельных случаях, когда скорость

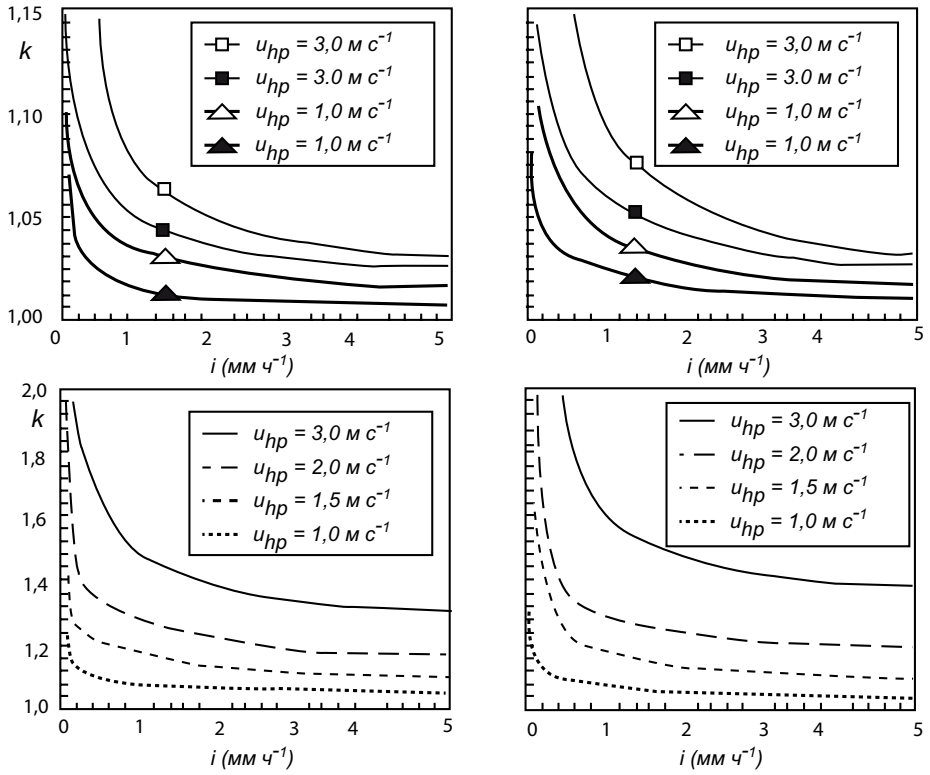


Рис.6.3 Поправочный коэффициент *k*, определенный как отношение «правильно» измеренного количества осадков к реально измеренному количеству осадков – для дождя (верхний ряд рисунков) и для снега (нижний ряд) для двух осадкомеров без ветровых защит в зависимости от скорости ветра u_{hp}, интенсивности *i* и типа погодной ситуации, согласно Nespor и Sevruk (1999). Результаты на рисунках слева получены с использованием эталонного ручного осадкомера German Hellmann, а на рисунках справа – регистрирующего осадкомера с опрокидывающимися емкостями[1] от фирмы Lambrecht. Незакрашенные (белые) символы в верхнем ряде рисунков относятся к орографическим дождям, а закрашенные (черные) – к ливневым. Важно отметить отличие в шкалах k для дождя и для снега. Для осадкомеров с ветровой защитой k может быть снижен в диапазоне до 50 % для снега и до 70 % для смешанных осадков (WMO, 1998). Тепловые потери не принимаются во внимание (в Швейцарии они варьируют в зависимости от высоты между 10 и 50 процентами относительно измеренных значений свежевыпавшего снега).

ветра не измеряется на высоте приемного отверстия осадкомера, ее можно привести к этой высоте, используя процедуру получения средней скорости ветра, зная шероховатость окружающей поверхности и угловую высоту окружающих препятствий. Предлагаемая схема показана в приложении 6. B.[2]. Эта схема во многом зависит от конкретного пункта, причем оценка требует хорошего знания местоположения конкретной станции и прибора. Защищенные осадкомеры улавливают больше осадков, чем незащищенные, особенно в случае твердых осадков. Поэтому осадкомеры следует защищать либо естественным образом (например, вырубка леса), либо искусственно (например, защита Альтера, канадская защита Нифера, ветровая защита Третьякова) для сведения к минимуму неблагоприятного влияния скорости ветра на измерения твердых осадков (информацию о конструкциях защиты можно найти в публикациях WMO 1994 и WMO 1998). От типа конфигурации ветровой защиты и от типа осадкомера зависит взаимосвязь между скоростью ветра и эффективностью улавливания осадков и однородность полученных данных.

Потери на смачивание (Sevruk, 1974*a*) являются еще одной кумулятивной систематической погрешностью ручных измерений, которая варьирует в зависимости от типа осадков и осадкомера; ее величина также зависит от того, сколько раз опустошался контейнер. На синоптических станциях, где осадки измеряются каждые 6 часов, это может привести к очень серьезным потерям. В некоторых странах, согласно расчетам, потери на смачивание достигают 15–20 % количества измеренных зимних осадков. Приемлемой альтернативой является поправка на потерю жидкости за счет смачивания во время измерения. Потери на смачивание могут удерживаться

1 Иначе называемый «челночным»

2 Схема приведения скорости ветра предложена Комиссией по приборам и методам наблюдений на одиннадцатой сессии (1994 г.).

низкими в хорошо спроектированном осадкомере. Для определения потерь на смачивания при использовании ручных осадкомеров достаточно методики, описанной в публикации WMO 1998. Рекомендуется, чтобы величина потерь на смачивание периодически пересматривалась (например, каждые 5 лет), так как зачастую она меняется по мере старения коллектора. Внутренние поверхности должны изготавливаться из материала, который может оставаться гладким и чистым; например, покрытие краской неприемлемо, но прошедшая термообработку эмаль удовлетворяет поставленным условиям. Соединительные швы в конструкции должны быть сведены к минимуму.

Потери на испарение (Sevruk, 1974*b*) варьируют в зависимости от типа осадкомера, климатической зоны и времени года. Потери на испарение являются проблемой осадкомеров, которые не имеют предохранительной воронки в контейнере, особенно поздней весной в средних широтах. Сообщается о потерях, превышающих 0,8 мм в сутки. Потери зимой гораздо ниже, чем в летние месяцы, и составляют от 0,1 до 0,2 мм в сутки. Однако эти потери являются кумулятивными. В хорошо спроектированном осадкомере воздействию испарения подвержена лишь небольшая поверхность воды, ее вентиляция сведена до минимума, а температура воды удерживается низкой с помощью отражающей внешней поверхности. При использовании суммарных и накопительных регистрирующих осадкомеров, погрешности, связанные с испарением, фактически можно устранить, если в коллекторе использовать масло.

Ясно, что для достижения сопоставимости данных при использовании различных типов осадкомеров и защиты при всех погодных условиях в фактические измерения необходимо вводить поправки. Во всех случаях, когда измерения количества осадков корректируются с целью уменьшения погрешности, настоятельно рекомендуется публиковать как измеренные, так и скорректированные значения.

6.5 ПЛЮВИОГРАФЫ

Преимущество автоматической регистрации количества осадков заключается в том, что она может обеспечить лучшее временное разрешение, чем ручные измерения, и имеется возможность сократить потери на испарение и смачивание. Разумеется, такие измерения тоже подвержены влиянию ветра, описанному в разделе 6.4

Широко применяются три типа плювиографов: весовой, с самоопорожняющимся контейнером и поплавковый. Из этих трех типов только весовой подходит для измерения всех видов осадков, два других в основном используются для измерения жидких осадков. Существует несколько новых автоматических плювиографов, в которых нет движущихся частей. В этих осадкомерах используются такие устройства, как емкостные датчики, датчики давления, оптические или небольшие радиолокационные устройства для выработки электрического сигнала, пропорционального эквиваленту осадков. Очень важным компонентом плювиографа являются часы, позволяющие определить периоды времени в которые производились записи, и проставлять даты записей.

6.5.1 Весовой плювиограф

6.5.1.1 Приборы

В приборах этого типа ведется постоянная запись массы контейнера вместе с собранными в нем осадками с помощью пружинных или рычажных весов. Таким образом, записывается общая масса осадков, как жидких, так и твердых, по мере их выпадения. Обычно приборы этого типа не имеют приспособления для удаления из него собранных осадков; его емкость (т. е. максимальное количество накопленных осадков между перезаправками) колеблется от 150 до 750 мм. Такие приборы следует обслуживать так, чтобы свести потери от испарения до минимума, чего можно достичь путем добавления в контейнер достаточного количества масла или другого вещества, препятствующего испарению, для создания пленки на поверхности воды. Колебание весов во время сильных ветров, затрудняющее снятие показаний, можно уменьшить, используя масляный демпфер, или, если есть такая возможность, при помощи специальной программы микропроцессора, исключающей влияние этих колебаний на показания прибора. Такие весовые плювиографы особенно полезны для регистрации осадков в виде снега, града и смеси снега с дождем, так как для записи количества твердых осадков их не нужно растапливать. Для работы зимой контейнер-накопитель заправляется раствором антифриза (см. раздел 6.3.2) для растапливания твердых осадков. Количество антифриза зависит от ожидаемого количества осадков и минимальной температуры, предполагаемой во время минимального разбавления.

Вес контейнера-накопителя, измеренный с помощью калиброванной пружины, трансформируется из вертикального в угловое движение с помощью серии рычагов и роликов. Это угловое движение затем механически передается на барабан или разграфленную плоскую ленту либо с помощью преобразователя переводится в цифровую форму. Точность такого рода осадкомеров непосредственно связана с их характеристиками измерения и/или регистрации, которые могут меняться в зависимости от завода-изготовителя.

6.5.1.2 Погрешности и поправки

За исключением погрешности за счет потерь на смачивание контейнера после опорожнения для весовых плювиографов характерны остальные источники погрешностей, описанные в разделе 6.4. Кроме того, следует отметить, что сами по себе автоматические плювиографы не позволяют определить тип осадков. Существенной проблемой для этого типа осадкомеров являются такие осадки, как, например, замерзающий дождь или влажный снег, которые могут прилипнуть к внутренней поверхности приемного отверстия осадкомера и попасть внутрь контейнера только некоторое время спустя. Это серьезно ограничивает способность весовых плювиографов точно определять время выпадения осадков. Другим общим недостатком весовых плювиографов является раскачивание под влиянием ветра. Это обычно происходит при сильных ветрах, когда турбулентные воздушные потоки над накопительным контейнером и вокруг него вызывают колебания весового механизма. Использование программируемых систем регистрации данных позволяет свести к минимуму погрешности, связанные с такими аномальными показаниями, путем осреднения показаний за короткие временные интервалы, например 1 мин. Погрешности в работе часов прибора, могут привести к тому, что периоды времени, в которые осуществлялся сбор осадков, и даты сбора осадков будут определены неправильно.

Использование весовых плювиографов позволяет исключить или, по крайней мере, свести к минимуму некоторые потенциальные погрешности, обусловленные измерением осадков вручную. Сводятся к минимуму случайные погрешности измерений, связанные с ошибками наблюдателя, а также некоторые систематические погрешности, особенно за счет потерь на испарение и смачивание. В некоторых странах при наблюдении следов осадков количеству осадков официально придается значение нуль, что приводит к смещению в сторону недооценки суммарных сезонных осадков. Эта проблема сводится к минимуму путем применения весовых плювиографов, поскольку даже при очень небольшом количестве осадки накапливаются со временем.

Внесение поправок в данные весовых плювиографов на ежечасной или ежесуточной основе может быть более трудным, чем за более длительные периоды времени, например для месячных климатических сводок. Дополнительные данные с автоматических метеорологических станций, такие как скорость ветра на высоте установки осадкомера, температура воздуха, погода в срок наблюдения или высота снежного покрова, будут полезными для точной интерпретации и коррекции результатов измерений количества осадков с помощью автоматических осадкомеров.

6.5.1.3 Калибровка и техническое обслуживание

Весовые плювиографы, как правило, имеют не много движущихся частей и поэтому не требуют частой калибровки. Калибровка, как правило, предусматривает использование разновесов, которые помещаются в контейнер или контейнер-накопитель и представляют собой заранее определенные эквиваленты количества осадков. Калибровка обычно должна проводиться в лаборатории согласно инструкциям завода-изготовителя

Регулярное техническое обслуживание должно проводиться каждые 3 – 4 месяца в зависимости от условий выпадения осадков на осадкомерном посту. Необходимо обследовать осадкомер как снаружи, так и изнутри на предмет незакрепленных или сломанных частей и проверки горизонтальности расположения прибора. Результаты любого ручного считывания показаний прибора должны сверяться с записью данных на сменном носителе на предмет сопоставимости до того, как запись будет удалена и аннотирована. Самоопорожняющийся контейнер или контейнер-накопитель должны быть опорожнены, обследованы, очищены, если требуется, и заправлены маслом для измерения только дождевых осадков либо антифризом и маслом, если ожидаются твердые осадки (см. раздел 6.3.2). Регистрирующее устройство должно быть установлено на нуль с тем, чтобы максимально использовать диапазон измерений. Запас ленты самописца, магнитной ленты или цифровой памяти, а также источник энергии должны быть проверены и при необходимости, их следует заменить. Может потребоваться вольтметр для установки выходного сигнала плювиографа на нуль, когда используется регистратор данных, или для проверки источника энергии плювиографа или регистрирующей системы. Необходимо проверять периоды времени, в которые производилась запись, и даты.

6.5.2 Плювиограф с самоопорожняющимся контейнером

Плювиограф с самоопорожняющимся контейнером пригоден для измерения общего количества выпавших осадков и интенсивности дождя, но не достигает необходимой точности из-за значительных нелинейных ошибок, особенно при высокой интенсивности дождя.

6.5.2.1 Приборы

Принцип действия такого прибора прост. Легкий металлический контейнер (челнок), разделенный на два отделения, находится в неустойчивом равновесии относительно горизонтальной оси. В нормальном

положении он опирается на один из двух ограничителей, что мешает ему окончательно перевернуться. Дождевая вода попадает из коллектора в то отделение, которое в данный момент находится выше, и после того, как определенное количество воды окажется в этом отделении, челнок теряет устойчивость и наклоняется к другому ограничителю. Отделения контейнера (челнока) имеют такую форму, что вода вытекает из того, которое находится в данный момент ниже. Тем временем отделение, которое оказывается выше, продолжает собирать осадки. Движение челнока в тот момент, когда он наклоняется, можно использовать для приведения в действие контактного реле, с помощью которого получают запись в виде прерывистых линий; расстояние между линиями соответствует времени, за которое выпадает определенное небольшое количество осадков. Если необходимо получить подробную запись, то это количество осадков не должно превышать 0,2 мм.

Для того чтобы челнок наклонился, необходимо небольшое, но определенное время, и во время первой половины этого движения в то отделение, в котором находится уже вычисленное количество осадков, может попасть еще какое-то их количество. Эту погрешность, которая может стать значительной во время интенсивного выпадения осадков (250 мм/ч), можно уменьшить. Самый простой метод состоит в использовании устройства, подобного сифону, у основания воронки для направления воды в челноки с контролируемой скоростью. Это сглаживает очень краткосрочные пики интенсивности. Можно также применить дополнительное устройство для ускорения наклона челнока: по существу это маленькая лопасть, о которую ударяется вода, вытекающая из коллектора, что придает дополнительное ускорение наклоняющемуся челноку, изменяющееся по мере изменения интенсивности осадков.

Плювиограф с самоопорожняющимся контейнером особенно удобен для автоматических метеорологических станций, поскольку он легко приспосабливается к цифровым методам. Импульсы, вырабатываемые контактным устройством, могут прослеживаться с. помощью регистратора и подсчитываться за выбранные промежутки времени для получения количества выпавших осадков. Может также использоваться регистрация на разграфленной бумажной ленте.

6.5.2.2 Погрешности и поправки

Поскольку источники погрешностей плювиографа с самоопорожняющимся контейнером несколько отличаются от источников погрешностей других плювиографов, рекомендуются специальные меры предосторожности и коррекции. Некоторые источники погрешностей перечислены ниже:

(a) потери воды из челнока при переворачивании во время сильных осадков могут быть сведены к минимуму, но не устранены;

(b) при обычной конструкции челнока открытая поверхность воды по соотношению к объему довольно велика, поэтому возможны значительные потери из-за испарения, особенно в регионах с жарким климатом. Эта погрешность будет наиболее значительной во время слабого дождя;

(c) прерывистый характер записи может не дать удовлетворительных данных во время слабой мороси или очень слабого дождя. В частности, невозможно точно определить время начала и конца выпадения осадков;

(d) вода может прилипнуть к стенкам и к краю челнока, и в результате дополнительная масса укоротит время переворачивания. Испытания с вощеными челноками привели к сокращению на 4 % объемов, необходимых для переворачивания, по сравнению с невощеными челноками. Объемная калибровка может измениться без поворота калибровочных винтов ввиду изменения смачивания челнока под влиянием окисления поверхности или загрязнения примесями и изменения поверхностного натяжения;

(e) поток воды, падающей из воронки в челнок, может вызвать изменение показаний в сторону увеличения в зависимости от размеров, формы и положения горловины;

(f) прибор особенно подвержен погрешностям в связи с трением в подшипниках и нарушением равновесия челноков, обусловленным негоризонтальным положением прибора.

Тщательная калибровка может обеспечить коррекцию систематических частей этих погрешностей. Результаты измерений с помощью плювиографов с самоопорожняющимся контейнером могут быть скорректированы с учетом влияния их местоположения, также, как и для других типов осадкомеров.

В холодное время года, особенно при измерении количества твердых осадков, могут использоваться обогревательные устройства. Однако характеристики плювиографов с самоопорожняющимися контейнерами оказались очень плохими в результате крупных погрешностей, вызываемых как ветром, так и испарением растапливаемого снега, и поэтому эти типы приборов не рекомендованы к использованию для измерений количества осадков зимой в регионах, где температура ниже 0 °C наблюдается продолжительный период времени.

6.5.2.3 Калибровка и техническое обслуживание

Калибровка плювиографа с самоопорожняющимся контейнером обычно выполняется путем

пропускания через механизм опрокидывания известного количества воды с различной скоростью и регулирования механизма с учетом известного объема. Эта процедура должна проводиться в лабораторных условиях. Процедура калибровки, рекомендованная для таких плювиографов, описана в приложении 6.C.

Ввиду большого числа источников ошибок, характеристики сбора и калибровка плювиографов с самоопорожняющимися контейнерами представляют собой результат сложного взаимодействия многих параметров. Ежедневные сравнения с эталонным осадкомером могут дать полезные поправочные коэффициенты и являются хорошей практикой. Поправочные коэффициенты могут изменяться от станции к станции. В целом поправочные коэффициенты превышают 1,0 (заниженные показания) при малой интенсивности выпадения осадков и составляют менее 1,0 (завышенные показания) при большой интенсивности. Зависимость между поправочным коэффициентом и интенсивностью является нелинейной и имеет форму кривой.

Регулярное техническое обслуживание должно включать чистку воронки и челноков от накопившейся грязи и наносов, а также обеспечение горизонтального положения прибора. Весьма рекомендуется ежегодная замена механизма опрокидывания заново откалиброванным устройством. Необходимо проверять периоды времени, в которые производилась запись, и даты.

6.5.3 Поплавковый плювиограф

В этом приборе жидкие осадки попадают в поплавковую камеру, в которой находится легкий поплавок. Когда уровень воды в камере повышается, вертикальное перемещение поплавка при помощи специального механизма приводит в работу перо, которое начинает двигаться по разграфленной бумажной ленте, или цифровой устройство. Можно использовать любой масштаб записи, если соответствующим образом отрегулировать размеры приемного отверстия коллектора, поплавка и поплавковой камеры.

Чтобы произвести запись за какой-либо выбранный период времени (обычно за 24 ч), необходимо иметь или очень большую поплавковую камеру (в этом случае получают сжатый масштаб записи на ленте или на другом носителе записи), или механизм для быстрого автоматического слива жидкости из поплавковой камеры, как только она наполнится, для того чтобы перо или другой индикатор вернулись к началу отсчета. Для слива осадков обычно используется приспособление сифонного типа. Процесс слива воды следует начинать при точно установленном уровне так, чтобы вода не переливалась через край ни в начале, ни в конце процесса, который не должен занимать больше 15 секунд. В некоторых приборах поплавковая камера устанавливается на рычаге весов с помощью опорных призм для того, чтобы наполненная камера перевешивала; подъем воды облегчает процесс слива, и после того как камера опорожняется, она возвращается в первоначальное положение. Некоторые плювиографы имеют механизм принудительного слива, который позволяет производить его менее чем за 5 секунд. В плювиографе с принудительным сливом есть небольшая камера, отделенная от основной, в которой собираются жидкие осадки, выпадающие в момент слива. Вода из этой камеры поступает в основную камеру, когда прекращается слив, что гарантирует правильность записи общего количества жидких осадков.

Во избежание замерзания воды в поплавковой камере в зимний период в плювиографе должен устанавливаться обогревательный прибор (желательно, чтобы он регулировался термостатом). Это предотвратит порчу поплавка и поплавковой камеры и даст возможность регистрировать количество жидких осадков в зимний период. При наличии сети электропитания достаточно небольшого нагревательного элемента или маломощной электрической лампочки; в противном случае можно использовать другие источники питания. В этих целях удобно использовать короткую спираль, которая наматывается на коллектор и подсоединяется к батарее большой мощности. Количество подаваемого тепла не должно превышать минимума, необходимого только для того, чтобы предотвратить замерзание, так как подача излишнего тепла может понизить точность наблюдений, приводя к вертикальному перемещению воздуха над прибором и увеличению потерь за счет испарения.

В некоторых странах сообщается о существенном занижении показаний незащищенных обогреваемых плювиографов, обусловленном влиянием ветра и испарением растопленного снега, как это наблюдается и для весовых плювиографов (см. раздел 6.5.1.2).

За исключением того, что калибровка выполняется с использованием известного объема воды, техническое обслуживание этого прибора аналогично обслуживанию весового плювиографа (см. раздел 6.5.1.3).

6.6 ИЗМЕРЕНИЕ РОСЫ, ОТЛОЖЕНИЯ ЛЬДА И ОСАДКОВ В ВИДЕ ТУМАНА

6.6.1 Измерение росы и увлажненности листа

Выпадение росы – это явление, характерное в основном для ночного времени. Несмотря на то, что

количество выпадающей росы относительно невелико и зависит от местности, это явление имеет немаловажное значение в аридных зонах. В очень засушливых районах оно может быть приравнено к дождю. Подверженность листьев деревьев влиянию жидкой влаги в результате выпадения росы, тумана и осадков также играет важную роль в заболеваемости растений, деятельности насекомых-вредителей, а также для уборки и хранения урожая.

Для того чтобы оценить роль росы в гидрологии, необходимо различать источники ее образования:

(a) нисходящий перенос атмосферной влаги, конденсирующейся на охлажденных поверхностях, – выпадение росы;
(b) испарение из почвы и растений влаги, конденсирующейся на охлажденных поверхностях, известной как дистиллированная роса;
(c) выделение воды листьями, известное как гуттация.

Вообще говоря, количество осаждающейся росы складывается из этих трех источников, хотя только первый создает дополнительное увлажнение земной поверхности, а последний обычно сказывается на остаточных потерях. Другим источником влаги являются туман или облачные капельки, которые собираются на листьях и ветвях и падают на землю в виде капель или стекают непрерывной струей.

Количество росы, осевшей на данной поверхности за определенный период, обычно выражается в кг/м^2 или в миллиметрах слоя росы. По мере возможности, значения этих величин должны определяться с точностью до одной десятой миллиметра.

Увлажненность листа можно описать как легкую, умеренную или сильную, но ее наиболее важными характеристиками являются время наступления и продолжительность.

Обзор приборов, предназначенных для измерения росы и продолжительности периода увлажненности листа, а также библиография по этому вопросу приведены в публикации WMO (1992*b*).

Рассмотрим следующие методы измерения увлажненности листа.

Количество росы критическим образом зависит от свойств и параметров поверхности, таких как радиационные свойства, размеры и расположение (горизонтальное или вертикальное). Для измерений используются определенным образом расположенные пластина или поверхность, естественные или искусственные, с известными или стандартизованными качествами, и количество росы оценивается посредством ее взвешивания, визуального наблюдения или использования некоторых ее свойств, например электрической проводимости. Проблема состоит в выборе поверхности, поскольку полученные результаты инструментальных измерений не всегда четко отражают осаждение росы на окружающих предметах. Следовательно, необходимо установить эмпирические соотношения между результатами инструментальных измерений и реальным осаждением росы на естественную поверхность для каждой отдельной совокупности условий, отражающих состояние поверхности и ее подверженность внешним воздействиям, с учетом того, в результате какого процесса образовалась роса, если это важно для конкретного применения.

Был разработан ряд приборов для прямого определения выпадения росы, ее количества, продолжительности периода увлажненности листа и наличия росы. В устройствах, регистрирующих продолжительность периода наличия росы, используются либо элементы, которые сами изменяются под воздействием росы таким образом, что становятся индикаторами влажности или регистраторами продолжительности влажного периода, либо электрические датчики, которые реагируют на изменение электропроводности естественных или искусственных листьев под воздействием влаги, будь то дождь, снег, туман с моросью или роса. В приборах, основанных на принципе взвешивания, количество влаги, осаждающееся в виде осадков или росы, взвешивается или регистрируется. Большинство приборов, обеспечивающих непрерывную регистрацию в виде кривой, позволяют определить источник выпавшей влаги – туман, росу или дождь. Единственный известный метод измерения суммарного количества росы основан на использовании чувствительного лизиметра (см. главу 10 части I).

В публикации WMO (1992*b*) два электронных прибора для измерения увлажненности листа рекомендуются разрабатывать в качестве эталонных приборов, а также предлагаются различные модели увлажнения листа. Одни модели основаны на принципе энергетического баланса (обратная модель испарения), другие используют корреляцию. Многие из них требуют микрометеорологических измерений. К сожалению, не существует признанного стандартного метода измерения, позволяющего произвести их проверку.

6.6.2 Измерение отложения льда

Лед может отлагаться на поверхностях в результате нескольких явлений. Отложение льда в результате замерзания осадков, часто называемое гололедом, является наиболее опасным типом обледенения и

может вызвать обширные повреждения деревьев, кустарников, телефонных линий и линий электропередачи. Опасные условия создаются на дорогах и взлетно-посадочных полосах. Изморозь образуется в тех случаях, когда воздух с точкой росы ниже точки замерзания доводится до насыщения путем охлаждения. Изморозь кристаллическая представляет собой отложение сцепленных между собой ледяных кристаллов, образующихся при непосредственной сублимации водяного пара, находящегося в воздухе, на предметах обычно небольшого диаметра, таких как ветви деревьев, стебли растений, края листьев, провода, столбы и т. д. Изморозь зернистая представляет собой гранулированные отложения льда белого или молочного цвета, образующиеся при быстром замерзании переохлажденных капель воды при их соприкосновении с открытыми предметами.

6.6.2.1 Методы измерений

На метеорологических станциях наблюдение за отложением льда, как правило, носит скорее качественный, чем количественный характер, главным образом ввиду отсутствия соответствующего датчика. Указатели нарастания льда обычно изготавливаются из анодированного алюминия и используются для наблюдения и сообщения о возникновении замерзающих осадков и гололедо-изморозевых отложений.

Наблюдения за отложением льда могут включать как измерения размеров и массы отложения льда, так и описание его внешних свойств. Эти наблюдения особенно важны в горных районах, где величина таких отложений с наветренной стороны гор может превышать нормальное количество осадков. Для наблюдений за отложением льда может быть использовано приспособление, состоящее из стержней и стоек, на которых устанавливаются две пары параллельно расположенных проводов; одна пара располагается в направлении север – юг, другая – в направлении восток – запад. Провода можно подвесить на любом уровне, причем верхний провод каждой пары рекомендуется делать съемным. Во время проведения наблюдений оба верхних провода снимают, помещают в ванночку и вносят в теплое помещение для оттаивания и последующего взвешивания растаявшей пробы. Поперечное сечение отложения измеряется на постоянно закрепленных нижних проводах.

В некоторых странах для постоянной регистрации ледовых отложений используются записывающие устройства. В качестве датчика применяются вертикальный или горизонтальный стержень, кольцо или пластина. Увеличение количества ледовых отложений за какой-то период времени записывается на ленте. Для определения появления и продолжительности существования гололедо-изморозевых отложений применяется простой прибор, называемый ледоскопом. Ледоскоп состоит из круглого фанерного диска диаметром 30 см, который можно поднимать и опускать, устанавливая на любой высоте на вертикальной оси, вкопанной в землю. Обычно диск устанавливается на одном уровне с поверхностью снега для сбора изморози и инея. Изморозь также собирают на кольце, закрепленном на стержне. Диаметр кольца составляет 20 см. Кольцо удалено на 20 см от верхнего конца стержня. Проволока или нить диаметром 0,2 – 0,3 мм, натянутая между кольцом и верхним концом стержня, используется для наблюдения изморозевых отложений. По мере необходимости каждый датчик может быть снят и взвешен.

6.6.2.2 Лед на дорожном покрытии

Разработаны и используются датчики для обнаружения и описания льда на дорогах и взлетно-посадочных полосах; они используются также для обоснования выпуска штормовых предупреждений и технического обслуживания.

Сочетание различных измерений позволяет обнаружить сухой и влажный снег и различные формы льда. Один датчик, в котором используются два электрода, утопленные заподлицо в дорожное покрытие, измеряет электрическую проводимость поверхности и позволяет легко различить сухую и влажную поверхности. Второй датчик измеряет поляризацию ионов, определяемую способностью поверхности удерживать электрический заряд; небольшой заряд пропускается между парой электродов в течение короткого времени, и те же самые электроды измеряют остаточный заряд, величина которого возрастает при наличии на поверхности электролита со свободными ионами, такого как подсоленная вода. Поляризация и проводимость, измеренные одновременно, позволяют различать сухую, влажную и мокрую поверхности, изморозь, снег, белый лед и некоторые химические вещества, использующиеся против обледенения. Однако в связи с тем, что по поляризация некристаллизованный черный лед отличить от воды в некоторых условиях практически невозможно, определить наличие опасного черного льда с помощью этих двух датчиков до сих пор не представляется возможным. Эта проблема решена, по крайней мере, в одной системе путем добавления третьего специализированного измерения электрической емкости, которое позволяет обнаруживать уникальную структуру черного льда.

Вышеуказанный метод является пассивным. Существует и активный метод измерений *in-situ* с использованием либо нагревательного элемента,

либо нагревательного и охлаждающего элементов для растапливания или замораживания любого льда или жидкости, присутствующих на поверхности. Одновременные измерения температуры и тепловой энергии, участвующих в цикле таяние – замораживание, используются для определения наличия льда и для оценки точки замерзания смеси на поверхности.

Большинство систем измерения *in-situ* включает термометр для измерения температуры поверхности дороги. Качество измерения критическим образом зависит от установки (особенно от материалов) и размещения приборов, и следует принимать меры во избежание ошибок, связанных с солнечной радиацией.

В стадии разработки находятся два метода дистанционного измерения, при использовании которых возможна установка датчиков на автомобиле. Один основан на отражении инфракрасного и микроволнового излучения на некоторых частотах (около 3000 нм и 3 ГГц соответственно). С помощью микроволнового отражения можно определить толщину слоя воды (и, следовательно, риск потери сцепления с дорогой), но не условия обледенения. Чтобы распознать, в каком состоянии дорога – сухая, влажная, или покрыта льдом – могут использоваться две частоты инфракрасного диапазона. Продемонстрирована также зависимость величины отраженного сигнала на длине волны около 2000 нм от толщины слоя льда.

Во втором методе применяется методика распознавания характеристик по отражению лазерного излучения от дорожного покрытия с целью проведения различия между сухой и влажной поверхностью и черным льдом.

6.6.3 Измерение осадков в виде тумана

Туман состоит из мельчайших капелек воды, взвешенных в атмосфере и формирующих облако у поверхности Земли. Диаметр капель тумана составляет примерно от 1 до 40 мкм и скорость падения от менее, чем 1 см/с до приблизительно 5 см/с. На самом деле скорость падения капель тумана настолько мала, что даже при слабом ветре капли перемещаются почти горизонтально. При наличии тумана горизонтальная видимость обычно составляет менее 5 км, и он редко наблюдается, когда температура и точка росы различаются более чем на 2 °C.

Метеорологи, как правило, рассматривают туман как источник ухудшения видимости, а не как форму осадков. Однако, в возвышенных районах, покрытых лесом, часто наблюдается туман в результате адвекции облаков над поверхностью гор. С гидрологической точки зрения в этих случаях рассмотрение осадков без учета тумана может привести к значительной недооценке воды, пополняющей водосбор (Stadtmuller and Agudelo, 1990). Позднее признание тумана в качестве источника водоснабжения в районах плоскогорий (Schemenauer and Cereceda, 1994*a*) и канала влажных выпадений (Schemenauer and Cereceda, 1991; Vong, Sigmon and Mueller, 1991) привело к необходимости стандартизации методов и единиц измерения. Рассмотрим несколько методов измерения осадков в виде тумана.

Несмотря на то, что за прошедшее столетие проводилось большое число измерений сбора тумана деревьями и различными типами коллекторов, сравнить величины такого сбора в количественном отношении трудно. Наиболее широко используемый прибор для измерения тумана представляет собой вертикально расположенный цилиндр из проволочной сетки, центр которого укреплен поверх осадкомера таким образом, что он полностью открыт для свободного потока воздуха. Диаметр цилиндра составляет 10 см, высота – 22 см, а размеры ячеек сетки – 0,2 x 0,2 см (Grunow, 1960). Капли из воздуха, насыщенного влагой, осаждаются на сетке и падают вниз, в коллектор осадкомера, где они измеряются или регистрируются таким же образом, как осадки. Некоторые трудности, связанные с этим прибором, заключаются в его малых размерах, отсутствии репрезентативности по отношению к растительному покрову, удержании воды в небольших ячейках сетки и возможности попадания осадков непосредственно в осадкомер, что вносит путаницу в измерение выпадения тумана. Кроме того, расчет количества осадков в виде тумана путем простого вычитания количества дождевых осадков, накопленного в обычном осадкомере (Grunow, 1963), из количества влаги, накопленной в коллекторе тумана, приводит к ошибочным результатам всякий раз, когда наблюдается ветер.

В работе Schemenauer and Cereceda (1994*b*) предложены недорогой стандартный коллектор тумана площадью 1 м^2 и стандартная единица измерения для количественного определения выпадения тумана, имеющего важное значение в возвышенных районах, покрытых лесом, и для измерения потенциальных объемов сбора в лишенных растительности или пустынных горных районах. Коллектор состоит из плоской панели, изготовленной из ячеек прочного полипропилена, и установлен так, что его основание находится на высоте 2 м над землей. Коллектор соединен с плювиографом с самоопорожняющимся контейнером для определения скорости осаждения. Измерения скорости ветра, проводимые одновременно с измерениями тумана, позволяют получить достоверные оценки соотношения тумана и дождя, выпадающих на вертикальную ячеистую

панель. Этот коллектор собирает литры воды. Поскольку площадь его поверхности составляет 1 м^2, то единицей измерения является 1 л/м^2.

6.7 ИЗМЕРЕНИЕ ВЫСОТЫ ВЫПАВШЕГО СНЕГА И СНЕЖНОГО ПОКРОВА

Авторитетные материалы по этой теме содержатся в публикациях WMO (1994) и WMO (1992*a*), в которых описаны гидрологические аспекты, включая процедуры снегомерной съемки на снегомерных маршрутах. Ниже приводится краткое описание некоторых простых и хорошо известных методов, а также краткий обзор измерительных приборов.

Под высотой свежевыпавшего снега подразумевается количество снега, осевшего на подстилающую поверхность за определенный период времени (обычно за 24 часа). Таким образом, это понятие не включает в себя осаждение снега при низовых метелях и поземках. Для целей измерения высоты снега термин снег должен также включать ледяную крупу, гололед, град и пластинки льда, сформировавшиеся прямо или косвенно в результате выпадения осадков. Под высотой снежного покрова обычно подразумевается общая высота снега на земле во время наблюдения.

Водный эквивалент снежного покрова – это толщина слоя воды, которая образуется при таянии данного снежного покрова.

6.7.1 Измерение высоты выпавшего снега

Прямые измерения высоты свежевыпавшего снега на открытом участке выполняются при помощи градуированной рейки или масштабной линейки. Для получения репрезентативного среднего значения рекомендуется произвести достаточное число вертикальных замеров в местах, где нет заносов. Там, где происходит интенсивный нанос снега ветром, для получения репрезентативного значения высоты снежного покрова нужно произвести больше измерений. Для того чтобы исключить из измерения ранее выпавший снег, необходимы специальные меры предосторожности. Можно расчистить подходящий небольшой участок перед снегопадом или покрыть поверхность старого снега куском какого-либо подходящего материала (например, деревянной доской с шероховатой поверхностью, окрашенной белой краской) и измерить высоту снега, собравшегося на нем. Измерения на наклонной поверхности (чего, по возможности, следует избегать) рекомендуется производить, установив рейку вертикально. При наличии слоя старого снега было бы неправильно вычислять высоту свежевыпавшего снега как разность между результатами двух последовательных измерений общей высоты снега, так как снежный покров постоянно уплотняется и претерпевает абляцию (таяние и испарение).

6.7.2 Прямые измерения высоты снежного покрова

Измерения высоты снежного покрова или снега, накопившегося на земле, проводятся с помощью линейки или аналогичной градуированной рейки, которые опускаются в снег до поверхности земли. С помощью этого метода бывает трудно получить репрезентативные данные на открытой местности, поскольку снежный покров выдувается и перераспределяется под воздействием ветра и может включать в себя слои льда, которые не позволяют линейке проникнуть сквозь снег до поверхности земли. Следует позаботиться о том, чтобы измерялась общая высота, включая высоту любого присутствующего слоя льда. На каждой наблюдательной станции производится несколько измерений, результаты которых затем осредняются.

Несколько снегомерных реек с нанесенными на них кольцами различного цвета или с другой подходящей шкалой обеспечивают удобное средство измерения общей высоты снега на земле, особенно в удаленных районах. Высота снега по рейке или маркеру может наблюдаться с удаленной точки на земле или с самолета с помощью бинокля или телескопа. Снегомерные рейки должны окрашиваться в белый цвет для сведения к минимуму нежелательного таяния снега в непосредственной близости от них. Маркеры для измерения высоты снежного покрова по площади представляют собой вертикальные столбы (различной высоты в зависимости от максимальной высоты снежного покрова) с горизонтальными поперечинами, установленными на фиксированных высотах и ориентированными в зависимости от точки наблюдения.

Разработка недорогого ультразвукового прибора для обеспечения надежных измерений высоты снежного покрова на автоматических станциях обеспечивает действенную альтернативу стандартным наблюдениям, как высоты снежного покрова, так и высоты свежевыпавшего снега (Goodison and others, 1988). Этот прибор может использоваться для контроля качества измерений с помощью автоматических регистрирующих осадкомеров, предоставляя дополнительные сведения о типе, количестве и времени

выпадения осадков. Он позволяет достичь точности измерений, равной ±2,5 см.

Формула для внесения поправки на температуру в измерения высоты снежного покрова с помощью ультразвуковых приборов:

$$d = d_r \sqrt{\frac{T}{273.15}} \qquad (6.2)$$

где d = высота снежного покрова в см, d_r = исходное значение высоты снежного покрова в см, T = температура воздуха в К, $T = 273.15 + t$, t = температура воздуха в °С.

6.7.3 Прямые измерения водного эквивалента свежевыпавшего снега

Стандартный метод измерения водного эквивалента состоит в гравиметрическом измерении пробы, полученной с помощью снегомерного цилиндра. Этот метод служит в качестве основы для снегомерных съемок – общей процедуры во многих странах для получения меры водного эквивалента. Метод состоит либо в растапливании каждого образца и измерении содержащейся в нем жидкости, либо во взвешивании замерзшего образца. Для растапливания образца может использоваться измеренное количество теплой воды или источник подогрева.

При помощи снегомера можно брать цилиндрические пробы свежевыпавшего снега, а затем взвешивать и растапливать их. Имеющиеся на сегодняшний день приборы и методы взятия проб более подробно описываются в публикации WMO (1994). Часто для этого метода может использоваться приемник осадков стандартного осадкомера.

С помощью снегомеров проводятся прямые измерения водного эквивалента свежевыпавшего снега. В сущности для измерения водного эквивалента твердых осадков может также использоваться любой нерегистрирующий осадкомер. Снег, собранный такого типа приборами, должен либо взвешиваться, либо растапливаться непосредственно после каждого наблюдения, как описано в разделе 6.3.1.2. Весовой плювиограф собирает твердые осадки и регистрирует их водный эквивалент так же, как и в случае жидких осадков (см. раздел 6.5.1).

Водный эквивалент твердых осадков можно также оценить, используя высоту свежевыпавшего снега. Это измерение преобразуется в водный эквивалент с использованием соответствующей удельной плотности. Хотя соотношение, устанавливающее, что один сантиметр свежевыпавшего снега равен одному миллиметру водного эквивалента, можно с осторожностью использовать для величин, осредненных за длительный период, оно может оказаться весьма ошибочным для отдельно взятого измерения, поскольку удельная плотность снега может изменяться в пределах от 0,03 до 0,4.

6.7.4 Снеговые подушки

Снеговые подушки различных размеров и из различных материалов используются для измерения массы снега, который скапливается на них. Наиболее часто используемые подушки представляют собой плоские круглые контейнеры (диаметром 3,7 м), изготовленные из прорезиненного материала и наполненные незамерзающей жидкостью (смесь метилового спирта с водой или раствор метанолгликоля в воде). Такая подушка устанавливается на поверхности земли вровень с поверхностью или покрывается тонким слоем земли или песка. В целях предотвращения повреждений прибора и для сохранения снежного покрова в первоначальном состоянии рекомендуется применять ограждения. В нормальных условиях снеговые подушки могут служить десять лет и более.

Масса снега на подушке определяется по величине гидростатического давления внутри подушки. Измерения гидростатического давления, производимые с помощью поплавкового самописца уровня жидкости или датчика давления, дают возможность непрерывно определять водный эквивалент снежного покрова. Вариации точности измерений могут объясняться влиянием температурных изменений. При невысоком снежном покрове изменения дневной температуры могут привести к расширению или сжатию жидкости в подушке, являясь причиной ложных показаний снегопада или снеготаяния. В толще снежного покрова в горных районах колебания дневной температуры не имеют большого значения, за исключением начала и конца снежного сезона. Влияние температуры можно уменьшить, если заключить проводящую трубку и измерительное устройство в терморегулируемое укрытие или поместить в землю.

Для обеспечения непрерывности измерений водного эквивалента с помощью самописцев и цифровых регистраторов могут быть установлены системы сбора данных *in situ* и/или телеметрические системы.

Измерения при помощи снеговых подушек отличаются от измерений, проведенных при помощи стандартных снегомеров, особенно в период снеготаяния. Эти измерения наиболее точны, когда снежный покров не содержит ледяных слоев, которые могут создать «мост» над подушками.

Сравнения значений водного эквивалента, полученных с помощью снеговой подушки и стандартным методом взвешивания, выявили расхождение в 5 – 10 %.

6.7.5 Радиоизотопные снегомеры

Радиоизотопные снегомеры позволяют измерять общий водный эквивалент снежного покрова и/или выдают профиль плотности. На их использовании основан неразрушающий метод взятия проб; они совместимы с системами регистрации данных *in situ* и/или телеметрическими системами. В основе почти всех систем лежит принцип ослабления излучения водой, снегом или льдом. Также как и в случае прочих методов измерений в точке, критически важное значение для интерпретации и применения результатов таких измерений в качестве средних по площади показателей имеет размещение прибора в репрезентативном месте.

Приборы, используемые для измерения общего содержания воды, состоят из детектора излучения и источника излучения либо естественного, либо искусственного. Одна часть прибора (детектор или источник) располагается у основания снежного покрова, а другая – на высоте, превышающей максимальную ожидаемую высоту снега. По мере накопления снега принимаемое детектором излучение уменьшается пропорционально водному эквиваленту толщи снега. Системы с применением искусственного источника излучения используются на фиксированных точках для получения измерений только для этой точки. Системы, основанные на использовании урана естественного происхождения в качестве кольцевого источника вокруг однополюсного детектора, успешно применяются для измерения толщи снега с водным эквивалентом до 500 мм или высотой до 150 см.

Профилирующие радиоактивные снегомеры в фиксированных точках обеспечивают данные об общем водном эквиваленте снега и его плотности и позволяют провести точное изучение происходящих во времени перемещений воды и изменений плотности в толще снега (Armstrong, 1976). Профилирующий прибор состоит из двух параллельных вертикальных трубок с открытым доступом, расположенных на расстоянии 66 см одна от другой. Трубки закреплены в цементном основании в земле, и высота их превышает максимальную ожидаемую высоту снега. В одной из трубок подвешен источник гамма-излучения, в другой – сцинтилляционный детектор гамма-излучения, соединенный с фотоэлектронным умножителем. Для проведения измерений источник и детектор устанавливаются на одинаковой высоте в снежном покрове. Профили вертикальной плотности снежного покрова получаются путем проведения измерений с приращениями около 2 см по высоте. Практической альтернативой выкапыванию глубоких снежных ям является портативный прибор (Young, 1976), который измеряет плотность снежного покрова методом обратного рассеяния, а не передачи гамма-излучения. При этом портативность прибора позволяет производить оценки изменений плотности и водного эквивалента по площади.

6.7.6 Естественное гамма излучение

Метод снегосъемки с использованием гамма-излучения базируется на ослаблении снегом гамма-излучения природных радиоактивных элементов, находящихся в поверхностном слое почвы. Чем больше водный эквивалент снега, тем сильнее ослабляется излучение. Наземные гамма-съемки могут состоять из точечных измерений в удаленных районах, серии точечных измерений или выборочных траверсов по данному району (Loijens, 1975). Этот метод может также применяться для аэросъемки. Оборудование включает в себя портативный гамма-лучевой спектрометр, в котором используется небольшой сцинтилляционный кристалл для измерения излучения в широком спектре и в трех спектральных окнах (т. е. излучения калия, урана и тория). При использовании этого метода необходимо проводить измерения уровня гамма-излучения в точке или вдоль траверса до установления снежного покрова. Для получения абсолютных оценок водного эквивалента снега следует скорректировать показания с учетом изменений влажности почвы в верхнем слое толщиной 10 – 20 см, а также изменений фоновой радиации, обусловленных космическим излучением, дрейфом прибора и вымыванием осадками газа радона (который является источником гамма-излучения) с последующим увеличением его содержания в почве и снеге. Для определения соотношения между показаниями спектрометра и водным эквивалентом требуется сначала провести дополнительные измерения водного эквивалента снега. Чаще всего в качестве эталонного прибора применяется снегомерный цилиндр.

Метод, основанный на естественном гамма-излучении, может использоваться для слоя снега, водный эквивалент которого составляет до 300 мм; при соответствующих поправках его точность равна ±20 мм. Преимуществом этого метода по сравнению с методом, основанным на использовании источников искусственного излучения, является отсутствие риска облучения.

ПРИЛОЖЕНИЕ 6.A

СТАНЦИИ ДЛЯ ВЗАИМНЫХ СРАВНЕНИЙ ИЗМЕРЕНИЙ ОСАДКОВ

Комиссия по приборам и методам наблюдений на одиннадцатой сессии, состоявшейся в 1994 г., сделала следующее заявление относительно станций для взаимных сравнений измерений осадков:

Комиссия подтвердила преимущества существования национальных станций или центров, в которых могут быть оценены на современной основе прошлые, современные и будущие приборы и методы наблюдений за осадками. Эти станции должны:

(a) эксплуатировать рекомендованные ВМО конфигурации измерительных устройств для жидких осадков (наземный осадкомер) и снега (предназначенный для взаимных сравнений эталон с двойной заборной защитой (DFIR)). Установка и эксплуатация будут производиться в соответствии со спецификациями, полученными по результатам взаимных сравнений измерений осадков, проводимых по линии ВМО. Установка DFIR не требуется, когда ведутся наблюдения только за жидкими осадками;

(b) эксплуатировать оперативные осадкомеры, использовавшиеся в прошлом, существующих и новых типов или применять другие методы наблюдений в соответствии со стандартными оперативными процедурами и оценивать точность и технические характеристики в сравнении с рекомендованными эталонными приборами ВМО;

(c) проводить вспомогательные метеорологические измерения, которые дают возможность разработки и проверки применения процедур коррекции осадков;

(d) обеспечивать контроль качества данных, помещать в архив в простом приемлемом формате, предпочтительно цифровом, все данные взаимных сравнений измерений осадков, включая связанные с ними данные метеорологических наблюдений и метаданные

(e) функционировать непрерывно как минимум 10 лет

(f) производить проверку всех имеющихся процедур коррекции осадков (в особенности тех, которые описаны в окончательных отчетах о взаимных сравнениях, проводимых по линии ВМО) для измерений жидких и твердых осадков;

(g) содействовать проведению научных исследований в области измерения осадков. Не ожидается, что центры будут осуществлять калибровку или проверку приборов. Они должны готовить рекомендации о национальных стандартах наблюдений и оценивать влияние изменений методов наблюдений на однородность временных рядов данных по осадкам в регионе. На месте проведения наблюдений должно быть обеспечено наличие эталонного стандарта для калибровки и валидации наблюдений осадков, проводимых с помощью радиолокаторов или дистанционного зондирования.

ПРИЛОЖЕНИЕ 6.B

ПРЕДЛАГАЕМЫЕ ПРОЦЕДУРЫ КОРРЕКЦИИ ИЗМЕРЕНИЙ ОСАДКОВ

Комиссия по приборам и методам наблюдений на одиннадцатой сессии, состоявшейся в 1994 г., сделала следующее заявление относительно процедур коррекции, применяемых при измерении осадков:

Методы коррекции основаны на упрощенных физических концепциях, представленных ранее в публикации Instruments Development Inquiry (Instruments and Observing Methods Report No. 24, WMO/TD-No. 231). (Справочник по разработке приборов, Отчет по приборам и методам наблюдений № 24, ВМО/ТД № 231). Они зависят от типа применяемого осадкомера. Влияние ветра на осадкомер конкретного типа было оценено с использованием сравнительных измерений, проведенных с помощью эталонных осадкомеров ВМО – наземного осадкомера для дождя и предназначенного для взаимных сравнений эталонного осадкомера с двойной заборной защитой (DFIR) для снега, описанных в публикации International Comparison of National Precipitation Gauges with a Reference Pit Gauge (Instruments and Observing Methods Report No. 17, WMO/TD-No. 38) (Международные сравнения национальных осадкомеров с эталонным наземным осадкомером, Отчет по приборам и методам наблюдений № 17, ВМО/ ТД № 38), и по предварительным результатам взаимных сравнений измерений твердых осадков, проводившихся по линии ВМО. Приведение скорости ветра к уровню приемного отверстия осадкомера следует осуществлять по следующей формуле:

$$u_{hp} = (\log hz_0^{-1}) \cdot (\log Hz_0^{-1})^{-1} \cdot (1 - 0{,}024\alpha)\, u_H$$

где u_{hp} – скорость ветра на уровне приемного отверстия осадкомера; h – высота приемного устройства осадкомера над поверхностью земли; z_0 – параметр шероховатости (0,01 м для зимы и 0,03 м для лета); H – высота установки прибора для измерения скорости ветра над поверхностью земли; u_H – скорость ветра, измеренная на высоте H над поверхностью земли; α – средняя угловая высота препятствий вокруг осадкомера.

Последний параметр зависит от степени защищенности места расположения осадкомера и может быть получен либо по среднему значению прямых измерений угловой высоты препятствий (в градусах круга) в одном из восьми направлений розы ветров вокруг осадкомера, либо на основе классификации степени защищенности с использованием метаданных, которые хранятся в архивах метеорологических служб. Имеются следующие классы:

Класс	*Угол*	*Описание*
Открытое место наблюдений	0 – 5	Несколько малых препятствий, таких как кусты, группы деревьев, отдельный дом
Полузащищенное место наблюдений	6 – 12	Небольшие группы деревьев или кустов, либо один-два дома
В основном защищенное место наблюдений	13 – 19	Парки, лесные опушки, центры деревень, фермы, группы домов, дворы
Защищенное место наблюдений	20 – 26	Молодой лес, небольшая лесная поляна, парк с большими деревьями, центры городов, глубокие закрытые долины, сильно пересеченная местность подветренные склоны больших холмов

Потери на смачивание происходят при увлажнении внутренних стенок осадкомера. Они зависят от формы и материала осадкомера, а также от типа и частоты выпадения осадков. Например, для осадкомера Хелмана они составляют в среднем 0,3 мм в сутки при дожде или 0,15 мм в сутки при выпадении снега; соответствующие значения для осадкомера Третьякова составляют 0,2 и 0,1 мм. Информацию по поводу потерь на смачивание для других типов осадкомеров можно найти в публикации *Methods of Correction for Systematic Error in Point Precipitation Measurement for Operational Use* (WMO-No. 589). (Методы коррекции систематических ошибок при измерениях осадков в точке для оперативного использования, ВМО № 589).

ПРИЛОЖЕНИЕ 6.C

СТАНДАРТИЗИРОВАННАЯ ПРОЦЕДУРА ДЛЯ ЛАБОРАТОРНОЙ КАЛИБРОВКИ ПРИБОРОВ НАКОПИТЕЛЬНОГО ТИПА, ИЗМЕРЯЮЩИХ ИНТЕНСИВНОСТЬ ДОЖДЯ

1. Принципы

Лаборатория калибровки должна быть хорошо подготовлена для проведения калибровки приборов, которые используются для оперативной практики (для получения более подробной информации см. Руководство ВМО по метеорологическим приборам и методам наблюдений (ВМО-№ 8)). Помимо наличия правильно разработанной эталонной системы, перед началом каждой калибровки процедуры калибровки должны быть документально оформлены со всеми подробностями и отрегулированы, а персонал должен быть хорошо подготовлен (подробную информацию см. в ИСО 17025). После каждой калибровки должно быть оформлено свидетельство о проведении калибровки с описанием результатов (включая описание применявшихся корректировок), позволяющее провести проверку на соответствие соответствующим рекомендациям ВМО.

В свидетельстве также должна быть указана неопределенность измерения для интенсивности дождя (ИД). В свидетельстве должны быть документально оформлены результаты сопоставимости с эталонной системой измерения ИД, условия окружающей среды (такие как температура) и указан применявшийся метод осреднения по времени.

Калибровку приборов для измерения интенсивности дождя следует производить, используя систему калибровки, которая:

(a) может создавать постоянную интенсивность поступления воды при разных уровнях интенсивности, охватывающих весь оперативный диапазон измерения интенсивности дождя (рекомендованный диапазон: от 0,2 мм/ч до 2000 мм/ч);
(b) может измерять поступление воды посредством взвешивания количества воды, поступившего за данный период времени;
(c) может производить измерение результатов работы откалиброванного прибора, через регулярные промежутки времени и при возникновении сигнального импульса, что характерно для большинства дождемеров с опрокидывающимся приемником.

2. Требования

(a) Система калибровки должна обеспечивать получение неопределенностей менее 1 % для создаваемой ИД, и такую работу системы следует подробно описать;
(b) при использовании дождемеров с опрокидывающимся приемником следует проконтролировать точность и соответствие требованиям установки равновесия приемника, чтобы обеспечить минимальные расхождения в длительности опрокидывания во время процесса измерения;
(c) следует использовать, по крайней мере пять контрольных уровней интенсивности с надлежащими интервалами между ними, чтобы охватить весь рабочий диапазон прибора;
(d) количество контрольных точек эталона для измерения ИД должно быть достаточно большим, чтобы посредством интерполяции по точкам можно было построить кривую. Следует выбрать контрольные точки эталона и расположить их на достаточном расстоянии друг от друга, позволяющем посредством интерполяции построить калибровочную кривую таким образом, чтобы неопределенность кривой, построенной по точкам, была ниже неопределенности, предусмотренной для всего диапазона измерений;
(e) расчет интенсивности поступления воды основывается на измерении массы поступившей воды и времени;
(f) измерение массы должно быть точнее, чем 0,1 %;
(g) каждое испытание должно быть достаточно продолжительным, что при созданной интенсивности обеспечить неопределенность менее 1 %;
(h) максимальное временное разрешение для измерения интенсивности дождя должно составлять 1 секунду;
(i) при осуществлении связанной с калибровкой лабораторной деятельности, рассматривая возможные источники ошибок, следует учесть следующее:
    (i) качество/степень чистоты воды, используемой для калибровки, должно быть строго определенным;
    (ii) воспроизводимость условий калибровки следует выделить в качестве приоритета;
    (iii) следует использовать надлежащее оборудования для контроля и записывания

(управляемое с помощью персонального компьютера);

(iv) все приемные системы должны удовлетворять требованиям электромагнитной совместимости во избежание паразитических импульсов;

(j) обычно при измерении количества осадков говорится о высоте слоя осадков, выраженной в миллиметрах, хотя весовые осадкомеры измеряют массу. Так как интенсивность дождя зависит от температуры окружающей среды, связь между массой и эквивалентной высотой слоя дождя вносит погрешность, которую следует принимать во внимание при калибровке и расчете неопределенности;

(k) условия окружающей среды во время каждой калибровки должны быть отмечены и зарегистрированы:

(i) дата и время (начало/завершение);

(ii) температура воздуха [°C];

(iii) температура воды [°C];

(iv) атмосферное давление [гПа];

(v) относительная влажность окружающей среды [%];

(vi) какие-либо особые условия, касающиеся калибровки (например, вибрация);

(vii) необходимо оценить потери, связанные с испарением [мм];

(l) количество испытаний, проведенных для каждого прибора, их описание в единицах времени и/или количество опрокидываний должно быть документально оформлено.

3. Процедура интерпретации данных

(a) Результаты должны быть представлены в форме графика зависимости между относительной погрешностью и контрольным уровнем интенсивности. Для каждого контрольного уровня интенсивности поступления воды относительная погрешность оценивается как:

$$e = \frac{I_m - I_r}{I_r} \cdot 100\%$$

где I_m – интенсивность, измеренная прибором, и I_r – фактический контрольный уровень интенсивности;

(b) для каждого ряда контрольных уровней интенсивности следует провести в идеальном случае пять испытаний, но минимально три, так чтобы для каждого прибора было получено пять значений погрешности. Среднее значение погрешности и средние значения I_r и I_m рассчитываются посредством отбрасывания минимального и максимального значений *e*, полученных для каждого контрольного уровня интенсивности поступления воды, и последующего определения среднего арифметического трех оставшихся значений погрешности и значений контрольных уровней интенсивности. Для каждого уровня интенсивности следует представить диаграмму погрешностей, включающую все пять значений погрешности, использованные для определения средних значений;

(c) кроме того, можно построить график зависимости между I_r и I_m, где I_m и I_r – средние значения, рассчитанные как изложено выше; все данные согласовываются с кривой интерполяции, полученной в качестве наилучшего приближения (допустимо использование линейного приближения, экспоненциального закона или полинома второго порядка);

(d) на графиках, представляющих результаты, следует установить ± 5 %, которые позволяют легко сравнить результаты с рекомендациями ВМО;

(e) если происходит накопление воды при интенсивности ниже максимального заявленного уровня интенсивности, то следует отметить уровень интенсивности, с которого началось накопление воды, в свидетельстве о проведении калибровки и рассмотреть уровни интенсивности, превышающие этот уровень;

(f) в дополнение к измерениям, основанным на постоянной интенсивности поступления воды, для каждого прибора, не являющегося дождемером с опрокидывающимся приемником, следует измерить отклик на скачок. Отклик на скачок следует измерять посредством перехода от одного уровня постоянной интенсивности поступления к другому и обратно, а именно от 0 мм/ч к контрольному уровню и обратно к 0 мм/ч. Уровень постоянной интенсивности следует использовать до тех пор, пока выходной сигнал прибора не стабилизируется, т. е. когда дальнейшие изменения или колебание в созданном уровне ИД можно не учитывать по отношению к установленной неопределенности измерений с помощью эталонной системы. Частота замеров должна быть не менее одного в минуту для приборов, которые позволяют такую частоту. Время до стабилизации принимается в качестве времени задержки прибора в измерении контрольного уровня интенсивности. Для обеспечения точных измерений ИД время задержки должно составлять менее одной минуты. Время отклика всегда должно быть документально зафиксировано в свидетельстве о проведении калибровки.

4. Расчет неопределенности

Следует учесть и представить в количественной форме следующие источники неопределенности в измерениях:

a) механизм формирования поступления воды: неопределенность в равномерности поступления воды, вызванная возможными изменениями в механизме формирования постоянной интенсивности поступления воды, включая разницу в давлении внутри емкости для воды и в распределительных трубах;

b) приборы для измерения поступления воды (как эталонный, так и тот, калибровка которого производится): неопределенность, связанная с весовым прибором, временем измерения, задержками в получении и обработке данных и изменениями в экспериментальных и внешних условиях, таких как температура и относительная влажность.

Два этих источника неопределенности не зависят друг от друга, следовательно, можно провести их независимый анализ, а затем свести результаты в бюджет неопределенности.

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Armstrong, R.L., 1976: The application of isotopic profiling snow-gauge data to avalanche research. *Proceedings of the Forty-fourth Annual Western Snow Conference*, Atmospheric Environment Service, Canada, pp. 12–19.

Goodison, B.E., J.R. Metcalfe, R.A. Wilson and K. Jones, 1988: The Canadian automatic snow depth sensor: A performance update. *Proceedings of the Fifty-sixth Annual Western Snow Conference*, Atmospheric Environment Service, Canada, pp. 178–181.

Goodison, B.E., B. Sevruk, and S. Klemm, 1989: WMO solid precipitation measurement intercomparison: Objectives, methodology and analysis. In: International Association of Hydrological Sciences, 1989: *Atmospheric deposition*. *Proceedings,* Baltimore Symposium (May, 1989) IAHS Publication No. 179, Wallingford.

Grunow, J., 1960: The productiveness of fog precipitation in relation to the cloud droplet spectrum. In: *American Geophysical Union, 1960*, *Physics of precipitation*. Geophysical Monograph No. 5, *Proceedings of the Cloud Physics Conference* (3–5 June 1959, Woods Hole, Massachusetts), Publication No. 746, pp. 110–117.

Grunow, J., 1963: *Weltweite Messungen des Nebelniederschlags nach der Hohenpeissenberger Methode*. In: International Union of Geodesy and Geophysics, General Assembly (Berkeley, California, 19–31 August 1963), International Association of Scientific Hydrology Publication No. 65, 1964, pp. 324–342.

Loijens, H.S., 1975: Measurements of snow water equivalent and soil moisture by natural gamma radiation. *Proceedings of the Canadian Hydrological Symposium-75* (11–14 August 1975, Winnipeg), pp. 43–50.

Nespor, V. and B. Sevruk, 1999: Estimation of wind-induced error of rainfall gauge measurements using a numerical simulation. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Volume 16, Number 4, pp. 450–464.

Rinehart, R.E., 1983: Out-of-level instruments: Errors in hydrometeor spectra and precipitation measurements. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 22, pp. 1404–1410.

Schemenauer, R.S. and P. Cereceda, 1991: Fog water collection in arid coastal locations. *Ambio*, Volume 20, Number 7, pp. 303–308.

Schemenauer, R.S. and P. Cereceda,1994*a*: Fog collection's role in water planning for developing countries. *Natural Resources Forum*, Volume 18, Number 2, pp. 91–100.

Schemenauer, R.S. and P. Cereceda, 1994*b*: A proposed standard fog collector for use in high-elevation regions. *Journal of Applied Meteorology*, Volume 33, Number 11, pp. 1313–1322.

Sevruk, B., 1974*a*: Correction for the wetting loss of a Hellman precipitation gauge. *Hydrological Sciences Bulletin*, Volume 19, Number 4, pp. 549–559.

Sevruk, B., 1974*b*: Evaporation losses from containers of Hellman precipitation gauges. *Hydrological Sciences Bulletin*, Volume 19, Number 2, pp. 231–236.

Sevruk, B., 1984: Comments on «Out-of-level instruments: Errors in hydrometeor spectra and precipitation measurements». *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23, pp. 988–989.

Sevruk, B. and V. Nespor, 1994: The effect of dimensions and shape of precipitation gauges on the wind-induced error. In: M. Desbois and F. Desalmand (eds.): *Global Precipitation and Climate Change*, NATO ASI Series, I26, Springer Verlag, Berlin, pp. 231–246.

Sevruk, B. and L. Zahlavova, 1994: Classification system of precipitation gauge site exposure: Evaluation and application. *International Journal of Climatology*, 14(b), pp. 681–689.

Slovak Hydrometeorological Institute and Swiss Federal Institute of Technology, 1993: Precipitation measurement and quality control. *Proceedings of the International Symposium on Precipitation and Evaporation (*B. Sevruk and M. Lapin, eds) (Bratislava, 20–24 September 1993), Volume I, Bratislava and Zurich.

Smith, J.L., H.G. Halverson, and R.A. Jones, 1972: *Central Sierra Profiling Snowgauge: A Guide to Fabrication and Operation*. USAEC Report TID-25986, National Technical Information Service, U.S. Department of Commerce, Washington DC.

Stadtmuller, T. and N. Agudelo, 1990: Amount and variability of cloud moisture input in a tropical cloud forest. In: *Proceedings of the Lausanne Symposia* (August/November), IAHS Publication No. 193, Wallingford.

Vong, R.J., J.T. Sigmon and S.F. Mueller, 1991: Cloud water deposition to Appalachian forests.

Environmental Science and Technology, 25(*b*), pp. 1014–1021.

World Meteorological Organization, 1972: Evaporation losses from storage gauges (B. Sevruk) *Distribution of Precipitation in Mountainous Areas,* Geilo Symposium (Norway, 31 July–5 August 1972), Volume II, technical papers, WMO-No. 326, Geneva, pp. 96–102.

World Meteorological Organization, 1982: *Methods of Correction for Systematic Error in Point Precipitation Measurement for Operational Use* (B. Sevruk). Operational Hydrology Report No. 21, WMO-No. 589, Geneva.

World Meteorological Organization, 1984: *International Comparison of National Precipitation Gauges with a Reference Pit Gauge* (B. Sevruk and W.R. Hamon). Instruments and Observing Methods Report No. 17, WMO/TD-No. 38, Geneva.

World Meteorological Organization, 1985: *International Organizing Committee for the WMO Solid Precipitation Measurement Intercomparison*. Final report of the first session (distributed to participants only), Geneva.

World Meteorological Organization, 1986: *Papers Presented at the Workshop on the Correction of Precipitation Measurements* (B. Sevruk, ed.) (Zurich, Switzerland, 1–3 April 1985). Instruments and Observing Methods Report No. 25, WMO/TD-No. 104, Geneva.

World Meteorological Organization, 1989*a*: *Catalogue of National Standard Precipitation Gauges* (B. Sevruk and S. Klemm). Instruments and Observing Methods Report No. 39, WMO/TD-No. 313, Geneva.

World Meteorological Organization, 1989*b*: *International Workshop on Precipitation Measurements* (B. Sevruk, ed.) (St Moritz, Switzerland, 3–7 December 1989). Instruments and Observing Methods Report No. 48, WMO/TD-No. 328, Geneva.

World Meteorological Organization, 1992*a*: *Snow Cover Measurements and Areal Assessment of Precipitation and Soil Moisture* (B. Sevruk, ed.). Operational Hydrology Report No. 35, WMO-No. 749, Geneva.

World Meteorological Organization, 1992*b*: *Report on the Measurement of Leaf Wetness* (R.R. Getz). Agricultural Meteorology Report No. 38, WMO/TD-No. 478, Geneva.

World Meteorological Organization, 1998: *WMO Solid Precipitation Measurement Intercomparison: Final Report* (B.E. Goodison, P.Y.T. Louie and D. Yang) Instruments and Observing Methods Report No. 67, WMO/TD-No. 872, Geneva.

World Meteorological Organization, 2008: *Guide to Hydrological Practices*. WMO-No. 168, Geneva.

Yang, D., J.R. Metcalfe, B.E. Goodison and E. Mekis, 1993: True Snowfall: An evaluation of the Double Fence Intercomparison Reference Gauge. *Proceedings of the 50th Eastern Snow Conference*, Quebec City, 8–10 June 1993, Quebec, Canada, pp. 105–111.

Yang, D., B.E. Goodison, J.R. Metcalfe, V.S. Golubev, E. Elomaa, T. Gunther, R. Bates, T. Pangburn, C.L. Hanson, D. Emerson, V. Copaciu and J. Milkovic, 1995: Accuracy of Tretyakov precipitation gauge: results of WMO intercomparison. *Hydrological Processes*, Volume 9, pp. 877–895.

Young, G.J., 1976: A portable profiling snow-gauge: Results of field tests on glaciers. *Proceedings of the Forty-fourth Annual Western Snow Conference*, Atmospheric Environment Service, Canada, pp. 7–11.

ГЛАВА 7

ИЗМЕРЕНИЕ РАДИАЦИИ

7.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Потоки электромагнитного излучения, приходящие к поверхности Земли и уходящие от нее, являются наиболее важными переменными составляющими теплового баланса Земли в целом и каждого отдельного места на земной поверхности и в атмосфере. На практике наиболее часто измеряют энергетическую освещенность, создаваемую радиационными потоками, которую в метеорологии принято называть «радиацией». Измерения радиации имеют большое значение для следующих целей:

(a) исследование преобразования энергии в пределах системы Земля – атмосфера и его изменений в пространстве и времени;
(b) анализ свойств и распределения в атмосфере таких составляющих, как аэрозоли, водяной пар, озон и др.;
(c) исследование распределения и изменений приходящей и уходящей радиации;
(d) удовлетворение потребностей специалистов в области биологии, медицины, сельского хозяйства, архитектуры и промышленности в отношении данных о радиации;
(e) проверка алгоритмов и спутниковых измерений радиации.

Такая программа требует получения на широкой сети актинометрических станций регулярных рядов данных наблюдений за различными видами коротковолновой и длинноволновой радиации, а также обеспечение репрезентативных оценок сумм радиации. Помимо публикации рядов данных отдельных актинометрических станций, необходимо получение (что является основной целью) исчерпывающих радиационных климатических данных, с помощью которых можно более точно определить суточные и сезонные вариации различных составляющих радиационного баланса и лучше понять соотношения между ними и другими метеорологическими величинами.

Весьма полезные сведения о структуре и работе сети актинометрических станций содержатся в публикации (WMO, 1986a). В части III Руководства КПМН описаны научные принципы измерений и даются рекомендации по обеспечению качества, что особо важно для измерений радиации. В Baseline Surface Radiation Network (BSRN) Operations Manual (WMO, 1998) (Руководство по эксплуатации Опорной сети для измерения приземной радиации (БСРН)) (WMO, 1998) приводится обзор последних достижений в области измерений радиации.

Как принято в метеорологии, погрешности выражаются в виде 66-процентного доверительного интервала разности с истинным значением величины, которая схожа со среднеквадратическим отклонением совокупности значений. В необходимых случаях указываются особые доверительные интервалы неопределенности и оценка неопределенностей приводится с использованием методов Международной организации по стандартизации (ISO, 1995). К примеру, 95-процентная неопределенность означает, что заявленная неопределенность относится к доверительной вероятности 95 процентов.

7.1.1 Определения

В приложении 7.A приведена номенклатура радиометрических и фотометрических величин. Она основана на определениях, рекомендованных Международной комиссией по радиации Международной ассоциации метеорологии и атмосферных наук и Международной комиссией по освещенности (МКО). В приложении 7.B приводятся метеорологические радиационные показатели, символы и определения.

Параметры радиации можно разделить на две группы, в зависимости от их происхождения, а именно: на солнечное и земное излучение. В контексте настоящей главы «радиация» может означать какой-либо процесс или соотноситься с многими параметрами. К примеру, «солнечное излучение» может означать солнечную энергию, солнечную экспозицию или энергетическую освещенность солнечного излучения (см. Приложение 7.B).

Солнечная энергия – это электромагнитная энергия, излучаемая Солнцем. Солнечная радиация приходящая на верхнюю границу земной атмосферы, называется внеземной солнечной радиацией; 97 % этой радиации находится в спектральном диапазоне 290 – 3 000 нм и носит название солнечной или коротковолновой радиации. Часть внеземного солнечного излучения, проходя через атмосферу, достигает поверхности Земли, а часть ее рассеивается и/или поглощается молекулами газов, аэрозольными частицами, облачными каплями и кристаллами в атмосфере.

Земное излучение – это длинноволновая электромагнитная энергия, излучаемая земной поверхностью и атмосферными газами, аэрозолями и облаками; оно также частично поглощается в атмосфере. Наибольшая доля земного излучения находится в спектральном диапазоне за границей 3 000 нм. Так, при температуре 300 К на эту область приходится 99,99 % мощности излучения, а за границей 5 000 нм – 99 %. При более низкой температуре спектр сдвигается в сторону более длинных волн.

Поскольку спектральные интервалы солнечной и земной радиации перекрываются на незначительном участке, в измерениях и расчетах часто они рассматриваются раздельно. Для суммы этих видов радиации в метеорологии принят термин «интегральная радиация».

Свет – это электромагнитное излучение, видимое глазом человека. Спектральная область видимого излучения называется спектральной световой чувствительностью глаз стандартного наблюдателя. Нижняя граница видимого излучения находится между 360 и 400 нм, а верхняя – между 760 и 830 нм (ICI, 1987a). Радиация с длиной волны менее 400 нм называется ультрафиолетовой (УФ), а с длиной волны более 800 нм – инфракрасной радиацией. УФ диапазон иногда делится на три поддиапазона (МЭК, 1987):

УФ-А:	315 – 400 нм
УФ-В:	280 – 315 нм
УФ-С:	100 – 280 нм

7.1.2 Единицы и шкалы

7.1.2.1 Единицы

Для метеорологических радиационных переменных в целом предпочтительны единицы измерений, принятые в Международной системе единиц (СИ). Общий перечень единиц содержится в приложениях 7.A и 7.B.

7.1.2.2 Стандартизация

Ответственность за калибровку радиометрических приборов несут мировые, региональные и национальные радиационные центры, характеристики которых приведены в приложении 7.C. Кроме того, Мировой радиационный центр в Давосе (МРЦ) несет ответственность за содержание основного эталона – Группы международных эталонов (ГМЭ), используемой для реализации Международного радиометрического эталона (МРЭ). При проведении международных сличений эталонов, организуемых каждые пять лет, стандарты региональных центров сравниваются с ГМЭ, и их калибровочные параметры корректируются согласно МРЭ. Они, в свою очередь, периодически передаются в национальные центры, которые калибруют сетевые приборы по своим собственным стандартам.

Международный радиометрический эталон (МРЭ)

В прошлом в метеорологии применялось несколько радиационных эталонов или шкал, а именно: эталон Ангстрема 1905 г., Смитсонианская шкала 1913 г. и международная пиргелиометрическая шкала 1956 г. (МПШ, 1956).

Выполненные впоследствии научно-исследовательские и проектно-конструкторские разработки в области абсолютной радиометрии позволили значительно снизить погрешность измерений солнечной радиации и создать на основе результатов многочисленных сравнений 15 абсолютных пиргелиометров 10 различных типов Международный радиометрический эталон (МРЭ). Для перевода прежних шкал в шкалу МРЭ предлагаются следующие коэффициенты:

$$\frac{\text{МРЭ}}{\text{Ангстрема – 1905}} = 1{,}026$$

$$\frac{\text{МРЭ}}{\text{Смитсонианская – 1913}} = 0{,}977$$

$$\frac{\text{МРЭ}}{\text{МПШ – 1956}} = 1{,}022$$

Шкала МРЭ выражается в физических единицах измерения интегральной энергетической освещенности с погрешностью в пределах 0,3 % от измеряемой величины (для 99 % измеренных значений).

Реализация Международного радиометрического эталона: Группа международных эталонов (ГМЭ)

Для гарантии продолжительной устойчивости нового эталона группа международных эталонов (ГМЭ) должна состоять не менее чем из четырех абсолютных пиргелиометров различной конструкции. При включении в эту группу приборов к ним прилагаются переводные коэффициенты для приведения их данных к МРЭ. Для включения в эту группу радиометр должен соответствовать следующим требованиям:

(a) стабильность измерений должна быть менее 0,2 % измеренного значения во временных масштабах десятилетий;

(b) погрешности измерений прибором с доверительной вероятностью 95 % должны лежать в пределах погрешности МРЭ;

(c) по конструкции прибор должен отличаться от других приборов ГМЭ.

Для обеспечения критерия стабильности один раз в год обязательно осуществляется взаимосравнение приборов этой группы. ГМЭ находится в МРЦ в Давосе.

Передача шкалы Международного радиометрического эталона

Для калибровки радиометрических приборов необходимо использовать показания прибора ГМЭ или другого, непосредственно сопоставимого с ГМЭ. В ходе международных пиргелиометрических сравнений (МПС) значение в шкале МРЭ вычисляют на основе среднего, полученного из показаний по меньшей мере трех приборов ГМЭ. Для получения значения МРЭ показания приборов ГМЭ всегда корректируются с учетом переводного коэффициента, определенного на момент их включения в ГМЭ. Поскольку расчет среднего значения величины, измеренной ГМЭ, служащего эталоном, может быть нарушен в результате неисправности одного или более радиометров ГМЭ, Комиссия по приборам и методам наблюдения приняла решение[1], что для каждого МПС следует создавать специальную группу, в состав которой входят докладчик по метеорологическим радиационным приборам (или назначаемое лицо) и по крайней мере пять членов, включая председателя. Руководитель сравнений должен участвовать в совещаниях группы в качестве эксперта. Группа должна провести обсуждение предварительных результатов сравнений на основе критериев, определенных МРЦ, дать оценку эталона и рекомендации по обновлению коэффициентов калибрации.

7.1.3 Метеорологические требования

7.1.3.1 Данные для составления отчетности

Энергетическая освещенность и энергетическая экспозиция (суммы радиации) – это параметры, которые чаще всего регистрируются и архивируются со средними и итоговыми значениями за 1 час. Имеется также много потребностей в данных за более короткие периоды – до 1 минуты или даже десятков секунд (для некоторых энергетических применений). Часто используются данные о суточный суммах радиации, выраженные в виде средних значений суточной энергетической освещенности. Измерения для определения ослабления радиации в атмосфере должны проводиться в течение очень короткого интервала времени в целях уменьшения погрешностей, вызываемых изменениями в составе атмосферы на пути прохождения солнечных лучей.

Для измерений радиации особенно важно регистрировать и предоставлять информацию об условиях наблюдений. Сюда входят тип и метрологические характеристики прибора, сведения о его калибровке, местоположении в пространстве и во времени, пространственной экспозиции и обслуживании.

7.1.3.2 Погрешность

Для многих радиационных характеристик не существует официально согласованных установленных требований к погрешности, хотя погрешность, описываемая в настоящем разделе этой главы, затрагивает различные типы измерений и наилучшая практика расчета погрешностей относится к Опорной сети измерений приземной радиации Глобальной системы наблюдений за климатом (см. ВМО, 1998 г.). В целом можно отметить, что на практике добиться измерений хорошего качества довольно трудно. При регулярных измерениях их можно достичь только с помощью современного оборудования при большом числе измерений. Некоторые все еще используемые инструментальные системы не соответствуют современным требованиям, хотя и средние характеристики остаются приемлемыми для решения многих прикладных задач. Однако потребность в данных наивысшего качества постоянно увеличивается.

Сведения о погрешности, относящейся к остаточной радиации и энергетической экспозиции, содержатся в главе 1 части I приложения 1B. Требования точности 95 % для энергетической экспозиции за сутки, определенные ВМО для международного обмена, составляют 0,4 МДж/м^2 для величин ≤8 МДж/м^2 и 5 % для величин >8 МДж/м^2.

7.1.3.3 Частота проведения наблюдений и регистрация данных

Выполнение требований к точности может обеспечиваться путем проведения наблюдений с частотой меньше постоянной времени 1/e прибора даже в тех случаях, когда данные, подлежащие окончательной регистрации, представляют собой интегральные значения за периоды до 1 часа и более. Элементами данных могут стать интегральные значения или осредненные значения, рассчитанные на основании отдельных измерений. В основном предпочтение отдается цифровым системам данных. Диаграммные самописцы и другие типы интеграторов менее удобны, и результирующие показатели с трудом обеспечивают приемлемые уровни погрешностей.

7.1.3.4 Время наблюдений

Важно, чтобы данные глобальной сети актинометрических измерений были однородными не только с

1 Рекомендация Комиссии по приборам и методам наблюдения, принятая на ее одиннадцатой сессии (1994 г.)

точки зрения калибровки, но и по времени наблюдений. Поэтому все актинометрические измерения должны быть отнесены к тому времени, которое в некоторых странах известно как местное истинное время (МИВ), а в других – как истинное солнечное время (ИСВ). Однако для автоматических систем более подходит стандартное или универсальное время, поскольку им легко пользоваться, но оно применимо только в том случае, если приведение данных к ИСВ не повлечет за собой значительной потери информации (т. е. если частота проведения наблюдений и скорость регистрации достаточно высоки, как указано выше в разделе 7.1.3.3). Перевод из стандартного в солнечное время описывается в приложении 7.D.

7.1.4 Методы измерений

Актинометрические приборы классифицированы по следующим критериям: по типу переменной, подлежащей измерению; по углу зрения; по спектральной чувствительности; по основному виду применения и др. Основные типы классификации приведены в таблице 7.1. Перечень основных метрологических характеристик актинометрических приборов приведен ниже (см. пункты (a) – h). Приборы и принципы их действия изложены ниже в разделах 7.2 – 7.4. Более подробное описание приборов и принципов их действия изложено в публикации (WMO, 1986*a*).

Абсолютные радиометры – это приборы с самокалибровкой, т. е. измеряемая энергетическая освещенность заменяется электрической мощностью, которую можно измерить. Эта замена, однако, как правило, не бывает идеальной; отклонение от идеального случая определяет погрешность актинометрического измерения.

Многие датчики радиации не являются абсолютными, и их следует калибровать по абсолютному прибору. Тогда погрешность измеренного значения зависит от

Таблица 7.1. Актинометрические приборы

Классификация приборов	*Измеряемый параметр*	*Основное использование*	*Поле зрения (ср) (см. Рис. 7.1)*
Абсолютный пиргелиометр	Прямая солнечная радиация	Первичный эталон	5×10^{-3} (половина угла около 2,5°)
Пиргелиометр	Прямая солнечная радиация	(а) вторичный эталон для поверок (б) измерения на сети	5×10^{-3} до $2{,}5 \times 10^{-2}$
Спектральный пиргелиометр	Прямая солнечная радиация в широких спектральных полосах (т.е., со светофильтрами типов OG 530, RG 630 и др.)	Измерения на сети	5×10^{-3} до $2{,}5 \times 10^{-2}$
Солнечный фотометр	Прямая солнечная радиация в узких спектральных участках (т.е., при 500 ±2,5 нм, 368 ±2,5 нм)	(а) эталон (б) измерения на сети	1×10^{-3} до 1×10^{-2} (полный угол около 2,3°)
Пиранометр	(а) суммарная (солнечная) радиация (б) рассеянная солнечная радиация (в) отраженная солнечная радиация	(а) рабочий эталон (б) измерения на сети	2π
Спектральный пиронометр	Суммарная (солнечная) радиация в широких спектральных полосах (т. е., со свтофильтрами типов OG 530, RG 630 и др.)	Измерения на сети	2π
Коротковолновый балансомер (альбедометр)	Остаточная суммарная солнечная радиация	(а) рабочий эталон (б) измерения на сети	4π
Пиргеометр	(а) уходящая длинноволновая радиация (при обращении вниз) (б) приходящая длинноволновая радиация (при обращении вверх)	Измерения на сети	2π
Пиррадиометр	Интегральная по спектру радиация	Рабочий эталон	2π
Балансомер	Остаточная радиация, интегральная по спектру (радиационный баланс)	Измерения на сети	4π

следующих факторов, которые должны быть известны для прибора с хорошими показателями:

(a) разрешающей способности, т. е. наименьшего изменения значения радиации, которое может быть зафиксировано прибором;
(b) дрейфа чувствительности (отношения электрического выходного сигнала к измеряемому значению энергетической освещенности) с течением времени;
(c) изменений чувствительности, обусловленных изменениями переменных окружающей среды, таких как температура, влажность, давление и ветер;
(d) нелинейности чувствительности, т. е. от изменений чувствительности, связанных с изменениями энергетической освещенности;
(e) отклонения спектральной чувствительности от постулированной, т. е. от непрозрачности принимающей поверхности, эффекта апертурного окна и т. д.;
(f) отклонения направленной чувствительности от постулированной, т. е. от косинусной и азимутальной характеристик;
(g) постоянной времени прибора или системы измерения;
(h) погрешностей вспомогательного оборудования.

Приборы должны выбираться в зависимости от их конечного использования и требуемой погрешности получаемого значения. Некоторые приборы работают лучше в конкретных условиях климата, определенных значений радиации и положения Солнца.

7.2 ИЗМЕРЕНИЯ ПРЯМОЙ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ

Прямая солнечная радиация измеряется с помощью пиргелиометров, приемные поверхности которых устанавливаются перпендикулярно солнечным лучам. С помощью диафрагм измеряется только радиация от Солнца и узкого кольца неба, последний компонент радиации иногда называют околосолнечная радиация или светлое сияние. Апертура современных приборов соответствует углу полураствора, равному 2,5° и до около 5° от центра Солнца (что равно $6 \cdot 10^{-3}$ и $2{,}4 \cdot 10^{-2}$ ср соответственно). Монтаж пиргелиометра должен позволять быструю и плавную установку по азимуту и высоте. Обычно добавляется нацеливающее приспособление, в котором маленькое светлое пятно или солнечное отображение падает на отметку в центре мишени, когда приемная поверхность точно перпендикулярна прямому солнечному лучу. Для непрерывной регистрации рекомендуется использовать оборудование автоматического слежения за Солнцем (солнечное следящее устройство).

Для всех новых конструкций приборов, измеряющих прямую солнечную радиацию, рекомендуется, чтобы половина центрального угла приемника излучения составляла 2,5° ($6 \cdot 10^{-3}$ ср), а угол скоса диафрагмы приемника был равен 1°. Для определения этих углов см. рисунок 7.1.

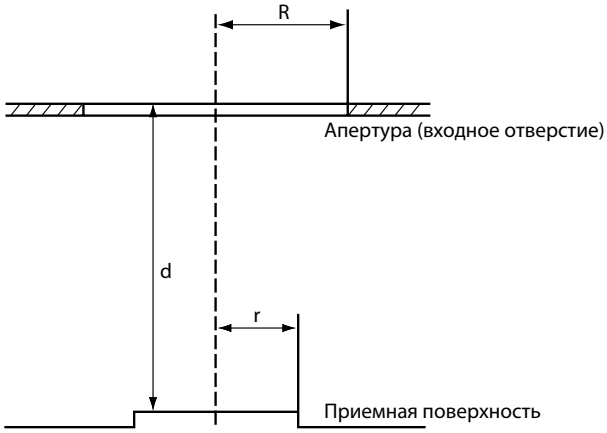


Рис.7.1 Геометрические параметры поля зрения: половина угла зрения = arctg R/d, угол скоса = arctg (R-d)/d

Во время сравнения приборов с различными схемами ограничения поля зрения при больших углах наклона и апертурах радиация ореола оказывает влияние на показания прибора. Различие между двумя апертурами, упомянутыми выше, для массы атмосферы 1,0 может составлять до 2 %. Для климатологического сравнения данных измерений прямой солнечной радиации в различное время года желательно привести все данные к среднему расстоянию от Солнца до Земли (приложение 7.D).

$$E_N = E/R^2 \qquad (7.1)$$

где E_N – солнечная радиация, приведенная к среднему расстоянию от Солнца до Земли, которое принято за одну астрономическую единицу (а. е.) (см. приложение 7.D); E – измеренная прямая солнечная радиация; R – расстояние от Солнца до Земли в астрономических единицах.

7.2.1 Прямая солнечная радиация

Некоторые характеристики используемых пиргелиометров (помимо основных эталонов) приведены в таблице 7.2 (взято из ИСО, 1990*a*) с указанием оценки погрешностей измерений, проводимых с их помощью, если они используются соответственно подготовленным персоналом при обеспечении контроля качества. Имеются и более дешевые пиргелиометры (см. ИСО, 1990a), но они не

нашли широкого применения, поскольку без дополнительных мер по улучшению их характеристик, поскольку присущие им погрешности снижают качество данных. Если при этом учесть, что для непрерывных измерений требуется следящее устройство, то в большинстве случаев дополнительные затраты на качественный пиргелиометр не будут слишком большими по сравнению со стоимостью следящего устройства. Оценка погрешностей измерений основана на следующих допущениях:

(a) приборы правильно установлены в месте наблюдений, эксплуатационный уход за ними обеспечивается согласно рекомендациям, приложенным к прибору;

(b) показатели ежеминутных и ежечасных наблюдений соответствуют прямой радиации безоблачного неба в солнечный полдень;

(c) дневные значения экспозиции соответствуют безоблачным дням в средних широтах.

7.2.1.1 Основные эталонные пиргелиометры

Абсолютный пиргелиометр может определять измеряемые значения прямой солнечной радиации без обращения к эталонным источникам или излучателям. Пределы погрешностей измерений прибора должны быть известны; качество таких сведений определяет надежность абсолютного пиргелиометра. Эксплуатировать и содержать основные эталоны могут только лаборатории со штатом квалифицированных специалистов. Подробная информация о конструкции и работе таких эталонов представлена в публикации (WMO, 1986*a*). Вместе с тем, для полноты изложения ниже приводятся краткие сведения.

Все абсолютные пиргелиометры современной конструкции используют в качестве приемников резонаторы и в качестве датчиков электрически калиброванные дифференциальные измерители теплового потока. В настоящее время такое сочетание дает минимально возможные погрешности при измерениях значений солнечной радиации до 1,5 кВт/м^2.

Обычно электрическая калибровка осуществляется путем замены мощности излучения на электрическую мощность, которая рассеивается в обмотке нагревателя вблизи того места, где происходит поглощение солнечной радиации.

Погрешность измерений такого прибора определяется тщательной проверкой его физических свойств, проведением лабораторных измерений и/или модельных расчетов, с тем чтобы выявить отклонения от идеального режима, т. е. установить, насколько адекватно происходит электрическая замена. Такая процедура называется определением характеристик прибора.

Таблица 7.2. Характеристики рабочих пиргелиометров

Характеристика		*Высокий класс*[a]	*Хороший класс*[b]
Время установления выходного сигнала (с точностью 95 %)		< 15 с	< 30 с
Смещение нуля (при изменении окружающей температуры со скоростью 5 К/ч		2 Вт/м^2	4 Вт/м^2
Порог чувствительности (наименьшее фиксируемое изменение), Вт/м^2		0,51	1
Стабильность (изменение в год в процентах от полной шкалы)		0,1	0,5
Температурная зависимость (процент максимальной погрешности, обусловленной изменением окружающей температуры на 50 К)		1	2
Нелинейность (процент отклонения от сигнала при 500 Вт/м^2 , обусловленного изменением радиации в диапазоне от 100 до 1 000 Вт/м^2)		0,2	0,5
Спектральная чувствительность (процент отношения спектрального поглощения к спектральному пропусканию приемной поверхности в спектральном диапазо не 300 – 3 000 нм).		0,5	1,0
Влияние наклона прибора (процент отклонения показания при угле 0° (горизонтальное положение) от показания при наклоне на 90° от горизонтального при радиации 1 000 Вт/м^2)		0,2	0,5
Достижимость достоверности показания с точностью 95 % от истинного (см. выше):			
Суммы за 1 мин	процент	0,9	1,8
	кДж/м^2	0,56	1
Часовой суммы	процент	0,7	1,5
	кДж/м^2	21	54
Суточной суммы	процент	0,5	1,0
	кДж/м^2	200	400

Примечания:

[a] Близкие значения для типа; подходит для использования в качестве рабочего эталона; используются только на станциях со специальным оборудованием и персоналом.

[b] Пригодны для сетевых измерений.

Для того чтобы абсолютный пиргелиометр (отдельный прибор, а не тип прибора) использовался в качестве основного эталона, он должен удовлетворять следующим условиям:

(a) по крайней мере один прибор из серии промышленных радиометров должен быть снабжен исчерпывающей информацией о его характеристиках. 95 % значений погрешности определения характеристик прибора должны быть меньше 2 Вт/м^2 в условиях ясного неба, при которых проводятся калибровки (см. ИСО, 1990*a*). 95 % значений суммарной погрешности какой-либо серии измерений не должны превышать 4 Вт/м^2 для любого измеряемого значения;

(b) каждый отдельный серийный прибор необходимо сравнивать с прибором, снабженным исчерпывающей информацией о его характеристиках; показания сравниваемого прибора не должны показывать отклонения выше указанных в перечислении (a);

(c) подробное описание результатов таких сравнений и характеристики этого прибора должны предоставляться по запросу;

(d) для доказательства того, что конструкция прибора отвечает современным требованиям, необходима проверка соответствия со шкалой МРЭ путем сравнения с ГМЭ или с другим признанным эталоном, соответствующим требованиям, предъявляемым к ГМЭ. Последнее возможно, если погрешность серии измерений при сопоставлении с МРЭ менее 1 Вт/м^2 с доверительной вероятностью 95 %.

Примечания:

a Практически современные; приемлемы для использования в качестве рабочего стандарта; могут содержаться лишь на станциях со специальным оборудованием и персоналом.

b Приемлемо для использования на сети.

7.2.1.2 Вторичные эталонные пиргелиометры

Абсолютный пиргелиометр, который не удовлетворяет техническим характеристикам первичного эталона или технические характеристики которого не были определены в полном объеме, может использоваться в качестве вторичного эталона, если он откалиброван путем сравнений с ГМЭ при погрешности серии измерений менее 1 Вт/м^2 с доверительной вероятностью 95 %.

Другие типы приборов с погрешностями измерений, близкими к первичным эталонам, могут использоваться в качестве вторичных эталонов.

Компенсационный пиргелиометр Ангстрема использовался и используется как удобный вторичный эталонный прибор для калибровки пиранометров и других пиргелиометров. Он был создан К. Ангстремом в качестве абсолютного прибора, на нем основана и шкала Ангстрема 1905 г.; в настоящее время он используется в качестве вторичного эталона, и его необходимо калибровать по эталонному прибору.

Приемник первых образцов пиргелиометра Ангстрема состоит из пары покрытых платиновой чернью манганиновых полосок длиной 18 мм, шириной 2 мм и толщиной 0,02 мм каждая. Они зачернены сажей или оптически матовой черной краской. К тыловой стороне каждой полоски прикреплены электрически изолированные спаи термоэлемента медь-константан. Разность температур между полосками определяется чувствительным гальванометром или электрическим микровольтметром. Размеры полосок и передняя диафрагма соответствуют половине центрального угла и угла скоса диафрагм, указанных в таблице 7.3.

Процесс измерения состоит из трех или более циклов, в ходе которых левая или правая полоска поочередно затеняется или облучается прямыми солнечными лучами. Затененная полоска нагревается электрическим током. Регулируя силу тока, протекающего через нее, добиваются равенства э. д. с, вырабатываемых термопарами.

До и после измерения нуль проверяется путем затенения или путем облучения одновременно обеих полосок. В зависимости от используемого метода и данных инструкции по эксплуатации прибора завода-изготовителя, результаты расчета энергетической освещенности могут несколько отличаться. В методе, принятом для международных сравнений пиргелиометров, используется формула:

$$E = K \cdot i_L \cdot i_R \qquad (7.2)$$

где E – энергетическая освещенность в Вт/м^2; K – калибровочная постоянная, определенная сравнением с основным эталоном (Вт м$^{-2}$ А$^{-2}$); и i_L i_R – ток в амперах, измеряемый в левой или правой полоске, экспонируемой прямому солнечному лучу соответственно.

Таблица 7.3. Схема ограничения углов зрения пиргелиометров Ангстрема

Угол	*Вертикальный*	*Горизонтальный*
Половина центрального угла приемника излучения	5° – 8°	~ 2°
Угол скоса диафрагм приемника излучения	0,7° – 1.0°	1,2° – 1,6°

До и после каждой серии измерений нуль системы регулируется электрически любым из вышеупомянутых методов, и в зависимости от обстоятельств этот нуль называется «горячим» (облученным) или «холодным» (затемненным) соответственно. Обычно первое показание (скажем, i_R) исключается, и только последующие пары значений i_L и i_R используются для расчета энергетической освещенности. При сравнениях такого пиргелиометра с другими приборами энергетическая освещенность, получаемая на основе э.д.с., соответствует геометрическому среднему солнечной энергетической освещенности во время снятия показаний i_L и i_R.

Вспомогательное оборудование состоит из источника питания, регулятора тока, нуль-индикатора, переключателя и измерителя тока.

Чувствительность нуль-индикатора должна составлять $0{,}05 \cdot 10^{-6}$ А на деление шкалы для небольшого входного сопротивления (менее 10 Ом) или около 0,5 мкВ при большом входном сопротивлении (более 10 кОм). При таких условиях разность температур 0,05 К между спаями термопары медь-константан вызывает отклонение на одно деление шкалы, из чего следует, что одна из полосок получает избыток тепла, составляющий около 0,3 %.

Погрешность полученной энергетической освещенности при прямом солнечном облучении в большой степени зависит от качества устройств для измерения тока – миллиамперметра электромагнитного типа или цифрового мультиметра, который измеряет напряжение по стандартному сопротивлению, а также зависит от профессионализма оператора. Погрешность измеряемого значения энергетической освещенности в два раза больше погрешности измерения электрического тока. Ток нагрева направляется к любой полоске с помощью переключателя и контролируется отдельными реостатами в каждой цепи. Переключатель может также отключать ток для определения места нуля. Разрешающая способность реостатов должна быть достаточной для регулировки показания нуль-индикатор в пределах половины деления шкалы.

7.2.1.3 Полевые и сетевые пиргелиометры

Как правило, у этих пиргелиометров в качестве чувствительного элемента используется термобатарея. Они имеют ограниченные углы зрения, так же как и стандартные пиргелиометры. Более старые модели, как правило, имеют более широкие центральные углы и углы скоса диафрагм. Такие особенности конструкции предназначались главным образом для снижения необходимости точного нацеливания на солнечный диск. Однако чем больше угол скоса диафрагм (и центральный угол приемника), тем больше доля излучения солнечного ореола воспринимается приемником, величина которой может достигать нескольких процентов в условиях низкой прозрачности атмосферы. В новых конструкциях необходимость в больших центральных углах и углах скоса диафрагм отпадает благодаря использованию компьютерных систем слежения за Солнцем как в пассивном, так и в активном режимах. Вместе с тем, угол скоса в 1° все еще требуется для обеспечения равномерного распределения солнечной радиации на приемной поверхности приемника и допускала нацеливание следящей системы на солнце с погрешностью порядка 0,1°.

Целевое использование пиргелиометра может диктовать выбор конкретного типа прибора. Некоторые модели ручной ориентации, как, например, актинометры Линке-Фойснера, используются главным образом для единичных измерений, тогда как другие (типов EKO, Eppley, Kipp&Zonen, Middleton) специально предназначены для долговременного мониторинга прямой солнечной радиации. Перед установкой прибора пользователь должен учитывать значительные различия между штатными пиргелиометрами, а именно:

(a) угол зрения прибора;
(b) спектральную характеристику, в том числе материал защитного окна (стекло или кварц), которым закрыто входное отверстие прибора;
(c) методы температурной компенсации или коррекции;
(d) порог чувствительности и вариация нулевого сигнала;
(e) можно ли установить прибор на автоматической следящей системе для долговременного мониторинга;
(f) если данный прибор предназначен для калибровки других оперативных пиргелиометров, то следует учитывать факторы (a) – (c), указанные выше, при этом данный пиргелиометр должен обладать качеством, необходимым для калибровки сетевых приборов.

7.2.1.4 Калибровка пиргелиометров

Все пиргелиометры, кроме абсолютных, должны быть откалиброваны путем сличения с другим пиргелиометром, привязанным к ГМЭ, с погрешностью не ниже погрешности, характерной для приборов калибруемого типа.

Поскольку все данные солнечной радиации должны быть получены в шкале МРЭ, абсолютные пиргелиометры .должны иметь коэффициент не только свой собственный, но и полученный в результате сравнений с ГМЭ. После таких сравнений (например, во

время периодически проводимых международных сравнений пиргелиометров – МСП) такой пиргелиометр может быть использован в качестве эталона для калибровки вторичных эталонов и рабочих пиргелиометров. Вторичные эталоны также могут быть использованы для калибровки приборов, однако с более высокой погрешностью.

Качество калибровки по солнцу может зависеть от влияния околосолнечного ореола, если сравнивать приборы с различными геометрическими размерами. Если постоянные времени и нулевые сигналы пиргелиометров существенно различаются, качество результатов будет зависеть от стабильности прямой солнечной радиации при сравнениях. На результаты могут влиять также другие условия: температура воздуха, атмосферное давление, доля приходящей длинноволновой радиации. В том случае, когда требуется высокое качество калибровки, сравнения нужно проводить в дни с устойчивой радиацией при высокой прозрачности атмосферы.

Процедуры калибровки полевых пиргелиометров изложены в стандарте ИСО (ISO, 1990*b*).

В ходе недавно проведенных МСП было установлено, что калибровку основных и вторичных эталонов на соответствие ГМЭ достаточно проводить один раз в 5 лет. Рабочие пиргелиометры должны калиброваться через 1 – 2 года; чем дольше они используются и чем суровее условия их эксплуатации, тем чаще должна проводиться калибровка.

7.2.2 Спектральная прямая солнечная радиация и измерения характеристик прозрачности атмосферы

В метеорологии спектральные измерения прямой солнечной радиации проводятся также для определения характеристик прозрачности атмосферы Данные спектральных измерений используются также в области медицины, биологии, сельского хозяйства и для практического использования солнечной энергии.

Оптическая плотность аэрозолей обычно определяется как полное ослабление солнечной радиации в вертикальном столбе атмосферы, эквивалентном единице ее оптической массы, а именно ее рассеяние и абсорбция аэрозолями с размерами 100 – 10 000 нм. Однако взвешенные частицы не являются единственным фактором, влияющим на прозрачность среды. Другие атмосферные составляющие, такие как молекулы воздуха (рассеяние Релея), озон, водяной пар, диоксид азота и диоксид углерода, тоже вносят свой вклад в общее ослабление солнечного луча. Большинство измерений оптической плотности производится для того, чтобы лучше изучить влияние атмосферных аэрозолей. Однако измерения оптической плотности других атмосферных примесей, таких как водяной пар, озон и диоксид азота, можно проводить только при условии выбора соответствующих спектральный интервалов.

Определение вертикальной оптической плотности аэрозолей $\delta_a(\lambda)$ при конкретной длине волны λ основано на законе Бугера-Ламберта (или законе Беера для монохроматического излучения) и может определяться по формуле:

$$\delta_a(\lambda) = \frac{\ln(E_0(\lambda)/E(\lambda)) - \sum(\delta_i(\lambda)\cdot m_i)}{m_a} \qquad (7.3)$$

где $\delta_a(\lambda)$ – оптическая плотность аэрозоля в спектральном интервале с центром при длине волны λ; m_a – воздушная масса атмосферы для аэрозолей (равная единице в вертикальном направлении); δ_i – оптическая плотность других составляющих атмосферы i, помимо аэрозолей, в спектральном интервале с центром при длине волны λ; m_i – масса атмосферы для затухания составляющих i, помимо аэрозолей; $E_0(\lambda)$ – значение заатмосферной прямой солнечной радиации при длине волны λ; $E(\lambda)$ – значение прямой солнечной радиации при длине волны λ на земной поверхности.

Мутность среды представляет собой общее ослабление на пути прохождения солнечных лучей через атмосферу и определяется как произведение массы воздуха на коэффициент мутности $m\delta$.

Фактор мутности τ представляет собой такой же показатель, что и мутность среды, но выраженный в законе Беера через десятичный логарифм вместо натурального (с снованием e):

$$\tau(\lambda)m = \log(E_0(\lambda)/E(\lambda)) \qquad (7.4)$$

соответственно:

$$\tau(\lambda) = 2{,}301\delta(\lambda) \qquad (7.5)$$

В практике измерений прямой солнечной радиации различают два вида: широкополосная пиргелиометрия и узкополосная солнечная радиометрия (иногда называемая фотометрией). Поскольку оптическая плотность аэрозоля определяется только для монохроматического излучения или для узких спектральных интервалов, результаты таких измерений можно использовать при оценке данных солнечного фотометра, но не данных широкополосного пиргелиометра.

Наблюдения для определения характеристик мутности аэрозольной среды должны проводиться

в условиях отсутствия облаков и их следов в околосолнечной зоне небе радиусом не менее 5° от центра солнечного диска При таких условиях следует производить максимальное число измерений и охватывать максимальный диапазон масс атмосферы m, предпочтительно с шагом Δm менее 0,2.

Для определения аэрозольной мутности можно использовать только мгновенные значения результатов измерений; выполненные в течение менее 1 с.

7.2.2.1 Широкополосная пиргелиометрия

В широкополосной пиргелиометрии используется тщательно откалиброванный пиргелиометр с расположенными перед ним широкополосными стеклянными светофильтрами для выделения интересующих спектральных полос. Характеристики используемых классических светофильтров приведены в таблице 7.4.

Спектральные коэффициенты пропускания светофильтров зависят от температуры фильтров, что необходимо учитывать при обработке результатов измерений. Перед каждым использованием фильтры должны быть тщательно очищены.

Расчет показателей оптической толщины аэрозоля на основании измерений с помощью широкополосного фильтра очень сложен, и здесь не существует стандартной методики. Могут использоваться таблицы, рассчитанные на основании данных стандартного фильтра и некоторых допущений о состоянии атмосферы. Надежность результатов расчета зависит от того, насколько хорошо используемый фильтр соответствует фильтру, по которому осуществлялись расчеты, и насколько достоверны допущения о состоянии атмосферы. Подробные расчеты и соответствующие таблицы можно найти в публикации WMO (1978). Описание приборов дано Kuhn (1972) и Lal (1972).

7.2.2.2 Солнечная радиометрия (фотометрия) и аэрозольная мутность

Узкополосный солнечный радиометр (или фотометр), как правило, состоит из узкополосного интерференционного фильтра и фотоэлектрического детектора – обычно кремниевого фотодиода. Полный угол зрения прибора составляет 2,5°, а угол скоса диафрагм приемника излучения – 1° (см. рисунок 7.1). Хотя получение значений характеристик мутности среды с использованием таких устройств концептуально является простым, многие ранее проведенные наблюдения не дали полезных результатов. Это было обусловлено в основном сдвигом времени срабатывания прибора (в связи с изменением характеристик пропускания фильтра и детектора за короткий период) и недостаточной подготовкой оператора по ручному управлению прибором. Однако при тщательном соблюдении процедур измерений и частых проверках стабильности прибора могут быть получены довольно точные результаты. Прибор необходимо калибровать достаточно часто, предпочтительно с использованием средств калибровки на объекте или с использованием эталонных устройств, находящихся в радиационном центре. Калибровка должна проводиться с привлечением специалистов в области определения мутности среды.

Подробная информация по узкополосным солнечным радиометрам и работе сети приводится в WMO (1993*a*).

Для расчета аэрозольной мутности по данным узкополосного солнечного радиометра с небольшой

Таблица 7.4. Характеристики стандартных стеклянных светофильтров фирмы Шотт

Тип светофильтра фирмы Шотт	*Типичная полуширина пропускания, нм*		*Средний коэффициент пропускания (при толщине 3 мм)*	*Ориентировочный температурный коэффициент коротковолновой границы (нм/К)*
	от	до		
OG 530	526 ± 2	2 900	0,92	0,12
RG 630	630 ± 2	2 900	0,92	0,17
RG 700	702 ± 2	2 900	0,92	0,18

Температурные коэффициенты для фильтров Шотта предоставляются заводом-изготовителем. Коротковолновые пропускания приведены к стандартным фильтрам, используемым для калибровки. Для уменьшения неопределенностей в производных величинах требуются проверки коротковолновых и длинноволновых пропусканий.

погрешностью необходимо знать достаточно точно координаты расположения станции, атмосферное давление, температуру воздуха, толщину слоя озона и истинное солнечное время измерения (WMO, 2005). Наиболее точный расчет общего показателя и аэрозольной мутности на основе спектральных данных при длине волны

$$\delta_a(\lambda) = \frac{\ln\left(\frac{S_0(\lambda)}{S(\lambda)R^2}\right) - \frac{P}{P_0}\delta_R(\lambda)m_R - \delta_{O_3}(\lambda)m_{O_3}\ldots}{m_a} \qquad (7.6)$$

где $S(\lambda)$ – отсчет по прибору (например, в вольтах или числе импульсов); $S_0(\lambda)$ – гипотетическое показание, соответствующее значению прямой солнечной радиации при длине волны λ в верхних слоях атмосферы в астрономических единицах при 1 AU (это можно установить путем экстраполяции массы атмосферы до нулевого значения с помощью различных методов Ленгли или получить из радиационного центра, где прокалиброван этот прибор); R – расстояние от Солнца до Земли (в астрономических единицах, см. Приложение 7.D); P – атмосферное давление; P_0 – стандартное атмосферное давление, а второй, третий и последующие члены выражения в числителе дроби представляют собой релеевское рассеяние, рассеяние озоном и другие виды рассеяния. Эту формулу можно упростить для проведения менее точных расчетов, предположив, что относительные массы атмосферы для каждого компонента рассеяния одинаковы.

Релеевское рассеяние должно быть учтено для всех длин волн. Оптическая плотность озона должна рассматриваться на длинах волн менее 340 нм в полосе Чапиуса. Оптическая плотность диоксида азота должна рассматриваться для всех измеряемых прибором длин волн короче 650 нм, особенно если измерения проводятся в районах, подверженных влиянию городов. При этом слабой полосой поглощения водяного пара в области 500 нм можно пренебречь. Более подробную информацию об отборе длин волн можно получить из публикации WMO (1986*b*).

Простой алгоритм для расчета мутности, обусловленной релеевским рассеянием, заключается в комбинации процедуры, изложенной Fröhlich and Shaw (1980) и коррекции Юнга (1981). Для более точных расчетов также имеется алгоритм Bodhaine и др. (1999). Озон и диоксид азота подчиняются закону абсорбции Беера. Мировой центр данных по озону ВМО рекомендует коэффициенты абсорбции озона, полученные Bass и Paur (1985) в ультрафиолетовом участке спектра и Vigroux (1953) в видимом участке спектра. Коэффициенты абсорбции диоксида углерода можно найти в работе Schneider и др. (1987). Уменьшению влияния водяного пара в области коротких длин волн посвящена работа Frouin, Deschamps and Lecomte (1990). Вследствие комплексного характера абсорбции водяного пара необходимо избегать полос частот, подвергающихся существенному влиянию, и определять содержание водяного пара на основе данных спектральной солнечной радиометрии.

7.2.3 Экспонирование

Для обеспечения непрерывной регистрации данных и снижения погрешностей весьма важно наличие точного следящего за Солнцем устройства, обеспечивающего погрешность слежения 0,2° и не подверженного влиянию влиянию условий окружающей среды. Состояние приборов необходимо проверять по крайней мере один раз в сутки и даже чаще, если этого требуют погодные условия (с защитой от неблагоприятных факторов).

Основное требование экспонирования для мониторинга прямой солнечной радиации – отсутствие экранирования солнечных лучей в процессе измерений в любой момент любого времени года. Кроме того, место должно быть выбрано так, чтобы характеристики мутности атмосферы (туман, дым и загрязнение воздуха) были, по возможности, типичными для окружающей среды данного района.

Для обеспечения непрерывности наблюдений как правило используется оптическое окно для защиты чувствительных элементов датчика и элементов оптики от дождя, снега и пр. Необходимо следить за тем, чтобы оно сохранялось чистым и чтобы на его внутренней стороне не появлялся конденсат. Получение достоверных характеристик аэрозольной мутности возможно только при соблюдении указанных мер, поскольку погрешность определения атмосферной массы в 1 % приводит к погрешности 0,010 определения мутности. Например, при измерениях в спектральном участке 500 нм прибором, расположенным на уровне моря, погрешность определения атмосферной массы, равная 0,010, в зимнее время приводит к погрешности значений мутности среды 20 – 50 %.

7.3 ИЗМЕРЕНИЕ СУММАРНОЙ И РАССЕЯННОЙ РАДИАЦИИ

Солнечная радиация, создаваемая потоками излучения, приходящими из верхней полусферы в пределах телесного угла 2 π ср на горизонтальную поверхность, называется суммарной солнечной радиацией.

Она включает радиацию, создаваемую излучением солнечного диска и рассеянным небом (компонентами атмосферы, включая облака).

Прибором, используемым для измерения солнечной радиации, приходящей из телесного угла 2 π ср на плоскую поверхность в спектральном диапазоне от 300 до 3000 нм, является пиранометр. Пиранометр иногда используется для измерения солнечной радиации на наклонных поверхностях, а в перевернутом положении – для измерения отраженной суммарной радиации. При измерении рассеянной радиации неба пиранометр должен быть экранирован от прямых солнечных лучей затеняющим устройством (см. раздел 7.3.3.3).

В пиранометрах в качестве чувствительного элемента обычно используются термоэлектрические, фотоэлектрические, пироэлектрические или биметаллические элементы. Поскольку пиранометры экспонируются непрерывно при любых погодных условиях, они должны быть стойкими по конструкции и устойчивыми против коррозийного действия влажного воздуха (особенно вблизи моря). Приемник радиации должен быть герметично запаян внутри корпуса, или же корпус должен быть легкосъемным, с тем чтобы можно было устранить конденсационное увлажнение. В случае если приемник не запаян, в основании прибора, как правило, размещается осушитель. Характеристики пиранометров, которые обычно принимаются во внимание при оценке погрешности и качества радиационных измерений, следующие: чувствительность, стабильность, время срабатывания, косинусная характеристика, азимутная характеристика, линейность, температурная характеристика, термический сдвиг, нулевой сигнал энергетической освещенности и спектральная характеристика. Дополнительные сведения об использовании пиранометров даются ISO (1990*c*) и WMO (1998).

В таблице 7.5 (адаптирована из ISO, 1990*a*) приведены характеристики пиранометров различных уровней качества с погрешностями, которые могут обеспечиваться при соответствующем оборудовании, хорошо обученном персонале и хорошем контроле качества.

7.3.1 Калибровка пиранометров

Калибровка пиранометров заключается в определении одного или более метрологических характеристик, в том числе связанных с условиями эксплуатации:

(a) угловое распределение энергетической освещенности;
(b) методкалибровки;
(c) азимутальная направленность прибора;
(d) угол наклона прибора к горизонту;
(e) уровень энергетической освещенности;
(f) длинноволновая энергетическая освещенность (в случае необходимости коррекции термического сдвига);
(g) спектральное распределение энергетической освещенности;
(h) температура прибора и/или окружающей среды;
(i) временно́е изменение характеристик.

При использовании пиранометров необходимо иметь ввиду, что погрешность наблюдений будет увеличиваться в тех случаях, когда условия экспозиции датчика отличаются от условий, в которых была проведена калибровка пиранометра.

Обычно необходимо определить условия среды испытаний, которые могут быть различными в разных случаях применения. Метод и условия должны быть также детально описаны в калибровочном сертификате.

Существует способов калибровки пиранометров, выполняемых по Солнцу или в лабораторных условиях с использованием искусственных источников света, а именно:

(a) путем сравнения с эталонным пиргелиометром, измеряющим прямую солнечную радиацию и с затененным эталонным пиранометром, измеряющим рассеянную радиацию;
(b) путем сравнения с эталонным пиргелиометром по солнцу с использованием съемного затеняющего экрана для пиранометра;
(c) путем сравнения по солнцу с эталонным пиргелиометром и двух поочередно калибруемых пиранометров, измеряющих суммарную и рассеянную радиацию;
(d) путем сравнения с эталонным пиранометром в естественных условиях при прямой солнечной радиации, статистически не отличающейся от нуля (например, при равномерной облачности);
(e) в лабораторных условиях на оптической скамье с искусственным источником излучения, падающего на приемную поверхность пиранометра перпендикулярно или наклонно, путем сравнения с эталонным пиранометром такого же типа, предварительно калиброванным вне лаборатории;
(f) в лабораторных условиях с помощью интегрирующей камеры, имитирующей рассеянную радиацию неба, путем сравнения с эталонным пиранометром такого же типа, предварительно калиброванным вне лаборатории.

Таблица 7.5. Характеристики рабочих пиранометров

Параметр	*Высокий класс*[a]	*Хороший класс*[b]	*Средний класс*[c]
Время установления выходного сигнала (с точностью 95 %)	< 15 с	< 30 с	< 60 с
Смещение нуля:			
(a) реакция на остатки тепловой радиации до 200 Вт/м^2	7 Вт/м^2	15 Вт/м^2	30 Вт/м^2
(b) реакция на изменение окружающей температуры 5 К/ч	2 Вт/м^2	4 Вт/м^2	8 Вт/м^2
Порог чувствительности (наименьшее фиксируемое изменение)	1 Вт/м^2	5 Вт/м^2	10 Вт/м^2
Стабильность (изменение в год в процентах от полной шкалы)	0,8	1,5	3,0
Реакция на направленное облучение (предел погрешности, обусловленной отклонением от нормального облучения при значении радиации 1000 Вт/м^2)	10 Вт/м^2	20 Вт/м^2	30 Вт/м^2
Температурная зависимость (процент максимальной погрешности, обусловленной изменением окружающей температуры на 50 К)	2	4	8
Нелинейность (процент отклонения от сигнала при 500 Вт/м^2, обусловленного изменением радиации в диапазоне от 100 до 1000 Вт/м^2)	0,5	1	3
Спектральная чувствительность (процент отношения спектрального поглощения к спектральному пропусканию приемной поверхности в спектральном диапазоне 300 – 3000 нм).	2	5	10
Влияние наклона прибора (процент отклонения показания при угле 0° (горизонтальное положение) от показания при наклоне на 90° от горизонтального при радиации 1000 Вт/м^2).	0,5	2	5
Достижимость достоверности показания (с точностью 95 % от истинного):			
часовой суммы	3 %	8 %	20 %
суточной суммы	2 %	5 %	10 %

Примечания:

[a] Близкие значения для типа; подходит для использования в качестве рабочего эталона; используются только на станциях со специальным оборудованием и персоналом;

[b] Пригодны для сетевых измерений;

[c] Пригодны для использования на недорогой сети с измерениями средней точности.

Существуют и другие методы, но чаще всего используются (a), (b), (c), и (d). Вместе с тем весьма важно, что за исключением метода (b) для всех приборов используются либо нулевые сигналы энергетической освещенности, либо используются пары идентичных стандартных пиранометров в идентичных конфигурациях. Незнание этих сдвигов и различий может существенно исказить результаты.

Считается, что метод (c) дает весьма хорошие результаты без использования калиброванного пиранометра.

Трудно рекомендовать какое-то конкретное число измерений, на которых основываются расчеты калибровочного коэффициента пиранометра. Однако может быть рассчитано стандартное отклонение, которое должно быть меньше определяемого в соответствии с необходимой точностью при снятии достаточного числа показаний при желаемых условиях. Основные вариации (за исключением колебаний, происходящих из-за нестабильности атмосферных условий и ограниченных возможностей наблюдений) обусловлены:

(a) отклонениями от закона Ламберта для диффузного свечения, в частности если угол высоты Солнца составляет менее 10° (в этом случае работы по калибровке прибора следует отложить до момента, когда угол высоты Солнца превысит 30°);
(b) температурой окружающей среды;
(c) недостаточной горизонтальностью приемной поверхности пиранометра;
(d) нелинейностью характеристик чувствительности прибора;
(e) чувствительностью к длинноволновой радиации.

Предпочтение следует отдавать калибровке пиранометра в обычном рабочем положении.

При калибровке по солнцу высота солнца должна определяться до ближайшего значения с шагом 0,1° (см. приложение 7.D). Необходимо также отмечать среднюю температуру прибора или окружающей среды.

7.3.1.1 Поверка по эталонному пиргелиометру и затеняемому эталонному пиранометру

При этом методе, изложенном в ISO (1993), реакция пиранометра на суммарную радиацию калибруется по отношению к сумме отдельных измерений прямой и рассеянной составляющих. Следует выбирать периоды измерений при безоблачном небе и устойчивой солнечной радиации (устойчивость определяется по показаниям приборов).

Прямая солнечная радиация определяется по показаниям пиргелиометра, а рассеянная небом радиация измеряется с помощью постоянно затеняемого эталонного пиранометра. При этом у пиранометра должен быть полностью затенен защитный стеклянный колпак. Соотношение диаметра затеняющего диска и его расстояние до приемной поверхности пиранометра должно соответствовать угловой апертуре пиргелиометра. При расчетах угла скоса должны использоваться диаметр затеняющего диска и внешний радиус защитного колпака, а не радиус чувствительного элемента пиранометра. Такая система затенения исключает радиацию от солнечного диска и околосолнечного ореола аналогично пиргелиометру.

Так как в ясный день рассеянная солнечная радиация составляет менее 15 % суммарной. Не обязательно точно знать калибровочный коэффициент эталонного пиранометра. Однако необходимо учитывать нулевые сигналы обоих пиранометров, поскольку у некоторых пиранометров в условиях ясного неба нулевой сигнал может достигать 15 % от величины рассеянной радиации.

В этом случае калибровочный коэффициент (представляющий собой величину, обратную чувствительности, выражаемой в мкВ/Вт · м^2), рассчитывается по формуле:

$$E \cdot \sin h + V_s k_s = V \cdot k \qquad (7.7)$$

или:

$$k = (E \sin h + V_s k_s)/V \qquad (7.8)$$

где E – прямая солнечная радиация, измеренная с помощью пиргелиометра (Вт/м^2); V – сигнал на выходе калибруемого пиранометра под воздействием суммарной радиации (мкВ); V_s – сигнал на выходе затененного пиранометра, измеряющего рассеянную радиацию, (мкВ); h – высота Солнца в момент измерения; k – калибровочный коэффициент калибруемого пиранометра, (Вт/м^2 · мкВ); k_s – калибровочный коэффициент затененного эталонного пиранометра (Вт/м^2 · мкВ).

Измерения по обоим приборам должны выполняться синхронно.

Если в процессе измерений значения прямой и рассеянной радиации меняются в ходе сравнений, то для обеспечения репрезентативности данных рекомендуется произвести соответствующие выборки и осреднения.

7.3.1.2 Поверка по эталонному пиргелиометру

Этот способ, изложенный в ISO (1993a), подобен методу, описанному в предыдущем разделе, с той лишь разницей, что суммарная и рассеянная радиация измеряются одним и тем же калибруемым пиранометром. При обработке Составляющая прямой солнечной радиации временно исключается из пиранометра путем затемнения всего его наружного стеклянного колпака, как это описано в разделе 7.3.1.1. Время затенения зависит от устойчивости солнечной радиации и временной характеристики пиранометра, включая временной интервал, необходимый для уравновешивания теплового и длинноволнового излучения стеклянного колпака; в основном достаточно примерно 10 x 1/e постоянной времени термопары.

Разность между репрезентативными выходными сигналами затененного и незатененного пиранометра обусловлена вертикальной составляющей прямой солнечной радиации E, измеренной пиргелиометром. Таким образом:

$$E \cdot \sin h = (V_{un} - V_s) \cdot k \qquad (7.9)$$

или:

$$k = (S \cdot \sin h) / (V_{un} - V_s) \qquad (7.10)$$

где E – прямая солнечная радиация измеренная пиргелиометром (Вт/м^2); V_{un} – сигнал на выходе пиранометра без затенения, мкВ; V_s – сигнал на выходе пиранометра при затенении, мкВ; h – высота Солнца в момент измерений; k – калибровочный коэффициент калибруемого пиранометра (Вт/м^2 · мкВ), представляющий собой величину, обратную чувствительности, выражаемой в (мкВ/Вт · м^2).

Если в процессе измерений значения прямой и рассеянной радиации меняются в ходе сравнений, то для обеспечения репрезентативности данных рекомендуется произвести соответствующие выборки и осреднения, что особенно важно при поочередных измерениях незатененным и затененным одним и тем же пиранометром.

Для снижения погрешностей, обусловленных недостаточной репрезентативностью измеренных сигналов, рекомендуется выполнять учащенные серии. При обработке используют интерполированные значения показаний пиранометра. Поскольку при измерения суммарной и рассеянной радиации, выполняемых одним и тем же пиранометром, нулевые показания различаются несущественного, в уравнении (7.10) учитывать их нет необходимости.

7.3.1.3 Поочередная калибровка двух пиранометров с использованием пиргелиометра

При этом способе используется пиргелиометр и два пиранометра, которые требуется калибровать (Forgan, 1996). По этому способу два калибруемых пиранометра поочередно затеняются и освещаются солнцем. В ходе проведения серии снимаются несколько групп отсчетов, каждая из которых выполняется в следующем порядке: в первой групп один пиранометр (пиранометр А) не затенен и измеряет сигналы суммарной радиации (V_{gA}), а другой пиранометр (пиранометр В) затенен и измеряет сигналы рассеянной радиации (V_{dB}). Эти сигналы измеряются синхронно с измерением прямой солнечной радиации пиргелиометром. Затем аналогичным образом проводятся измерения во второй группе, при которых пиранометры меняются ролями: пиранометр А затенен и теперь измеряет сигналы рассеянной радиации (V_{dA}), а пиранометр В не затенен и измеряет сигналы суммарной радиации (V_{gB}). И т. д. до окончания серии. По этому методу проводится калибровка обоих пиранометров путем одновременного решения уравнений, аналогичных уравнению 7.7. При обработке делается допущение, что для каждого пиранометра коэффициенты калибрации рассеянной радиации (k_d) и суммарной радиации (k_g) являются одинаковыми и коэффициент калибрации пиранометра А выражается в:

$$k_A = k_{gA} = k_{dA} \qquad (7.11)$$

при таком же допущении аналогично для коэффициентов пиранометра В.

Тогда для времени t_0 в первый период измененный вариант уравнения 7.7 является следующим:

$$E(t_0)\sin(h(t_0)) = k_A V_{gA}(t_0) - k_B V_{dB}(t_0) \qquad (7.12)$$

Для времени t_1 после смены пирагнометров:

$$E(t_1)\sin(h(t_1)) = k_B V_{gB}(t_1) - k_A V_{dA}(t_1) \qquad (7.13)$$

Поскольку единственными неизвестными в уравнениях 7.12 и 7.13 являются k_A и k_B, их можно получить для показателей для времени (t_0, t_1). Два показателя, охватывающие некоторый диапазон высоты солнца, обеспечивают характеристики направленной чувствительности приборов. Итоговая информация калибровки для обоих пиранометров является репрезентативной в отношении суммарных коэффициентов калибровки и дает практически ту же информацию для метода 7.3.1.1, но при этом отсутствует необходимость в откалиброванном пиранометре.

Как и в методе 7.3.1.1, для получения коэффициентов с минимальной погрешностью этот метод поочередности требует, чтобы сигналы пирانометов были скорректированы для уменьшения влияния изменений радиации, произошедших при измерениях. Для снижения погрешностей в результате изменения характеристик, связанных с ориентацией, рекомендуется использовать два пиранометра той же самой модели и два наблюдения при $\sin h\,(t_0) \sim \sin h\,(t_1)$.

Этот метод идеально подходит к проведению автоматического полевого мониторинга путем непрерывных синхронных измерений прямой солнечной, рассеянной и суммарной радиации. Согласно имеющемуся опыту, сбор данных, необходимых для применения этого метода, может проводиться в течение одного дня при замене приборов в период нахождения солнца в верхней кульминации (в истинный полдень). Вместе с тем, на полевой станции можно использовать длительные периоды и дни с любой конфигурацией приборов для отбора данных при условии, что у пиргелиометра калибровка не просрочена.

7.3.1.4 Сравнения с по эталонным пиранометром

Как указано в ISO (1992b), этот метод заключается в одновременной работе в естественных условиях двух пиранометров (эталонного и подлежащего калибровке), установленных горизонтально рядом друг с другом, в течение достаточно продолжительного времени для получения репрезентативных результатов. Если приборы однотипны при одинаковой конфигурации для мониторинга, для сравнений достаточно одного-двух дней. Чем больше разница в типах приборов, тем больший период требуется для сравнений. Однако продолжительный период может быть заменен несколькими более короткими, включающими типичные природные условия (ясное небо, переменная облачность, сплошная облачность, дождь, снегопад и т. д.). Отклонение калибровочного коэффициента испытываемого пиранометра определяется непосредственно, однако в случае пиранометров различающихся типов результирующая погрешность скорее всего отражает различие в особенностях типов, а не стабильность проверяемого прибора. Отбор данных следует производить, когда солнечная радиация достаточно велика при небольших колебаниях. Каждое среднее значение соотношения R чувствительности испытываемого прибора к чувствительности эталонного прибора может быть использовано для расчета $k = R \cdot r$, где k_r – калибровочный коэффициент эталона и k – определяемый калибровочный коэффициент. Сбор данных может производиться в периоды флуктуаций солнечной радиации при условии, что время между изменениями меньше, чем постоянная времени 1/e пиранометров.

Средняя температура приборов или температура окружающей среды регистрируется в течение всех калибровочных работ в естественных условиях, с тем чтобы учитывать температурное влияние.

7.3.1.5 Сравнения в лабораторных условиях

Существуют два метода, в которых в качестве источника света используется искусственное освещение в лаборатории, обеспечивающее либо прямую, либо рассеянную радиацию. В обоих случаях проверяемый и эталонный пиранометры устанавливаются в одинаковых условиях экспозиции.

По одному из методов, освещение производится стабилизированной вольфрамовой лампой накаливания, установленной на конце оптической скамьи. Подходящим источником является галогенная лампа мощностью 0,5 – 1 кВт, вмонтированная в держатель с водяным охлаждением и принудительной вентиляцией. Ее излучение ограничивается солнечным спектром с помощью кварцевого окна. Такая лампа может использоваться, если эталон и калибруемый приборы характеризуются одинаковой спектральной чувствительностью. В общем случае может быть использована ксеноновая лампа высокого давления со светофильтрами, обеспечивающими спектральный состав ее излучения, близким к солнечному. В процессе калибровки устраняются потоки, отраженные окружающими объектами, с помощью черных экранов. Обычно при этом радиацию, создаваемую лампой, поочередно измеряют эталонным и калибруемым пиранометрами, которые устанавливают точно в одном и том же месте. Повторяемость рядов данных при таком способе обеспечивается с высокой точностью (с погрешностью порядка 0,5 %).

При втором методе используется интегрирующая камера в форме сферы или полусферы, внутренняя поверхность которой покрыта диффузной белой краской с высокой отражательной способностью. Внутри камера освещается лампами (например, вольфрамовыми), и в ней располагают калибруемый и эталонный пиранометры. Поскольку сфера или полусфера имитируют небо с примерно равномерным зональным распределением яркости, при измерениях преобладают погрешности прибора относящиеся к углам падения радиационных потоков менее 45°. Так как косинусная погрешность при таких углах, как правило низкая, повторяемость результатов измерений с помощью интегрирующей сферы получается при отклонениях от среднего в пределах ±0,5 %. К источникам, используемым для освещения сферы, предъявляются такие же требования, как и в первом методе.

7.3.1.6 Регулярный контроль калибровочных коэффициентов

Существует несколько способов проверки постоянства метрологических характеристик пиранометров, зависящих от соответствующего оборудования на станции. Необходимо пользоваться любой возможностью проверки пиранометров в полевых условиях.

На тех полевых станциях, где имеются надежные эталоны (пиргелиометры или пиранометры), могут быть использованы методы калибровки, рассмотренные выше. При отсутствии эталонов могут использоваться другие методы. Если на станции одновременно проводится регистрация также и прямой солнечной радиации, то анализируются две записи аналогично изложенному в разделе 7.3.1.2. Такую простую проверку следует проводить часто.

При одновременной регистрации суммарной и рассеянной радиации часто анализируются две

записи определения согласованности. В условиях сплошной облачности суммарная и рассеянная радиация должны быть одинаковыми, и эти периоды можно использовать, когда для мониторинга рассеянной радиации используется постоянно затеняемый пиранометр. При использовании затеняющих колец рекомендуется убирать кольцо, чтобы пиранометр, измеряющий рассеянную радиацию, измерял суммарную радиацию без экранирования участка неба, и его данные можно было бы сопоставлять с одновременно получаемыми данными незатеняемого пиранометра, измеряющего суммарную радиацию.

Запись выверяется с помощью передвижного рабочего эталона, полученного с центральной сетевой станции или с ближайшей станции. И наконец, если калибровка производится не на станции, пиранометр можно просто заменить другим прибором, полученным с калибровочной станции. Любой из последних двух методов следует использовать по крайней мере раз в год. Пиранометры, измеряющие отраженную солнечную радиацию, обращаются приемной поверхностью вверх и проверяются рассмотренными методами.

7.3.2 Характеристики пиранометров

Для достижения желаемых норм точности необходимо соблюдать особую тщательность и уделять внимание деталям. Следует проводить оценку метрологических характеристик пиранометров и систем измерения, чтобы можно было оценить погрешность окончательных результатов. Например, было отмечено, что при непрерывной регистрации суммарной радиации без изменений рассеянной радиации и прямой солнечной радиации, дневные суммы, полученные с погрешностью менее 5 %, говорят о нормальной и точной работе пиранометра. Подобным же образом, при использовании протокола, схожего с протоколом, предложенным WMO (1998), погрешности дневных сумм могут составлять порядка 2 %.

7.3.2.1 Установка датчика в горизонтальном положении

Для проведения точных измерений суммарной радиации с помощью пиранометра важен контроль горизонтальности расположения приемной поверхности, например, с помощью уровня. Правильность уровня можно проверить в лаборатории на оптическом столе с использованием коллимированного пучка света лампы под углом 20°. Установочные винты пиранометра регулируются до тех пор, пока приемная поверхность пиранометра не примет такое положение, при котором при вращении его по азимуту положение остается горизонтальным. Затем в случае необходимости уровень перенастраивается для показания горизонтальности. Это называется радиометрической установкой в горизонтальное положение, и она подобна физической установке в горизонтальное положение приемной поверхности. Однако она будет неточной, если состояние поверхности термобатареи неоднородно.

7.3.2.2 Изменение чувствительности, обусловленное колебаниями температуры окружающей среды

В приборах на термобатареях отмечаются изменения чувствительности, связанные с колебаниями температуры прибора. Некоторые приборы снабжены схемами температурной компенсации для поддержания постоянной чувствительности в широком температурном диапазоне. Температурный коэффициент чувствительности может быть измерен в термокамере. Температура в камере изменяется ступенчато с шагом 10 °C в исследуемом диапазоне и удерживается постоянной на каждой ступени до стабилизации чувствительности прибора. По измеренным данным строится кривая зависимости показания от температуры. Если максимальная процентная разница, обусловленная зависимостью чувствительности от температуры внешней среды, составляет 2 % или более, коррекция проводится на основе аппроксимации данных.

В случае отсутствия температурной камеры может быть применен метод стандартизации с помощью пиргелиометров (см. разделы 7.3.1.1, 7.3.1.2, 7.3.1.3) при различной температуре окружающей среды. Необходимо отметить также тот факт, что не только температура, но и, например, косинусная характеристика (а именно влияние высоты Солнца) и нелинейность, проявляющаяся при изменениях величины измеряемой радиации, могут влиять на чувствительность.

7.3.2.3 Изменение чувствительности в зависимости от ориентации

Калибровочный коэффициент пиранометра может быть совершенно другим, если прибор используется при ориентации по азимуту, отличной от той, в которой он был калиброван. Исследование влияния ориентации на показания пиранометров может проводиться в лаборатории или с помощью метода стандартизации (см. раздел 7.3.1.1 или 7.3.1.2). Рекомендуется калибровать пиранометр при той ориентации, при которой он будет использоваться. Не рекомендуется коррекция, если характеристики чувствительности прибора не были определены при разнообразных условиях.

7.3.2.4 Изменение чувствительности в зависимости от угла падения солнечных лучей

Зависимость чувствительности пиранометра от высоты Солнца и азимута известны как косинусная характеристика и азимутальная характеристика соответственно. В идеальном случае чувствительность приемника к солнечной радиации должна быть пропорциональна косинусу зенитного угла солнечного луча и постоянна для всех азимутальных углов. Для пиранометров рекомендуется, чтобы косинусная погрешность (или процентная разница от идеальной косинусной чувствительности) была определена по крайней мере для двух углов высоты Солнца, предпочтительно для 30 и 10°. В таблице 7.5 приведен рекомендуемый способ задания направленной чувствительности и указаны допустимые погрешности.

Для определения изменения чувствительности в зависимости от угла падения солнечных лучей могут быть использованы искусственные источники света, поскольку спектральное распределение солнечной радиации изменяется в зависимости от высоты солнца. Таким образом, при использовании Солнца в качестве источника могут наблюдаться значительные изменения чувствительности в зависимости от высоты Солнца, что в действительности является изменением, обусловленным неоднородностью спектральной чувствительности.

7.3.2.5 Погрешности определения часовых и суточных сумм

Поскольку большинство пиранометров в сети используются для определения часовых или суточных сумм радиации (или средних значений за эти интервалы времени), ясно, что погрешности этих значений играют важную роль.

В таблице 7.5 приведены максимальные отклонения от истинного значения, за исключением калибровочных погрешностей. Из таблицы видно, что пиранометры в третьей графе (т. е. пиранометры посредственного качества) не могут быть использованы для определения часовых и суточных сумм, хотя их можно использовать для определения месячных и годовых сумм.

7.3.3 Установка и техническое обслуживание пиранометров

Место, выбранное для экспонирования пиранометра, не должно должно экранироваться окружающими объектами в любой момент каждого времени года. В то же время должен быть обеспечен доступ к прибору.

В частности, пиранометр нельзя устанавливать вблизи построек, оград и пр., отражающих на прибор солнечные и рассеянные лучи и/или затеняющих горизонт.

В большинстве случаев плоская крыша является хорошим местом для размещения пиранометра. Если это невозможно, то пиранометр устанавливают на определенном расстоянии от мешающих объектов, с тем чтобы для пиранометра закрытость горизонта, особенно в азимутальных направлениях восхода и захода солнца, не превышала 5°

Сумма телесных углов экранирования пиранометра из других направлений не должна превышать 0,5 ср. В случае, если это невозможно, в техническом деле станции на графике закрытости горизонта должны быть нанесены все мешающие объекты, а также указаны их угловые и линейные размеры, функциональное назначение.

В случае необходимости изменения места расположения пиранометра и/или существенных изменений расположения мешающих объектов необходимо провести обследование места наблюдения перед новой установкой пиранометра.

Для этого успешно используется обзорная камера, которая показывает линии азимутальных направлений и угловой высоты на негативе изображения. Серии экспонирования проводятся с целью их идентификации относительно плоскости приемной поверхности пиранометра. в диапазоне азимутальных направлений 360°. В случае отсутствия обзорной камеры угловой контур препятствий (заграждающих объектов) может быть отображен с помощью теодолита или системы комбинации компаса и клинометра.

В описании станции должны указываться высота пиранометра над уровнем моря (как сумма высоты станции и высоты пиранометра над землей), географические долгота и широта. Весьма полезно также иметь план площадки в масштабе с указанием расположения самописца, пиранометра и всех соединительных кабелей.

При выборе места одним из важных критериев является возможность проведения частого контроля приборов. Весьма желательно, чтобы пиранометры и самописцы проверялись по крайней мере ежедневно, а по возможности, и чаще.

Вышеизложенные рекомендации относятся в равной степени к экспонированию пиранометров на судах, вышках и буях. Экспонирование пиранометров в таких условиях затруднено и не всегда безопасно. В редких случаях прибор можно установить так, чтобы он не подвергался влиянию хотя бы

одного препятствия (например, вышки). Вследствие колебаний такого типа площадок пиранометры подвержены волновому движению и вибрации. Необходимо принимать меры предосторожности, чтобы сохранять плоскость датчика в горизонтальном положении и демпфировать сильные колебания. Для этого требуется устанавливать пиранометр на специальном универсальном шарнире.

7.3.3.1 Поправки на закрытость горизонта

Если на пути прямого солнечного луча (легко обнаруживаемого в безоблачный день) имеется препятствие, запись должна корректироваться при любой возможности в целях снижения погрешности измерений.

Коррекция на экранирование рассеянной составляющей записи может осуществляться только в случае наличия раздельных записей суммарной и рассеянной радиации. Методика предусматривает, чтобы первой корректировалась рассеянная радиация, а затем – суммарная. Оценивается не часть затененного неба, а исходящей от нее части радиации. Установлено, что поток излучения, падающий под углом менее 5°, вносит незначительный вклад в суммарную радиацию, составляющий менее 1 %, и таким эффектом обычно можно пренебречь. Особое внимание уделяется экранирующим предметам с угловыми размерами 10° и более, а также и тем, которые в какое-либо время преграждают путь солнечному лучу. Кроме того, нельзя забывать о том, что светлоокрашенные предметы могут отражать солнечную радиацию на приемник.

Строго говоря, при определении поправок на потери рассеянной радиации неба, обусловленные экранированием, необходимо учитывать колебания радиации неба от всей небесной полусферы. Однако практика показывает, что радиация одинакова во всех участках неба. Для определения уменьшения рассеянной радиации из-за экранирования объектами конечного размера может быть использована следующая формула:

$$\Delta E_{\mathrm{sky}} = \pi^{-1} \int_{\Phi} \int_{\theta} \sin\theta \cos\theta d\,\theta d\,\varphi \qquad (7.14)$$

где θ – угол падения потока; φ – азимутальный угол; Θ – угловой размер объекта по вертикали (по высоте); Φ – угловой размер объекта по азимуту.

Эта формула подходит только для препятствий с обращенной к пиранометру черной поверхностью. Для других объектов поправка должна быть умножена на редукционный множитель, зависящий от отражательной способности объекта. Яркий блеск снега под лучами низкого Солнца может привести даже к противоположному знаку поправки.

7.3.3.2 Установка пиранометров для измерения суммарной радиации

Пиранометр надежно крепится к соответствующему монтажному столу через отверстия, предусмотренные в треногах или опорной плите. Следует принять необходимые меры предосторожности, чтобы во время установки не подвергать прибор механическим ударам или вибрации. Установка осуществляется следующим образом. Первоначально пиранометр устанавливается так, чтобы выходные клеммы или соединитель были направлены к северу от приемной поверхности. Это уменьшает нагрев электрических соединений Солнцем. Приборы с термобатареями Моля-Горчинского устанавливаются таким образом, чтобы линия спая термопар (длинная сторона прямоугольной термобатареи) проходила с востока на запад. Такая ориентация прибора несколько противоречит первой, в зависимости от типа прибора, но имеет свое преимущество, поскольку при необходимости соединительные линии могут быть затенены. Если поблизости находятся вышки, прибор можно установить как можно дальше от вышки в направлении к экватору.

Радиация, отраженная от земли или основания, не должна облучать корпус прибора снизу. Можно использовать цилиндрическое затеняющее устройство, но необходимо поддерживать условия естественной вентиляции, чтобы корпус прибора находился при температуре окружающей среды.

Затем пиранометр необходимо слегка закрепить крепежными винтами или болтами и установить в горизонтальном положении с помощью установочных винтов и уровня. После этого крепежные винты следует затянуть, не нарушая при этом горизонтальности, контролируемой по уровню.

Монтажный стол или платформа должны быть достаточно прочны и устойчивы с целью защиты прибора от сильных ударов и удержания приемной поверхности в горизонтальном положении, особенно во время сильных ветров и мощных потоков солнечной энергии.

Кабель, соединяющий пиранометр с самописцем, должен иметь две жилы и быть водонепроницаемым. Кабель должен быть прочно прикреплен к монтажному столу во избежание нарушения контакта в ветреную погоду. По возможности, кабель должен быть надежно заземлен и проложен под землей, если самописец располагается на расстоянии. Рекомендуется использовать экранированный кабель. Пиранометр, кабель и самописец должны иметь общую «землю» через проводник низкого сопротивления. Как в любом термоэлектрическом устройстве, перед пайкой

необходимо проверить, чтобы во всех местах пайки было соединение медь-медь. Все открытые соединения должны быть водонепроницаемыми и защищены от физических повреждений. После проверки полярности цепи другой конец кабеля может быть соединен с системой сбора данных согласно существующей инструкции.

7.3.3.3 Установка пиранометров для измерения рассеянной радиации

Для измерения или регистрации только рассеянной радиации чувствительный элемент должен быть защищен от прямой солнечной радиации затеняющим устройством. При непрерывной регистрации пиранометр обычно затеняется либо небольшим металлическим диском, удерживаемым на пути солнечного луча с помощью солнечного следящего устройства, либо затеняющим кольцом, укрепленным на полярной оси.

Первый метод связан с поворотом тонкого стержня с закрепленным на его конце затеняющим экраном синхронно с движением Солнца. Если слежение за Солнцем обеспечивается мотором синхронно с движением Солнца или по таблицам движения Солнца, то для обеспечения надежной работы и корректировки необходим частый контроль его работы, поскольку без этого трудно выявить бракованные записи. Системы слежения за Солнцем с солнечным ориентиром сводят к минимуму вероятность появления таких проблем.

Второй метод в целях снижения погрешностей результатов измерений рассеянной радиации требует личного внимания персонала станции и внесения соответствующих поправок с учетом эффекта экранирования зоны неба затеняющим кольцом. При этом должны учитываться зональное распределение рассеянной радиации по небу и размеры затеняющего кольца. Погрешность, вносимая затеняющим кольцом без корректировки и при корректировке, оценивается по сравнению с результатами измерений, выполняемых на следящей системе с затенением пиранометра диском. Детали конструкции затеняющего кольца и необходимые поправки приводятся в приложении 7.E.

Одним из существенных источников погрешностей в данных рассеянной радиации является нулевой сигнал пиранометра. В условиях безоблачного неба нулевой сигнал у некоторых моделей приборов эквивалентен 5 – 10 Вт/м2 и может достигать 15 % от значения рассеянной радиации. В *Руководстве по эксплуатации Опорной сети для измерения приземной радиации* (WMO, 1998) приводятся методы сведения к минимуму влияния нулевого сигнала.

Установка пиранометра для измерения рассеянной радиации подобна установке пиранометра для измерения суммарной солнечной радиации. Однако имеются определенные сложности монтажа экваториального устройства или затеняющего кольца. Расстояние от него до пиранометра, измеряющего суммарную радиацию, должно быть таким, чтобы затеняющее кольцо или диск не могли затенять этот пиранометр. Это особенно важно в высоких широтах, где высота Солнца невелика.

Так как рассеянная радиация безоблачного неба может составлять менее 1/10 суммарной радиации, особое внимание необходимо уделять порогу срабатывания регистрирующей системы.

7.3.3.4 Установка пиранометров для измерения отраженной радиации

Высота установки пиранометра над поверхностью земли должна составлять 1 – 2 м. В летнее время травяной покров должен регулярно подстригаться. Для районов, в которых бывает снежный покров, зимой необходимо предусмотреть механизм регулировки высоты пиранометра над поверхностью снега с целью сохранения постоянного расстояния от нее до пиранометра. Монтажное устройство не должно ограничивать поле зрения прибора, но должно быть сконструировано таким образом, чтобы погрешность измерений составляла менее 2 %. При подходе к пиранометру (для контроля его горизонтальности и эксплуатационного ухода) не должно нарушаться естественное состояние подстилающей поверхности под пиранометром, особенно при наличии снежного покрова.

7.3.3.5 Техническое обслуживание пиранометров

Состояние пиранометров, установленных для непрерывных измерений, должно проверяться не реже одного раза в сутки, а при выпадении гидрометеоров – чаще. Во время обследования стеклянный колпак прибора вытирают чисто и досуха (необходимо проявлять осторожность и не нарушать ход процесса измерений в дневное время). При наличии на нем смерзшегося снега, льда, инея или изморози эти отложения необходимо удалять очень осторожно с использованием специальной жидкости (антифриза) до полной очистки стеклянной поверхности. Ежесуточные проверки должны обеспечивать также поддержание прибора в горизонтальном положении, отсутствие конденсации на внутренней поверхности стеклянного колпака и ненарушенность состояния черного покрытия приемной поверхности.

На отдельных станциях стеклянный колпак пиранометра постоянно вентилируется, что предотвращает

или уменьшает количество осаждений в холодную погоду и снижает разницу в температуре между колпаком и корпусом. Разность температур между вентилирующим воздухом и воздухом окружающей среды не должна превышать 1 К. Если на колпаке появляются загрязненные участки или частицы песка, процесс протирки должен быть очень осторожным, желательно после предварительного сдува или легкого смачивания во избежание царапин на поверхности, которые могут значительно изменить прозрачность материала колпака. Сушилки должны быть наполнены активным веществом (обычно силикагелем, имеющим характерную окраску).

7.3.3.6 Установка и техническое обслуживание пиранометров на специальных платформах

Особенно тщательно следует устанавливать оборудование на различных платформах, таких как суда, буи, вышки и летательные аппараты. Датчики солнечной радиации, установленные на судах, должны быть снабжены карданными подвесами по причине быстрого перемещения платформы.

Если вышка предназначена исключительно для актинометрического оборудования, на ней должна быть смонтирована прочная платформа, на которой могут быть установлены датчики. Детали вышки, закрывающие горизонт должны находиться с северной стороны платформы, а стрелы, на которых установлены альбедометры, должны быть направлены на юг. Актинометрические датчики устанавливают как можно выше над поверхностью воды на судах, буях и вышках для защиты их от брызг.

В течение ряда лет успешно проводятся актинометрические измерения с летательных аппаратов. В этом случае необходимо особенно тщательно выбирать пиранометр и условия экспонирования.

Особое внимание следует уделять установке пиранометров, труднообслуживаемых систем в целях обеспечения надежности материалов наблюдений. Поэтому желательно предусмотреть своеобразную страховку в виде установки дублирующих систем измерений в определенных критических местах.

7.4 ИЗМЕРЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОЙ И ДЛИННОВОЛНОВОЙ РАДИАЦИИ

Измерение интегральной по спектру радиации включает измерение одновременно коротковолновой солнечной радиации (300 – 3 000 нм) и длинноволновой радиации земной поверхности и атмосферы (3 000 – 100 000 нм). Для таких измерений используются пиррадиометры. Они могут использоваться для измерения как приходящей, так и уходящей радиации, а с помощью пары пиррадиометров можно измерить разность их, т. е. радиационный баланс. Для измерения радиационного баланса также используется один пиррадиометр, имеющий два приемника, один из которых обращен вверх, а другой – вниз. Такой датчик должен быть неселективным во всем спектральном диапазоне от 300 до 100 000 нм.

Измерения длинноволновой радиации могут осуществляться либо непосредственно с помощью пиргеометров, либо косвенно, путем вычитания коротковолновой радиации из интегральной.

Большинство пиргеометров исключают коротколновую радиацию с помощью фильтров, имеющих близкую прозрачность в длинноволновой области спектра и непрозрачных в области 300 – 3 000 нм.

Некоторые пиргеометры, не имеющие фильтров или с фильтрами, не исключающими радиацию в области менее 3 000 нм, могут использоваться только в ночное время.

Длинноволновая радиация L^-, измеряемая пиргеометром или пиррадиометром, имеет два компонента: значение радиации, определяемое по непосредственным показаниям прибора без учета собственного излучения; радиация, создаваемая зависящим от температуры излучением абсолютно черного тела, которое предполагается у приемной поверхности пиргеометра:

$$L^- = L^* + \sigma\, \sigma\, T_S^4 \qquad (7.15)$$

где – постоянная Стефана-Больцмана (5,670 4 · 10^{-8} Вт/м^2 · К); T_s – температура приемной поверхности пиргеометра (К); L^- – энергетическая освещенность, либо измеряемая с помощью эталонного пиргеометра, либо вычисляемая по температуре черной полости над верхним L^* – радиация, измеренная приемником (Вт/м^2). Измерение коротковолновой составляющей пиррадиометром – согласно изложенному в 7.3.

7.4.1 Приборы для измерения длинноволновой радиации

За последнее десятилетие достигнут значительный прогресс в измерениях земной радиации с помощью пиргеометров, в особенности с появлением пиргеометров с кремниевым колпаком, которые обеспечивают измерения земной радиации с относительно высокой точностью. Тем не менее, измерение земной радиации продолжает оставаться наиболее

трудным и менее изученным, чем измерение солнечной радиации. Анализ источников погрешностей приводится в таблице 7.6, где также приводятся ошибки погрешности общие как для пиргеометров, так и для пиррадиометров.

Разработаны пиргеометры двух типов: в первом типе приборов приемная поверхность термобатареи покрывается полусферическим колпаком, внутри которого размещается интерференционный фильтр; во втором типе термобатарея покрывается плоской пластиной, на которой размещается интерференционный фильтр. В обоих случаях поверхность, на которой размещается интерференционный фильтр, сделана из кремния. Первый тип прибора обеспечивает поле зрения в полной полусфере, тогда как второй имеет поле зрения 150°, при этом полусферический поток моделируется согласно рекомендациям завода-изготовителя. Аргументом в пользу применения последнего метода является то, что размещение фильтров на внутренней поверхности полусферы приводит к более высокой погрешности, чем моделирование потока при углах падения менее 30°. Оба типа приборов действуют на том принципе, что величина, измеренная непосредственно прибором, представляет собой разность между энергетической освещенностью, создаваемой источником, и радиационной температурой черного тела прибора. В целом пиргеометр, измеряющий земную радиацию, действует по принципу, дополняющему формулу 7.15:

$$L^{-} = L^{*} + \sigma T_s^4 + k\sigma (T_d^4 - T_s^4) \qquad (7.16)$$

где k – чувствительность приемника к длинноволновой радиации (мкВ/(Вт · м$^{-2}$)); и T^d – температура приемника (К).

В сравнениях, проведенных за последнее время, участвовали приборы аналогичной конструкции в разнообразных сочетаниях измерений. Такие исследования показали, что при соблюдении тщательной поверки значения радиации, измеряемые ночью, согласуются с погрешностью в пределах 2 %. Однако при наличии значительной солнечной радиации различия между приборами могут быть существенными. Причиной такого большого несоответствия является то, что кремниевый колпак с интерференционным фильтром может пропускать солнечную радиацию и не являться идеальным рефлектором солнечной энергии, в результате чего солнечная составляющая может доходить до приемника и происходит солнечный нагрев. Обусловленные этим погрешности могут быть уменьшены посредством затенения прибора, подобно тому как это делается при измерении рассеянной солнечной радиации, вентиляции прибора, согласно рекомендациям ИСО (1990*a*), учета температуры колпака и корпуса прибора. На основе этих и других сравнений могут быть сформулированы следующие рекомендации для измерения длинноволновой радиации:

(a) при использовании пиргеометров, имеющих контур со встроенной электрической батареей для учета излучения абсолютно черного тела на прибор, следует принимать всевозможные меры для обеспечения правильной эксплуатации этой батареи. Даже небольшое изменение в напряжении батареи значительно скажется на точности измерений. При любой возможности батарею следует извлекать из прибора и измерять температуру корпуса прибора непосредственно в соответствии с инструкцией завода-изготовителя;

(b) по мере возможности следует измерять температуру корпуса и колпака прибора и использовать ее при обработке результатов измерений;

(c) прибор должен вентилироваться;

(d) для получения наилучших результатов прибор должен быть экранирован от прямых солнечных лучей с помощью следящего за Солнцем диска, как и при измерении рассеянной радиации.

Эти приборы должны проходить калибровку в национальных или региональных калибровочных центрах с использованием эталонных пиргеометров или абсолютно черных излучателей.

7.4.2 Приборы для измерения интегральной радиации

Одной из проблем приборов для измерения интегральной радиации является отсутствие абсорберов, неселективных в большом диапазоне длин волн. Также трудно найти приемлемые фильтры с постоянными характеристиками пропускания излучения в диапазоне 300 – 100 000 нм.

Использование термически чувствительных датчиков требует точного знания теплового баланса датчика. В ином случае необходимо снижать потери конвективного тепла датчика почти до нуля методом защиты датчика от прямого воздействия ветра. Технические трудности, связанные с такими потерями тепла, в значительной степени обусловлены тем, что остаточные радиационные потоки определяются менее точно, чем суммарные радиационные потоки. На практике, различные лаборатории разработали собственные пиррадиометры на технической базе, которую они считают наиболее эффективной в отношении снижения переноса конвективного тепла в датчике. За последние

Таблица 7.6. Источники погрешностей при измерениях пиррадиометрами

Источник погрешности	*Характер влияния на пиррадиометр*		*Влияние на результат измерения*	*Способ определения харктеристики*
	с входным окном	*без входного окна*		
Влияние защиты	Спектральные характеристики пропускания	Нет	(a) Изменение спектральной характеристики калибровки (b) Уменьшение радиации на приемнике, обусловленное коротко-волновым рассеянием в защитном окне (зависит от его толщины) (c) Старение и другие изменения приемника	(a) Определение спектрального ослабления защиты (b) Определение влияния рассеянной радиации или эффекта при изменениях угла падения радиации (c) Спектральный анализ; сравнения с новой защитой; определение ослабления защитой
Влияние конвекции	Изменения, обусловленные не радиационным обменом: в окружении приемник-защита (термическое сопротивление)	Изменения, обусловленные не радиационным обменом: приемник-воздух (вариации в изменениях коэффициента)	Неконтролируемые изменения, обусловленные, ветром, являются критическими при расчетах дивергенции радиационных потоков в нижних слоях атмосферы.	Исследования динамических характеристик прибора в функции температуры и скорости ветра.
Влияние гидрометео-ров (дождь, снег, изморозь и др.) и дымки	Вариации спектрального пропускания плюс не-радиационный нагрев теплопроводностью	Вариации спектральной характеристики приемника и теплопотери на испарение	Изменения, обусловленные вариациями спектральной характеристики приемника и нерадиационным переносом энергии	Исследование влияния скорости обдува при вентиляции
Свойства приемной поверхности (излучательной способности)	Зависит от спектрального поглощения черного покрытия применяемой поверхности		Изменение калибровочного коэффициента (a) Как функция спектральной чувствительности (b) Как функция величины и азимута приходящей радиации (c) Как функция влияния температуры	(a) Спектрофотометрический анализ калибровки поглощающей поверхности (b) Исследования чувствительности приемника в зависимости от угла падения радиации.
Влияние температуры	Нелинейность температурной зависимости приемника		Требуется знание температурного коэффициента	Исследование влияния скорости вентиляции на этот эффект
Эффект асимметрии	(a) Различия теплопоглощения и отражения между приемниками, обращенными вверх и вниз (b) Различия вентиляции приемников, обращенных вверх и вниз (c) Контроль и регулировка расположения поверхностей		(a) Влияние на постоянную времени прибора (b) Погрешность определения калибровочного коэффициента обоих приемников	(a) Контроль теплоемкости приемных поверхностей обоих приемников (b) Контроль постоянной времени а узких интервалах температуры

несколько десятилетий были созданы хотя и несовершенные, но основанные на надежных принципах измерения пиррадиометры. Существует целый ряд пиррадиометров, использующих различные методы устранения влияния ветра:

(a) без защиты, использование эмпирических формул для коррекции влияния ветра;
(b) определение влияния ветра путем электрического нагрева;
(c) стабилизация влияния ветра с помощью искусственной вентиляции;
(d) устранение влияния ветра путем защиты датчика от ветра.

Длинноволновый компонент описывается в 7.15.

В таблице 7.6 приводятся источники погрешностей, возникающих в ходе пиррадиометрических измерений, и предлагаются способы их определения

Трудно определить точность, достижимую на практике. Сравнения пиррадиометров различной конструкции установленных в различных местах дают результаты, различающиеся на величину от 5 до 10 % в благоприятных условиях. Для улучшения таких результатов необходимо проводить тщательные лабораторные исследования, кроме сравнений в местах установки, для того чтобы по отдельности оценить различные эффекты.

Наибольшая точность значений интегральной радиации достигается путем раздельных измерений коротковолновой и длинноволновой составляющих радиации. Коротковолновую радиацию можно измерять с использованием методик, указанных в 7.2 и 7.3, а длинноволновую радиацию можно измерять пиргеометром.

В таблице 7.7 приведены характеристики пиррадиометров различных уровней точности, а также погрешности, которые можно ожидать при проведении измерений с их помощью.

7.4.3 Калибровка пиргеометров

Пиррадиометры и балансомеры для измерения коротковолновой радиации можно поверять тем же способом, что и пиранометры (см. раздел 7.3.1) с использованием в качестве источника радиации Солнца и неба. В случае балансомера с одним приемником его поверхность, направленная вниз, облучается постоянным источником, например, камерой-излучателем с известной и постоянной температурой.

Поверку эталонных радиометров для измерения длинноволновой радиации лучше всего проводить в лабораторных условиях с помощью черных тел в виде полостей, однако для сетевых измерений предпочтительны сравнения в ночное время с эталонными приборами. В случае поверки чувствительного элемента приходящая радиация L^{-}, измеряется отдельно с помощью пиргеометра; или же с помощью камеры-излучателя с характеристиками абсолютно черного тела. В этом случае сигнал V на выходе прибора (на основании формулы 7.15) определяется по формуле

$$V = L* \cdot K \text{ or } K = V/L* \qquad (7.17)$$

где V – сигнал на выходе прибора (мкВ); K – чувствительность (мкВ(Вт/м^2)).

Рекомендуется периодически проверять чувствительность прибора в месте установки путем тщательного выбора состояния окружающей среды при медленно

Таблица 7.7. Характеристики рабочих пиррадиометров

Параметр	*Высокий класс*	*Хороший класс*	*Средний класс*
Порог чувствительности, Вт/м^2	1	5	10
Стабильность (изменение в год в процентах от полной шкалы)	2 %	5 %	10 %
Косинусная погрешность при высоте солнца 10°	3 %	7 %	15 %
Азимутальная погрешность при высоте солнца 10° (средняя, дополнительно к косинусной)	3 %	5 %	10 %
Температурная зависимость (в диапазоне от -20 до 40 °C (отклонение от среднего)	1 %	2 %	5 %
Нелинейность (отклонение от среднего)	0,5 %	2 %	5 %
Различия в интегральной спектральной чувствительности, полученной интег-рально для области длиннее 200 нм, от диапазона от 300 до 75 000 нм	2 %	5 %	10 %

изменяющихся потоках. Пиргеометры должны также периодически проходить контроль на предмет изменения пропускания коротковолновой радиации.

Симметрия балансомеров требует регулярной проверки. Это осуществляется путем переворачивания прибора или пары приборов на месте их установки и выявления каких-либо различий на выходе. Разность более 2 % от полной шкалы между двумя положениями балансомера требуют новой поверки прибора, поскольку либо скорости вентиляции, либо коэффициенты абсорбции значительно отличаются для двух приемных поверхностей. Такие же испытания необходимо проводить во время поверки балансомеров или их установки.

7.4.4 Установка пиррадиометров и пиргеометров

Пиррадиометры и пиргеометры обычно устанавливают на открытых местах или в местах, закрытость горизонта в которых не превышает 5° в любом из азимутальных направлений, во избежание экранирования солнечных лучей в любое время года, даже при низкой высоте Солнца.

Состояние прибора следует проверять ежедневно, чтобы убедиться в следующем:

(a) прибор располагается горизонтально;
(b) все приемники и средства их защиты содержатся в чистоте, на них нет росы, инея, снега или дождевой воды;
(c) колпак не запотел изнутри (всю влагу, образующуюся за счет внутренней конденсации, следует вытирать);
(d) черные поверхности приемников не имеют повреждений (благодаря чему их излучательная способность близка к 1).

Там, где используются приборы с полиэтиленовыми колпаками, необходимо время от времени также проверять, не изменило ли воздействие ультрафиолетовых лучей характеристик его пропускания. Желательно менять верхний колпак каждые полгода.

В большинстве случаев невозможно измерить напрямую отраженную солнечную радиацию и уходящую длинноволновую радиацию на уровне земной поверхности, поэтому для получения восходящих компонентов пиранометры и пиррадиометры обычно устанавливают на определенной высоте. Таким способом можно измерить всю радиацию, приходящую от поверхности под датчиком. Для пиранометров и пиррадиометров, имеющих угол зрения 2π ср и установленных на высоте 2 м над поверхностью земли, 90 % всей измеренной радиации приходит от поверхности диаметром 12 м, 95 % – от поверхности диаметром 17,5 м и 99 % – от поверхности диаметром 39,8 м при условии, что зависимость чувствительности приемника согласуется с законом Ламберта.

Интегрирование всей энергии, поступающей со сравнительно обширной круглой поверхности, целесообразно в тех случаях, когда для района наблюдений характерны большие местные вариации относительной излучающей способности, для чего балансомер устанавливается достаточно высоко над поверхностью. Это позволяет получить угол обзора, репрезентативный для данной местности. Выходной сигнал датчика, расположенного слишком близко к поверхности, будет подвергаться большому влиянию своей собственной тени, а кроме того, он будет наблюдать нерепрезентативную часть местности. С другой стороны, показания балансомера, расположенного слишком далеко от поверхности, могут быть нетипичными для длинноволнового излучения вблизи этой поверхности из-за нерегистрируемой дивергенции радиационного потока. Над невысокой однородной растительностью пиррадиометры устанавливают на высоте 2 м. Если растительность высокая, например лес, то высота установки пиррадиометров должна быть достаточной для устранения влияния неоднородности поверхности.

7.4.5 Регистрация и преобразование данных

Все, что сказано в разделе 7.1.3, применяется к пиррадиометрам и пиргеометрам. Кроме того, на показания этих радиометров могут оказывать влияние следующие факторы, которые должны регистрироваться:

(a) воздействие гидрометеоров (дождя, снега, росы, инея) на незащищенные и невентилируемые приборы;
(b) воздействие ветра и температуры воздуха;
(c) дрейф нуля измерительной системы. Это более важно для пиррадиометров, которые могут давать отрицательные значения, чем для пиранометров, у которых нулевой сигнал интенсивности излучения является характеристикой результирующей интенсивности излучения на поверхности чувствительного элемента.

Особое внимание следует обратить на расположение приборов, когда определяемая длинноволновая радиация получается путем вычитания показаний пиранометра из показаний пиррадиометра. Оба прибора должны располагаться на расстоянии 5 м друг от друга таким образом, чтобы они находились в одинаковых условиях окружающей среды.

7.5 ИЗМЕРЕНИЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ РАДИАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ

7.5.1 Измерение дневной освещенности

Освещенность создается на поверхности потоком лучистой энергии в спектральном интервале, заключенном между 380 и 780 нм, оцениваемым посредством реакции человеческого глаза на энергию в этом диапазоне длин волн. МКО определила, что максимум реакции человеческого глаза приходится на длину волны 555 нм. Относительная спектральная чувствительность стандартного человеческого глаза показана на рисунке 7.2 и приведена в таблице 7.8. Световая эффективность определяется соотношением между плотностью излучения (Вт/м^2) и излучательностью (лм). Она является функцией спектральной световой чувствительности человеческого глаза $V(\lambda)$ и константы K_m (683), показывающей количество люменов, приходящихся на 1 Вт электромагнитного излучения монохроматического источника с длиной волны 555,19 нм (точка замерзания платины):

$$\Phi_v = K_m \int_{380}^{780} \Phi(\lambda) V(\lambda) d\lambda \qquad (7.18)$$

где Φ_v – освещенность (лм/м^2, или лк); $\Phi(\lambda)$ – спектральный лучевой поток (Вт/м^2 · нм); $V(\lambda)$ – чувствительность человеческого глаза при длине волны λ; K_m – константа, соотносящая световые параметры с радиационными. Таким образом, 99 % видимой радиации лежит в диапазоне 400 – 730 нм.

Параметры и единицы световых переменных даны в приложении 7.A.

7.5.1.1 Приборы

Приборы для измерения освещенности (иллюминометры или люксметры) включают в себя фотогальванический детектор, один или несколько фильтров, позволяющих получить чувствительность, соответствующую кривой $V(\lambda)$, а также часто цепь регулирования температуры для обеспечения устойчивости сигнала. МКО разработала подробное руководство по измерению дневной освещенности (ICI, 1994), в котором описаны рекомендованная практика установки оборудования, характеристики приборов, процедуры сбора данных и контроль качества на первом начальном уровне.

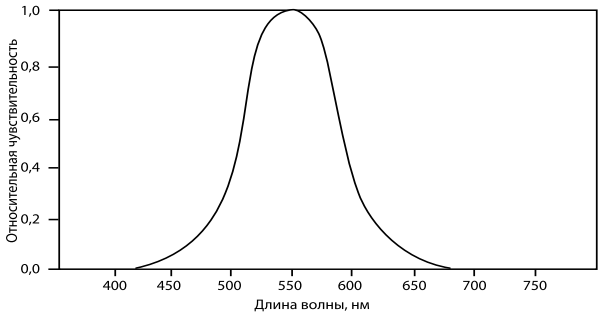


Рис. 7.2 Относительная спектральная чувствительность *V(λ)* человеческого глаза для дневного зрения

Измерение суммарной освещенности ведется параллельно с измерением суммарной солнечной радиации. Стандартный люксметр должен предусматривать регулирование температуры или коррекцию на температуру в диапазоне по крайней мере от –10 до 40 °C. Кроме того, он должен вентилироваться для предотвращения конденсации и/или нарастания льда на внешней поверхности приемника. Как

Таблица 7.8. Значения относительной спектральной световой чувствительности человеческого глаза (единица при длине волны максимальной чувствительности)

Длина волны (нм)	*Относительная чувствительность V(λ)*	*Длина волны (нм)*	*Относительная чувствительность V(λ)*
380	0,000 04	590	0,757
390	0,000 12	600	0,631
400	0,000 4	610	0,503
410	0,001 2	620	0,381
420	0,004 0	630	0,265
430	0,011 6	640	0,175
440	0,023	650	0,107
450	0,038	660	0,061
460	0,060	670	0,032
470	0,091	680	0,017
480	0,139	690	0,008 2
490	0,208	700	0,004 1
500	0,323	710	0,002 1
510	0,503	720	0,001 05
520	0,710	730	0,000 52
530	0,862	740	0,000 25
540	0,954	750	0,000 12
550	0,995	760	0,000 06
560	0,995	770	0,000 03
570	0,952	780	0,000 015
580	0,870		

правило, люксметр должен быть способен измерять освещенность в диапазоне 1 – 20 000 лк. В этом диапазоне погрешности должны оставаться в пределах, указанных в таблице 7.9. Эти значения основаны на рекомендациях МКО (ICI, 1987) в отношении погрешностей высококачественных люксметров, специально предназначенных для измерения дневной освещенности на открытом воздухе.

Рассеянная освещенность неба может измеряться способом, аналогичным при измерении рассеянной солнечной радиации. Измерения прямой солнечной освещенности должны проводиться с помощью приборов, имеющих поле зрения с половиной центрального угла приемника излучения не более 2,85° и углом скоса диафрагм приемника излучения менее 1,76°.

7.5.1.2 Поверка

Поверка люксметров должна проводиться по стандартному люксметру типа А согласно процедурам, рекомендованным МКО (ICI, 1987). Такое оборудование, как правило, имеется только в национальных лабораториях эталонов. Поверка люксметра и проверка других его характеристик должны проводиться ежегодно. Сюда должны входить также проверки старения, дрейфа нуля, механической и климатической устойчивости. Рекомендуется также, чтобы в промежутках между лабораторными поверками использовались полевые стандарты (рабочие эталоны) для поверки на каждой измерительной станции.

7.5.1.3 Регистрация и преобразование данных

МКО рекомендовала в процессе измерений освещенности регистрировать следующие характеристики:

(a) суммарную и рассеянную дневную освещенность горизонтальных и вертикальных поверхностей;

Таблица 7.9. Характеристики люксметров

Параметр	*Погрешность, %*
V(λ), не более	2,5
Чувствительность к УФ излучению	0,2
Чувствительность к инфракрасному излучению	0,2
Косинусная характеристика	1,5
Усталость при 10 клк	0,1
Температурный коэффициент	0,1 K^{-1}
Нелинейность	0,2
Время срабатывания	0,1 с

(b) прямую солнечную освещенность;

(c) яркость неба в телесных углах в границах 0,08 ср (примерно 10° · 10°) небосвода;

(d) альбедо в видимой области спектра таких характерных поверхностей, как трава, земля, снег и т. д.

Зачастую требуются часовые и суточные суммы освещенности. Для представления данных о яркости весьма полезны стереографические карты с изолиниями равной яркости.

7.6 ИЗМЕРЕНИЕ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО (УФ) ИЗЛУЧЕНИЯ

Измерения солнечного ультрафиолетового излучения требуются в связи с его влиянием на окружающую среду и здоровье человека, а также ввиду увеличения УФ излучения у поверхности Земли в результате разрушения озонового слоя (Kerr and McElroy, 1993). Спектр ультрафиолетового излучения условно разделен на три части:

(a) УФ-А – это излучение в полосе длин волн 315 – 400 нм, т. е. непосредственно за пределами видимого спектра. Оно менее биологически активно, и его интенсивность у поверхности Земли не изменяется в зависимости от содержания озона в атмосфере;

(b) УФ-В – это излучение в полосе 280 – 315 нм. Оно биологически активно, и его интенсивность у поверхности Земли зависит от содержания озона в атмосфере, а также в определенной степени и от длины волны. Частым проявлением его биологической активности является эритемный эффект, т. е. в какой степени это излучение вызывает покраснение белой кожи человека;

(c) УФ-С – это излучение с длинами волн 100 – 280 нм. Оно полностью поглощается в атмосфере и в естественных условиях не достигает поверхности Земли.

Наибольший интерес к измерениям УФ-излучения сосредоточен на полосе УФ-В. Часто применяемым, но нестандартным определением границы между УФ-А и УФ-В является длина волны 320 нм вместо 315 нм.

Измерение ультрафиолетового излучения затруднено в связи с небольшим количеством энергии, достигающей поверхности Земли, изменчивостью содержания озона в стратосфере и быстрым увеличением потоков с длиной волны. На рисунке 7.3 показаны изменения показан спектральный состав ультрафиолетовой энергетической освещенности (Вт/м^2 · нм) в интервале между 290 и 325 нм на

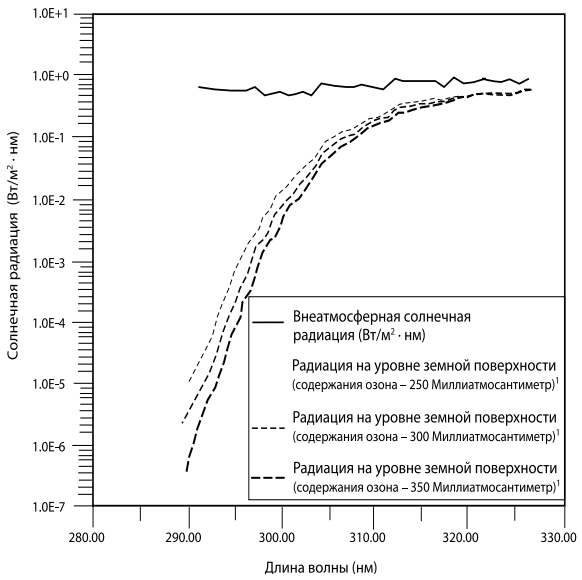


Рис. 7.3. Результаты расчетов по модели, иллюстрирующие влияние изменения содержания озона на пропускание УФ-В атмосферой

верхней границе атмосферы и у поверхности. На суммарную ультрафиолетовую энергетическую освещенность оказывают влияние облака и, в меньшей степени, атмосферные аэрозоли. Большое влияние оказывает также подстилающая поверхность вследствие многократного рассеяния падающего на нее излучения, особенно в районах, покрытых снегом.

Трудности в стандартизации измерений ультрафиолетового излучения обусловлены разнообразием областей, в которых они используются. В отличие от большинства метеорологических измерений, здесь еще не достигнуты стандарты, основанные на глобальных потребностях. Во многих странах измерения УФ излучения проводятся не метеорологическими службами, а органами здравоохранения или охраны окружающей среды. Это приводит к дополнительным трудностям в стандартизации приборов и методов наблюдений.

Были разработаны руководства и стандартные процедуры по методам определения характеристик и калибровке спектрорадиометров УФ излучения и радиометров с фильтром УФ излучения, используемых для измерения солнечного излучения УФ диапазона (см. WMO 1996; 1999*a*; 1999*b*; 2001). Применение рекомендуемых процедур для обеспечения качества данных на станциях размещения приборов измерения солнечной радиации обеспечит создание ценной базы данных УФ излучения. Это необходимо для проведения исследований климатологических аспектов УФ излучения в пространстве и времени в контексте структуры изменения климата Земли. В этих документах также приводятся рекомендации для измерительных станций и технические характеристики приборов. Требования в отношении измерений в области УФ-В приводились в Программе ГСА ВМО (WMO, 1993b и WMO, 2001) и изложены в таблице 7.10

Ниже для общей информации приведено описание типов приборов, которое окажет содействие в выборе необходимого инструментария.

7.6.1 **Приборы**

Для измерения энергетической освещенности (радиации), создаваемой потоками ультрафиолетового излучения, выпускается три общих типа приборов. Первый класс приборов использует широкополосные фильтры. Эти приборы измеряют в спектральных участках УФ-В, УФ-А, либо по всему широкополосному ультрафиолетовому спектру, влияющему на здоровье человека. Второй класс приборов использует один или несколько интерференционных фильтров для в дискретный участках спектра УФ-А и/или УФ-В. Третий класс приборов представляет собой спектрорадиометры, которыми последовательно измеряет радиацию в определенных спектральных полосах.

Таблица 7.10. Требования к спектральным измерениям радиации в области УФ-В

УФ-В
1. Спектральное разрешение – 1 нм или лучше
2. Разрешение во времени – 10 мин или лучше
3. Угловое разрешение – разделение на прямую и рассеянную составляющие
4. Стратегия калибровки
Вспомогательная информация
(a) *Требуемая*
1. Общее содержание озона (в столбе 100 км)
2. Оптическая плотность аэрозоля
3. Альбедо подстилающей поверхности
4. Облачность
(b) *Рекомендуемая*
1. Аэрозоли; профиль по ЛИДАРу
2. Вертикальное распределение озона
3. Яркость неба
4. Суммарная солнечная радиация
5. Поляризация света в зените
6. Общее содержание воды в атмосфере

[1] О величинах, характеризующих содержание атмосферного озона и единицах измерений см. гл.16 этой части Руководства

7.6.1.1 Широкополосные датчики

Широкополосные датчики предназначены в основном для измерения во взвешенном ультрафиолетовом спектре с использованием эритемной функции, предложенной McKinlay и Diffey (1987) (рисунок 7.4). Еще одним рабочим спектром, используемым в некоторых других приборах, является спектр Parrish, Jaenicke and Anderson (1982). Два метода (и их вариации) используются для выполнения этого приборного взвешивания.

Наиболее распространенное средство получения эритемного взвешивания состоит, во-первых, в отфильтровывании почти всех волн видимого спектра с использованием светофильтров, пропускающих УФ излучение. Пропущенное излучение направляется на чувствительный к ультрафиолетовому свету фосфор. Зеленый свет, излучаемый фосфором, в свою очередь вновь фильтруется с использованием светофильтров из цветного оптического стекла для удаления любого незеленого видимого света перед облучением им мышьяково-галлиевого или мышьяково-галлиевого-фосфорного фотодиода. Качество прибора зависит от таких параметров, как качество наружного защитного кварцевого колпака, косинусная характеристика прибора, температурная зависимость и обеспеченность изготовителем соответствия эритемной кривой путем сочетания спектральный характеристик светофильтров и диода. Исключительно важна термостабилизация не только электронной, но и оптической частей прибора, поскольку реакция фосфора на УФ радиацию зависит от температуры.

Эффективность излучения фосфора уменьшается приблизительно на 0,5 % $К^{-1}$, а его кривая спектральной чувствительности смещается в сторону более

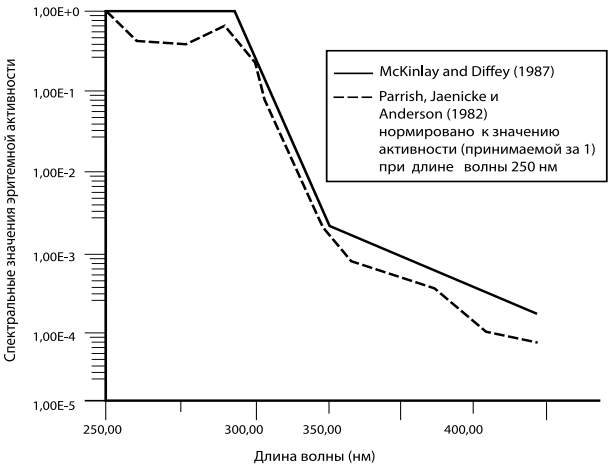


Рис.7.4 Графики спектрального распределения эритемной активности радиации, представленное Parrish, Jaenicke и Anderson (1982) и McKinlay и Diffey (1987)

длинных волн приблизительно на 1 нм на каждые 10 К. Этот эффект особенно важен в связи с крутизной кривой излучения в этом спектральном интервале.

В последнее время разработаны приборы для измерения эритемной взвешенной УФ энергетической освещенности с использованием технологии тонкопленочных металлических интерференционных фильтров и специально разработанных кремниевых фотодиодов. Это позволило преодолеть многие трудности, связанные с фосфорной технологией, но возникла новая проблема, обусловленная очень низкими уровнями сигнала фотодиода.

Другие широкополосные приборы используют ту или иную технологию для измерений в полном ультрафиолетовом спектре с использованием сочетаний стеклянных, либо интерференционных светофильтров. Ширина полосы пропускания не превышает 20 – 80 нм ПШПМ (полуширина пропускания) для приборов, измеряющих сочетание УФ-А и УФ-В радиации. Некоторые заводы-изготовители снабжают приборы простыми алгоритмами для аппроксимации эритемной дозы на основе невзвешенных измерений.

Техническое обслуживание таких приборов заключается в обеспечении чистоты наружных колпаков, горизонтальности прибора поддержании функционирования осушителя (если предусматривается) и системы теромстабилизации. Другие требования к обслуживанию прибора аналогичны требованиям для пиранометра.

7.6.1.2 Узкополосные датчики

Понятие об узости полосы для этой классификации приборов довольно расплывчато. Самая широкая полоса для приборов этой категории составляет 10 нм ПШПМ. Самая узкая полоса для приборов, выпускаемых в настоящее время, составляет порядка 2 нм ПШПМ.

У этих датчиков для получения информации об участке УФ спектра используются один или несколько интерференционных фильтров. Самые простые приборы обычно состоят из одного фильтра, пропускающего длину волны, которая может быть измерена высококачественным фотодиодом, чувствительным к УФ излучению. Типичными для таких приборов являются длины волн вблизи 305 нм. Непрозрачность таких фильтров должна быть равной или больше 10^{-6} по всей чувствительной зоне детектора. Лучшие приборы этого типа имеют термоэлектрическое охлаждение на основе эффекта Пельтье, обеспечивающее поддержание постоянной температуры около 20 °С, либо нагреватели для повышения температуры фильтра и диода

выше нормальной обычно до 40 °C. Однако в таких условиях существенно уменьшается срок службы интерференционных светофильтров. В другой модификации прибора этого типа вместо фотодиода используется электронный фотоумножитель, имеющий существенно более высокую чувствительность, что позволяет низкие уровни энергетической освещенности, особенно в области самых коротких волн.

Изготовители приборов с количеством светофильтров более одного, часто рекомендуют метод восстановления полного УФ спектра с помощью моделируемых соотношений, определяемых в пределах измеренных длин волн. Приборы, работающие на одной длине волны, используются также как вспомогательные для обеспечения временно́го и пространственного обобщения данных более сложных спектрометров или для долговременного точного мониторинга данных в конкретных спектральных полосах с целью обнаружения тенденций их изменений.

Конструкция прибора должна быть такой, чтобы излучение проходило через светофильтры практически перпендикулярно во избежание сдвига длин волн в более коротковолновую область. Например, отклонение угла падения света на 10° от перпендикулярного может вызвать сдвиг длины волны на 1,5 нм в зависимости от коэффициента преломления фильтра. Влияние температуры может оказаться также значительным и выражаться в сдвиге центральной длины волны примерно на 0,012 нм K^{-1} для очень узкополосных фильтров (менее 1 нм).

Обслуживание простых однофильтровых приборов аналогично обслуживанию широкополосных приборов. Обслуживание приборов, имеющих несколько фильтров, смонтированных на движущейся опоре, должно включать определение правильного положения ее в пространстве. Рекомендуются также регулярные проверки высоковольтного электропитания фотоумножителя, а также проверки состояния светофильтров.

7.6.1.3 Спектрорадиометры

Наиболее сложными из промышленно выпускаемых приборов являются имеющие штриховую, либо голографическую дифракционную решетку для разложения падающего солнечного потока на спектр. При этом из участков УФ излучения с низкой энергией требуется тщательно исключить помехи более длинноволновых участков, имеющих энергию, сравнимую с видимой областью спектра.

Это достигается путем использования двойного монохроматора. В случае однократного монохроматора используются комбинации светофильтров, обеспечивающие пропускание только УФ области.

Для измерения сигнала на выходной щели монохроматора чаще всего используется фотоэлектронный умножитель. В некоторых, менее дорогих, приборах используется фотодиод или цепи приборов с зарядовой связью (ПЗС). Такие приборы не способны измерять энергию на самых коротких длинах волн УФ-В излучения и в целом имеют больше проблем, связанных со светом, рассеянным внутри прибора.

В настоящее время имеются приборы для мониторинга, оснащенные некоторыми средствами самопроверки. Электронная проверка включает проверку работы фотоэлектронного умножителя и преобразователя аналогового сигнала в цифровой. Проверка на правильность функционирования оптики прибора включает проверку с использованием встроенных ртутных ламп и эталонных кварцевых галогенных ламп. Они не дают абсолютных данных для калибровки, но тем не менее обеспечивают получение оперативной информации о стабильности прибора в отношении как спектральной настройки, так и интенсивности.

Выпускаемые в настоящее время приборы имеют конструкции, обеспечивающие возможность измерения в спектральной области примерно от 290 нм до середины видимой области, в зависимости от конструкции и конфигурации прибора. Ширина измеряемой полосы обычно от 0,5 до 2,0 нм. Время, необходимое для завершения полного сканирования по всей решетке, зависит как от разрешения по длине волны, так и от общей ширины измеряемого спектра. Время выполнения спектрального сканирования по диапазону УФ области и части видимой (290 – 450 нм) с малым шагом составляет от 1 мин для сканирования современными высокоскоростными спектрорадиометрами до 10 мин для некоторых типов высококачественных спектрорадиометров.

Для регулярного мониторинга УФ излучения рекомендуется, чтобы прибор был либо защищен от воздействия окружающей среды, либо сконструирован таким образом, чтобы энергия, падающая на приемник, передавалась спектрометру, находящемуся в контролируемых условиях. В обоих случаях при разработке оптической части следует принять меры по обеспечению однородной чувствительности до низких углов высоты Солнца.

Как правило, обслуживание спектрорадиометров, предназначенных для мониторинга УФ-В излучения, требует участия профессиональных штатных операторов, ответственных за обслуживание приборов. Ввиду сложности прибора необходимо строго

соблюдать инструкции по эксплуатации, прилагаемые к прибору заводом-изготовителем.

7.6.2 **Калибровка**

Калибровка всех датчиков УФ-В – дело сложное и важное. Руководства по калибровке УФ спектрорадиометров и радиометров с УФ фильтрами имеются в ВМО (WMO, 1996; 1999*a*; 1999*b*; 2001) и опубликованы в соответствующей научной литературе. В отличие от пиранометров, которые могут сравниваться с эталонными приборами МРЭ, ультрафиолетметры должны калиброваться либо по искусственному источнику света, либо путем сравнения с детекторами-уловителями. Последние, хотя и перспективны для калибровки приборов с узкополосными фильтрами, коммерческими фирмами они не выпускаются. Поэтому наиболее часто используемым средством калибровки датчиков, измеряющих УФ-В излучение, являются стандартные лампы, сопоставимые с национальными лабораторными эталонами. Многие страны не располагают лабораториями для определения характеристик ламп УФ излучения. В этих странах лампы обычно сравниваются с лампами Национального института стандартов и технологий в Соединенных Штатах Америки либо Физико-технической национальной лаборатории в Германии.

Согласно оценкам, в настоящее время наименьшая погрешность, которая может быть обеспечена только при самом строгом соблюдении условий, составляет 5 % при одинарных измерениях на длине волны 300 нм. Погрешность измерений суточных интегральных значений приблизительно такая же, как и получаемая при применении наилучших методов. Для получения репрезентативных значений дневных итоговых показателей спектрального УФ излучения в условиях быстрой смены облачности и/или оптической ее оптической плотности требуется проведение быстрого сканирования по спектру и малый шаг времени выборки в последовательности спектрального сканирования. Погрешность измерений эритемной радиации, как правило, лежит в диапазоне 5 – 20 % в зависимости от ряда факторов, включая качество методик и оборудования. Погрешности измерений обусловлены следующими факторами:

(a) погрешности, связанные с эталонными лампами;
(b) стабильность прибора, включая стабильность спектрального фильтра; в более старых приборах – стабильность температурных коэффициентов;
(c) влияние косинусной погрешности;
(d) вариации результатов калибровки прибора, зависящих от длины волны, обусловленные следующим:
  (i) различиями спектрального состава света эталонной лампы и измеряемого;
  (ii) значительными изменениям спектрального состава измеряемого УФ-В излучения с изменениям угловой высоты Солнца.

Использование эталонных ламп для калибровки приводит к большим погрешностям при самых коротких длинах волн, даже если калибровка проведена идеально. Например, при длине волны 350 нм погрешность, связанная с эталонной лампой, составляет примерно 1,3 %; погрешность калибровки эталонной лампы составляет 0,7 %. Погрешности уменьшаются с увеличением длины волны. Необходимо также учесть правильность установки и обслуживания эталонных ламп. Так, отклонение силы тока, протекающего через эталонную лампу, на 1 % приводит к изменению потока УФ излучения на 10 %, а на самых коротких длинах волн – даже более. Неточное измерение расстояния между лампой и калибруемым прибором может также привести к погрешности порядка 1 %, поскольку величина потока обратно пропорциональна квадрату расстояние между источником и приемником. Webb и др. (1994) описывают различные аспекты возникновения погрешности, связанные с использованием эталонных ламп при калибровке УФ спектрорадиометров.

Хотя широкополосные приборы дешевле, для них труднее всего получить хорошие характеристики. Проблемы, связанные с этими приборами, возникают ввиду:

(a) сложного набора светофильтров, используемых для выделения эритемной радиации из приходящей солнечной;
(b) изменения спектрального пропускания атмосферы с изменением массы атмосферы и количества озона. Даже если благодаря использованию калиброванного лампового источника характеристики прибора являются идеальными, различия в спектральном распределении солнечного излучения и лампы будут влиять на погрешность результатов измерений. Использование дейтериевой лампы высокой светоотдачи, двойного монохроматора и тщательный подбор светофильтров помогут получить приемлемые характеристики для этих приборов. Однако число лабораторий, способных провести калибровку таких приборов, чрезвычайно ограничено.

Узкополосные приборы легче калибровать, чем широкополосные, благодаря тому, что в пределах узких полос распределение энергии по спектру более однородно.

Детекторы-ловушки могли успешно использоваться в узкополосных датчиках, но до настоящего времени применялись лишь в исследовательских проектах. При повторной калибровке, будь то прибор с одним или несколькими фильтрами, необходимо обратить особое внимание на обеспечение того, чтобы спектральные характеристики фильтров оставались стабильными.

Калибровка спектрометров проста, если прибор хорошо обслуживался между калибровками. Еще раз необходимо подчеркнуть, что процесс калибровки по эталонной лампе труден, по причинам, указанным выше. Прибор должен калиброваться в том же положении, в котором он будет находиться при проведении измерений, поскольку многие спектрорадиометры подвергаются неблагоприятному воздействию изменений положения в пространстве. Калибровка спектрометра должна также включать проверку точности выборки выделения участков длины волны монохроматором, проверку на любые изменения в юстировке внутренней оптики и ее чистоты, а также проверку электронного оборудования. Кроме того, рекомендуется периодическая проверка выделения полосы, например, путем сканирования с помощью гелий-кадмиевого лазера (λ = 325 нм).

Большинство заводов-изготовителей приборов с фильтрами рекомендует проводить калибровку один раз в год. Спектрорадиометры должны калиброваться по крайней мере два раза в год и чаще, если в них не предусмотрена возможность выполнения самопроверок выходного сигнала электронного фотоумножителя или выделяемой длины волны. Во всех случаях абсолютные калибровки должны проводиться лишь силами квалифицированных техников специалистов на станциях согласно по установленному графику. Источники излучения, используемые для калибровки, должны гарантировать соответствие калибровки абсолютным стандартам радиации, находящимся в сертифицированных национальных метрологических институтах. Если результаты штатной процедуры обеспечения качества, проводимой на местах, говорят о существенном изменении характеристик прибора и изменении уровня его калибровки с течением времени, может потребоваться дополнительная калибровка между двумя плановыми. Все калибровки должны гарантироваться профессионализмом сотрудников, станция должна быть обеспечена документацией, содержащей указания и процедуры, подобные опубликованным ВМО (WMO, 1996; 1999*a*; 1999*b*; 2001). В дополнение к абсолютной калибрации приборов весьма целесообразно проводить сличения источников, используемых для калибрации, а именно, калибровочных ламп и измерительных приборов в целях выявления и устранения несоответствий или систематических расхождений между приборами станции на различных стадиях измерений.

ПРИЛОЖЕНИЕ 7.А

НОМЕНКЛАТУРА АКТИНОМЕТРИЧЕСКИХ И ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

(1) Актинометрические величины

Наименование	*Символ*	*Единица измерений*	*Соотношение*	*Примечание*
Энергия электромагнитного излучения	*Q*, (*W*)	Дж=Вт с	–	–
Поток излучения	*Φ*, (*P*)	Вт	$\Phi = \frac{dQ}{dt}$	Мощность
Плотность приходящего радиационного потока	(*M*), (*E*)	Вт/м^2	$\frac{d\Phi}{dA} = \frac{d^2Q}{dA \cdot dt}$	Поток излучения, идущий от некоторого источника, на элемент поверхности
Плотность уходящего радиационного потока	*M*	Вт/м^2	$M = \frac{d\Phi}{dA}$	Поток, излучаемый единицей поверхности источника
Энергетическая освещенность	*E*	Вт/м^2	$E = \frac{d\Phi}{dA}$	Поток, приходящей на единицу поверхности
Сила потока излучения поверхностью	*L*	Вт/м^2 · ср	$L = \frac{d^2\Phi}{d\Omega \cdot dA \cdot \cos\theta}$	Поток, формируемый оптической системой
Энергетическая экспозиция	*H*	Дж/м^2	$H = \frac{dQ}{dA} = \int_{t_1}^{t_2} E\,dt$	Может использоваться как сумма радиации за интервал времени от t_1 до t^2
Сила излучения	*I*	Вт/ср	$I = \frac{d\Phi}{d}$	Может использоваться для потока излучения точечного источника.

(2) Фотометрические величины

Наименование	*Символ*	*Единица измерений*
Световая энергия	Q_v	lm·s
Световой поток	v	lm
Светность	M_v	lm m^{-2}
Освещенность	E_v	lm m^{-2} = lx
Световая экспозиция	H_v	lm m^{-2} s = lx·s
Сила света	I_v	lm sr^{-1} = cd
Яркость	L_v	lm m^{-2} s r^{-1} = cdm^{-2}
Плотность светового потока	(M_v ; E_v)	lm m^{-2}

(3) Оптические характеристики

Характеристика	*Символ*	*Определение*	*Примечание*
Излучение	ε	$\varepsilon = \frac{M_{\varepsilon}}{M_{\varepsilon=1}}$	$\varepsilon = 1$ для черного тела
Поглощение	α	$\alpha = \frac{\Phi_a}{\Phi_i}$	Φ_a и Φ_i – поглощенный и падающий потоки соответственно
Отражение	ρ	$\rho = \frac{\Phi_r}{\Phi_i}$	Φ_r – отраженный световой поток
Пропускание	τ	$\tau = \frac{\Phi_t}{\Phi_i}$	Φ_t – световой поток, прошедший через среду или поверхность
Оптическая плотность	δ	$\tau = e^{-\delta}$	В атмосфере δ определяется в вертикальном столбе. Оптическая толщина равна $\delta/\cos\theta$, где θ – зенитный угол

ПРИЛОЖЕНИЕ 7.B

МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ РАДИАЦИОННЫЕ ПАРАМЕТРЫ, ИХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Параметр	*Символ*	*Уравнение*	*Определения и примечания*	*Единицы*
Нисходящая радиация	$\Phi\downarrow$[a] $Q\downarrow$ $M\downarrow$ $E\downarrow$ $L\downarrow$ $H\downarrow$	$\Phi\downarrow = \Phi_g\downarrow + \Phi_l\downarrow$ $Q\downarrow = Q_g\downarrow + Q_l\downarrow$ $M\downarrow = M_g\downarrow + M_l\downarrow$ $E\downarrow = E_g\downarrow + E_l\downarrow$ $L\downarrow = L_g\downarrow + L_l\downarrow$ $H\downarrow = H_g\downarrow + H_l\downarrow$ *(g=суммарная)* *(l =длинновол-новая))*	Нисходящий поток излучения " Нисходящая энергия излучения " Нисходящая энергетическая светимость[b] " Нисходящая энергетическая освещенность " Нисходящая энергетическая яркость " Нисходящая энергетическая экспозиция для заданного интервала времени	Вт Дж (Вт · с) Вт/м^2 Вт/м^2 Вт/м^2 · ср Дж/м^2 на интервал времени
Восходящая радиация	$\Phi\uparrow$[a] $Q\uparrow$ $M\uparrow$ $E\uparrow$ $L\uparrow$ $H\uparrow$	$\Phi\uparrow = \Phi_r\uparrow + \Phi_l\uparrow$ $Q\uparrow = Q_r\uparrow + Q_l\uparrow$ $M\uparrow = M_r\uparrow + M_l\uparrow$ $E\uparrow = E_r\uparrow + E_l\uparrow$ $L\uparrow = L_r\uparrow + L_l\uparrow$ $H\uparrow = H_r\uparrow + H_l\uparrow$	Восходящий поток излучения " Восходящая энергия излучения " Восходящая энергетическая светимость " Восходящая энергетическая освещенность " Восходящая энергетическая яркость " Восходящая энергетическая экспозиция для заданного интервала времени	Вт Дж (Вт · с) Вт/м^2 Вт/м^2 Вт/м^2 · ср J m^{-2} на интервал времени
Суммарная солнечная радиация	$E_g\downarrow$	$E_g\downarrow = E\cos\theta_{\odot} + E_d\downarrow$	Относительная энергетическая освещенность, приходящая из небесной полусферы на горизонтальную поверхность ($\theta_{\odot}$ = *зенитный угол Солнца*)[c]	Вт/м^2
Рассеянная солнечная радиация (нисходящая рассеянная солнечная радиация)	$\Phi_d\downarrow$ $Q_d\downarrow$ $M_d\downarrow$ $E_d\downarrow$ $L_d\downarrow$ $H_d\downarrow$		Индекс *d* = рассеянная	Как для нисходящей радиации
Восходящая и нисходящая длинноволновая радиация	$\Phi_l\uparrow, \Phi_l\downarrow$ $Q_l\uparrow, Q_l\downarrow$ $M_l\uparrow, M_l\downarrow$ $E_l\uparrow, E_l\downarrow$ $H_l\uparrow, H_l\downarrow$		Индекс *l* = длинноволновая. Если рассматривается только атмосферная радиация, то можно к индексу добавить индекс *a*, например $\Phi_{l,a}\uparrow\sigma\sigma$	Как для нисходящей радиации
Отраженная солнечная радиация	$\Phi_r\uparrow$ $Qr\uparrow$ $Mr\uparrow$ $Er\uparrow$ $Lr\uparrow$ $Hr\uparrow$		Индекс *r* = отраженная (можно использовать индекс *s* (зеркальная) и *d* (рассеянная), если необходимо, подчеркнуть различие между этими двумя компонентами)	Как для нисходящей радиации

Параметр	*Символ*	*Уравнение*	*Определения и примечания*	*Единицы*
Результатирующая радиация (радиационный баланс)	Φ^* Q^* M^* E^* L^* H^*	$\Phi^* = \Phi\downarrow - \Phi\uparrow$ $Q^* = Q\downarrow - Q\uparrow$ $M\uparrow = M\downarrow - M\uparrow$ $E\uparrow = E\downarrow - E\uparrow$ $L\uparrow = L\downarrow - L\uparrow$ $H\uparrow = H\downarrow - H\uparrow$	Если рассматривается только коротковолновая или длинноволновая остаточная радиация, следует к каждому символу добавлять индексы *g* или *l*	Как для нисходящей радиации
Прямая солнечная радиация	E	$E = E_0\tau$ $\tau \vee e^{-\delta/\cos\theta_\odot}$	τ = прозрачность атмосферы δ = оптическая плотность (вертикальная)	Вт/м^2
Солнечная постоянная	E_0		Интенсивность падающего солнечного излучения за пределами атмосферы, нормализованная по среднему расстоянию между Солнцем и Землей	Вт/м^2

[a] Вместо символов ↓ или ↑ можно использовать «-» и «+» (например, $\Phi^+ \equiv \Phi\uparrow$).

[b] Энергетическая светимость – поток излучения, входящий с единичной площади; интенсивность падающего излучения – поток излучения, получаемый единичной площадью. Для плотности потока в общем можно использовать как символ *M*, так и символ *E*. Может быть введен также символ $F = \Phi$/площадь, хотя он не очень рекомендуется.

[c] В случае наклонных поверхностей $\theta_\odot$ – угол между нормалью к поверхности и направлением на Солнце. I

ПРИЛОЖЕНИЕ 7.C

ХАРАКТЕРИСТИКА МИРОВЫХ, РЕГИОНАЛЬНЫХ И НАЦИОНАЛЬНЫХ РАДИАЦИОННЫХ ЦЕНТРОВ

Мировые радиационные центры

Мировые радиационные центры были созданы на 30-й сессии Исполнительного комитета в 1978 г. резолюцией 11 (ИК-XXX) как центры, где осуществляется международная калибровка метеорологических радиационных стандартов для глобальной сети станций и в этих целях содержатся эталонные приборы.

Мировой радиационный центр должен выполнять нижеследующие функции:

1. a) хранить и поддерживать в рабочем состоянии группу приборов, состоящую по крайней мере из трех стабильных абсолютных пиргелиометров, 95 % погрешности которых составляет менее 1 Вт/м^2 при сопоставлении с Мировым радиометрическим эталоном при стабильных, безоблачных погодных условиях и прямой энергетической освещенности выше 700 Вт/м^2; при этом предполагается, что 95 % любого отдельного измерения прямой солнечной энергетической освещенности будет находиться в пределах 4 Вт/м^2 энергетической освещенности. Мировому радиационному центру в Давосе поручается поддерживать в рабочем состоянии группу международных эталонов для реализации мирового радиометрического эталона;
   (b) обеспечивать профессиональную подготовку специалистов в области радиации;
   (c) состав сотрудников центра должен сохранять преемственность и включать квалифицированных специалистов с большим опытом исследований в области радиации;
   (d) принимать все необходимые меры для обеспечения на постоянной основе по возможности наиболее высокого качества своих стандартов и испытательного оборудования;
   (e) выступать в качестве центра передачи мирового радиометрического эталона региональным центрам;
   (f) создавать необходимые лабораторные и внешние средства для одновременного сопоставления большого числа приборов и для обработки данных;
   (g) внимательно следить или инициировать процесс, способствующий улучшению стандартов и/или методов работы в области метеорологической радиометрии;
   (h) каждые пять лет проходить оценку, проводимую международным агентством или экспертами КПМН для проведения поверки измерений прямой солнечной радиации; или
2. (a) создать и вести архив данных солнечной радиации, поступающих от всех государств-членов ВМО;
   (b) состав сотрудников должен сохранять преемственность и включать высококвалифицированных специалистов с большим опытом исследований в области радиации;
   (c) принимать все необходимые меры для постоянного обеспечения по возможности самого высокого качества его базы данных и доступа к ней;
   (d) оценка его работы должна проводиться международным агентством или экспертами КПМН по крайней мере каждые пять лет.

Региональные радиационные центры

Региональный радиационный центр создается региональной ассоциацией как центр внутрирегионального сравнения радиационных приборов и хранения эталонного прибора, необходимого для этой цели.

Региональный радиационный центр должен удовлетворять следующим условиям до того, как он будет называться таковым, и выполнять эти условия после утверждения его в этом качестве:

(a) хранить и поддерживать в рабочем состоянии эталонную группу, состоящую по крайней мере из трех стабильных пиргелиометров с 95 % погрешностью, составляющей менее 1 Вт/м^2 в сопоставлении с группой международных эталонов при стабильных безоблачных погодных условиях и прямой энергетической освещенности выше 700 Вт/м^2; при этом предполагается, что 95 % любого отдельного измерения прямой солнечной энергетической освещенности будет находиться в пределах 6 Вт/м^2 энергетической освещенности;

(b) не реже одного раза в пять лет один из радиометров должен сравниваться согласно санкции ВМО/КПМН или проходить калибровку с приборами группы международных эталонов;

(c) по крайней мере один раз в год эталонные радиометры должны сравниваться между собой для

проверки их стабильности. Если среднее соотношение, основанное на по меньшей мере 100 измерениях при 95 % погрешности в размере менее 0,1 %, изменяется более чем на ±0,2 % и если нельзя выявить неисправный прибор, прежде чем использовать приборы в качестве эталонов, следует провести их перекалибровку в одном из мировых радиационных центров;

(d) должен иметь необходимое оборудование и лабораторные приборы или доступ к ним для поверки и поддержания точности вспомогательного измерительного оборудования;

(e) представлять необходимое полевое оборудование для одновременного сравнения национальных эталонных радиометров со всего региона;

(f) обеспечивать преемственность состава сотрудников, который должен быть укомплектован высококвалифицированными специалистами с большим опытом исследования радиации;

(g) оценка его работы должна проводиться национальным или международным агентством или экспертами КПМН по крайней мере каждые пять лет для проверки соответствия измерений прямой солнечной радиации.

Национальные радиационные центры

Национальный радиационный центр – это центр, создаваемый в стране для калибровки, стандартизации и поверки приборов, применяемых в национальной сети радиационных станций, и для поддержания в рабочем состоянии национальных эталонных приборов, необходимых для этих целей.

Национальный радиационный центр должен удовлетворять следующим требованиям:

(a) хранить по крайней мере два пиргелиометра для использования в качестве национального эталона для калибровки радиационных приборов, используемых в национальной сети радиационных станций с 95 % погрешностью, меньшей 4 Вт/м^2 и сопоставимой с региональной реализацией мирового радиометрического эталона при стабильных,безоблачных погодных условиях и прямой энергетической освещенности выше 700 Вт/м^2; при этом предполагается, что 95 % любого отдельного измерения прямой солнечной энергетической освещенности будет находиться в пределах 20 Вт/м^2 энергетической освещенности;

(b) один из национальных эталонных радиометров следует сравнивать с региональным эталоном не реже одного раза в пять лет;

(c) по крайней мере один раз в год национальные эталонные радиометры должны сравниваться между собой для проверки стабильности отдельных приборов. Если среднее соотношение, основанное по меньшей мере на 100 измерениях при 95 % погрешности в размере менее 0,2 %, изменилось больше, чем на 0,6 %, и если нельзя выявить неисправный прибор, то прежде чем использовать приборы в качестве эталонов, следует провести их перекалибровку в одном из региональных радиационных центров;

(d) иметь необходимое оборудование и аппаратуру или доступ к ним для поверки характеристик приборов, используемых на национальной сети станций;

(e) состав сотрудников центра должен сохранять преемственность и включать высококвалифицированных специалистов с большим опытом исследования радиации.

Национальные радиационные центры должны отвечать за подготовку и хранение всей новейшей технической информации, необходимой для работы национальной сети радиационных станций.

Следует организовать сбор результатов всех радиационных измерений, осуществляемых национальной сетью радиационных станций, и тщательную проверку точности и достоверности этих результатов. Если эта работа осуществляется другой организацией, национальный радиационный центр должен поддерживать с ней тесную связь.

Список мировых и региональных радиационных центров

МИРОВЫЕ РАДИАЦИОННЫЕ ЦЕНТРЫ

Давос	(Швейцария)
Санкт-Петербург[2]	(Российская Федерация)

РЕГИОНАЛЬНЫЕ РАДИАЦИОННЫЕ ЦЕНТРЫ

Регион I (Африка):

Каир	(Египет)
Хартум	(Судан)
Киншаса	(Демократическая Республика Конго)
Лагос	(Нигерия)
Таманрассет	(Алжир)
Тунис	(Тунис)

Регион II (Азия):

Пуна	(Индия)
0Токио	(Япония)

2 Действует главным оразом как Мировой центр радиационных данных в рамках Стратегического плана Глобальной службы атмосферы.

Регион III (Южная Америка):

Буэнос-Айрес	(Аргентина)
Сантьяго	(Чили)
Уаяо	(Перу)

Регион IV (Северная Америка и Центральная Америка и Карибский бассейн):

Торонто	(Канада)
Боулдер	(Соединенные Штаты Америки)
Мехико/Колима	(Мексика)

Регион V (юго-западная часть Тихого океана):

Мельбурн	(Австралия)

Регион VI (Европа):

Будапешт	(Венгрия)
Давос	(Швейцария)
Санкт-Петербург	(Российская Федерация)
Норчёпинг	(Швеция)
Трап/Карпантра	(Франция)
Уккле	(Бельгия)
Линденберг	(Германия)

ПРИЛОЖЕНИЕ 7.D

НЕОБХОДИМЫЕ ФОРМУЛЫ

Общие сведения

Все астрономические данные могут быть получены из таблиц в морских календарях или из таблиц эфемерид. Однако для практических нужд используются приближенные формулы. Michalsky (1988*a*, *b*) сравнил несколько комплектов приближенных формул и обнаружил, что наилучшими являются приближенные уравнения, представленные в *Astronomical Almanac* (United State Naval Observatory, 1993). Они приводятся ниже для удобства пользования.

Положение Солнца

Для определения фактического положения Солнца требуются следующие исходные величины:

(a) год;
(b) порядковый номер дня года (например, 1 февраля – это 32-й день);
(c) дробный час во всемирном времени (например, часы + минуты/60 + число часов от Гринвича);
(d) широта в градусах (северная положительная);
(e) долгота в градусах (восточная положительная).

Для определения юлианского дня (BB) *Astronomical Almanac* определяет текущий юлианский день от первого юлианского дня, установленного на полдень 1 января 2000 г. по всемирному времени (BB). Этот юлианский день равен 2 451 545,0. Юлианскую дату (JD) можно определить по формуле:

JD = 2 432 916.5 + delta • 365 + leap + day + hour/24

где: delta = год – 1949;
leap = високосность = целая часть от (delta/4)

Константа 2 432 916,5 – это юлианский день на полночь 1 января 1949 г. и используется просто для удобства.

Используя вышеуказанное время, можно подсчитать эклиптические координаты в соответствии с приведенными ниже этапами (L, g и l представлены в градусах):

(a) n = JD – 2 451 545;
(b) L (средняя долгота) = 280,460 + 0,985 647 4 · n ($0 \le L < 360°$);
(c) g (средняя аномалия) = 357,528 + 0,985 600 3 · n ($0 \le g < 360°$);
(d) l (эклиптическая долгота) = L + 1,915 · sin (g) + 0,020 · sin (2g) ($0 \le l < 360°$);
(e) ep (отклонение от эклиптики) = 23,439 – 0,000 000 4 · n (градусы).

Следует отметить, что спецификации указывают, что все числа, кратные 360°, следует добавлять или вычитать до тех пор, пока окончательная величина не попадет в пределы конкретного диапазона.

Из вышеприведенных уравнений можно рассчитать небесные координаты – правое восхождение (ra) и наклонение (dec) с помощью выражений:

$$\tan(ra) = \cos(ep) \cdot \sin(l)/\cos(l)$$

$$\sin(dec) = \sin(ep) \cdot \sin(l)$$

Для перехода от небесных координат к местным координатам, т. е. от правого восхождения и наклонения к азимуту (A) и высоте (a), удобно использовать местный часовой угол (h). Это рассчитывается посредством определения вначале гринвичского среднего звездного времени (GMST в часах) и местного среднего звездного времени (LMST в часах):

GMST = 6,697 375 + 0,065 709 824 2 · n + hour (BB)

где: $0 \le$ GMST < 24h

LMST = GMST + (east longitude)/(15° h^{-1})

На основании LMST рассчитывается часовой угол (ha) (ha и ra – в градусах):

ha = LMST – 15 · ra ($-12 \le ha < 12$ ч)

До того как Солнце достигнет меридиана, часовой угол является отрицательным. Следует быть осторожным при использовании этого термина, поскольку он противоположен термину, используемому исследователями Солнца.

Расчеты угла высоты Солнца (el) и солнечного азимута (az) (az и el – в градусах) ведутся по формулам:

$$\sin(el) = \sin(dec) \cdot \sin(\text{lat}) + \cos(dec) \cdot \cos(\text{lat}) \cdot \cos(ha)$$

и:

$$\sin(az) = -\cos(dec) \cdot \sin(ha)/\cos(el)$$

$$\cos(az) = (\sin(dec) - \sin(el) \cdot \sin(\text{lat}))/(\cos(el) \cdot \cos(\text{lat}))$$

где азимут отмеряется от 0° севера и является положительным по всему восточному полушарию.

Для учета рефракции атмосферы и получения видимой высоты Солнца (h) или видимого зенитного угла Солнца *Astronomical Almanac* предлагает следующие уравнения:

(a) простое уравнение рефракции для зенитного R угла < 75°:

$$r = 0°.004\,52\, P \tan z/(273 + T)$$

где z – дистанция зенита в градусах; P – давление в гектопаскалях; и T – температура в °C.

(b) для зенитных углов больше 75° и высоты меньше 15° рекомендуется следующая аппроксимация:

$$r = \frac{P(0{,}159\,4 + 0{,}019\,6a + 0{,}000\,02a^2)}{[(273 + T)(1 + 0{,}505a + 0{,}084\,5a^2)]}$$

где a – высота (90° – z), $h = el + r$ и видимый зенитный угол Солнца $z_0 = z + r$.

Расстояние от Солнца до Земли

Современный эксцентриситет орбиты Земли вокруг Солнца невелик, однако он значителен в том смысле, что квадрат расстояния R от Солнца до Земли, а следовательно, и интенсивность падающего на Землю солнечного излучения изменяются в пределах ±3,3 % от среднего. В астрономических единицах (АЕ) с погрешностью 10^{-4}:

$$R = 1.000\,14 - 0.016\,71 \cdot \cos(g) - 0.000\,14 \cdot \cos(2g)$$

где g – средняя аномалия, определенная выше. Солнечный эксцентриситет определяется как квадрат отношения среднего расстояния от Солнца до Земли (1 АЕ, R_0) фактическому расстоянию от Солнца до Земли по формуле:

$$E_0 = (R_0/R)^2$$

Масса атмосферы

Для вычисления экстинкции должна быть известна длина пути через атмосферу, которая называется абсолютной оптической массой атмосферы. Относительная масса атмосферы для произвольного компонента атмосферы; (m) – это отношение массы атмосферы вдоль наклонного пути к массе атмосферы по вертикали; таким образом, относительная масса атмосферы является нормирующим множителем. В плоскопараллельной структуре непреломляющей атмосфере $1/\sin h_0$ или $1/\cos z_0$:

Местное истинное время

Среднее солнечное время, на котором основано наше гражданское время, определяется по движению воображаемого тела, называемого средним Солнцем. Считается, что среднее Солнце движется по небесному экватору с одинаковой скоростью, равной средней скорости движения истинного Солнца. Разность между этим постоянным временным эталоном и изменяющимся местным истинным временем называется уравнением времени (Eq), которое может быть положительным или отрицательным в зависимости от относительного положения истинного среднего Солнца. Таким образом:

$$LAT = LMT + Eq = CT + LC + Eq$$

где LAT – местное истинное время (также известное как *ИСВ* – истинное солнечное время); LMT – местное среднее время; CT – гражданское время (соотнесенное с центральным меридианом часового пояса, поэтому также называемое поясным временем); LC – поправка на долготу (4 мин. на каждый градус). Поправка LC положительна, если местный меридиан расположен к востоку от центрального меридиана часового пояса, и наоборот.

Для вычисления Eq минутах можно использовать следующую приближенную формулу:

$$Eq = 0{,}017\,2 + 0{,}428\,1 \cos \Theta_0 - 7{,}351\,5 \sin \Theta_0 - 3{,}349\,5 \cos 2\Theta_0 - 9{,}361\,9 \sin 2\Theta_0$$

где $\Theta_0 = 2\,\pi d_n/365$ в радианах, или $\Theta_0 = 360\, d_n/365$ в градусах, где d_n – порядковый номер дня в году, изменяющийся от 0 на 1 января до 364 на 31 декабря для обычного года и до 365 – для високосного года. Максимальная погрешность такой аппроксимации равна 35 с (которая чрезмерна для таких некоторых целей, как определение массы атмосферы).

ПРИЛОЖЕНИЕ 7.E

РАССЕЯННАЯ РАДИАЦИЯ – ПОПРАВКА НА ЗАТЕНЯЮЩЕЕ КОЛЬЦО

Затеняющее кольцо устанавливается на двух перекладинах, расположенных параллельно земной оси, таким образом, чтобы центр кольца совпадал с приемной поверхностью пиранометра во время равноденствий. Диаметр кольца может изменяться от 0,5 до 1,5 м и отношение ширины к радиусу b/r – от 0,09 до 0,35. Подгонка кольца к склонению Солнца осуществляется путем перемещения его вдоль перекладин. Длина затеняющей полосы и высота установки перекладин по отношению к пиранометру определяются по положению Солнца во время летнего солнцестояния – чем больше широта, тем длиннее будет затеняющая полоса и тем ниже перекладины.

Некоторые авторы, например Drummond (1956), Dehne (1980) and Le Baron, Peterson and Dirmhirn (1980), предложили формулы для расчета рабочей поправки к результатам измерений рассеянной радиации путем вычисления части радиации, не измеряемой из-за затеняющей полосы. Для кольца с $b/r < 0{,}2$ часть радиации D_v, теряемая в течение дня, может быть выражена следующим образом:

$$D_v \approx \frac{b}{r}\cos^3\delta \int_{t_{rise}}^{t_{set}} L(t)\cdot \sin h_{\odot}(t)\,dt$$

где δ – склонение Солнца; t – часовой угол Солнца; t_{rise} и t_{set} – часовой угол соответственно на восходе и закате Солнца для математического горизонта, (Φ – географическая широта, $t_{rise} = -t_{set}$ and $\cos t_{rise} = -\tan\Phi \,.\, \tan\delta$; $L(t)$ – светимость атмосферы в течение дня; $h_{\odot}$ – высота Солнца.

С помощью этого уравнения и при определенных допущениях относительно светимости атмосферы можно определить поправочный коэффициент f:

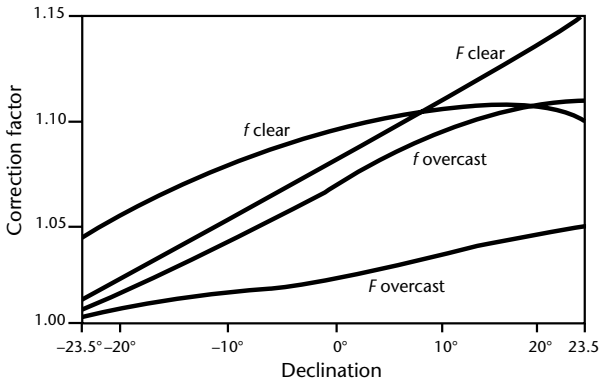
$$f = \frac{1}{1 - \frac{D_v}{D}}$$

где D – рассеянная радиация незатененного неба. На рисунке представлен поправочный коэффициент для ясного неба и неба со сплошной облачностью в сравнении с соответствующими эмпирическими кривыми. Очевидно, что отклонения от теоретических кривых зависят от климатологических факторов конкретной станции и должны определяться экспериментально – путем сравнения прибора с затеняющим кольцом с прибором, затеняемым непрерывно смещаемым диском. Если для станции нет экспериментальных данных, следует использовать данные, вычисленные для неба со сплошной облачностью с соответствующим b/r. Таким образом:

$$\frac{D_v}{D_{overcast}} = \frac{b}{r}\cos^3\delta(t_{set} - t_{rise})$$

$$\cdot \sin\Phi\cdot\sin\delta + \cos\Phi\cdot\cos\delta\cdot(\sin t_{set} - \sin t_{rise})$$

где δ – склонение Солнца; Φ – географическая широта; t_{rise} и t_{set} – часовой угол соответственно на восходе и закате Солнца (подробнее см. выше).



Сравнение вычисленных (*f*) и определенных эмпирически поправочных коэффициентов для затеняющего кольца с *b/r* = 0,169; *f* – вычисленная кривая и *F* – эмпирические кривые (по Dehne, 1980).

СПРАВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Bass, A.M. and R.J Paur, 1985: The ultraviolet cross-sections of ozone: I. The Measurements. Atmospheric Ozone (C.S. Zerefos and A. Ghazi, eds.), Reidel, Dordrecht, pp. 606–610.

Bodhaine, B.A., N.B. Wood, E.G. Dutton and J.R. Slusser, 1999: On Rayleigh optical depth calculations. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 16, pp. 1854–1861.

Dehne, K., 1980: Vorschlag zur standardisierten Reduktion der Daten verschiedener nationaler Himmelsstrahlungs-Messnetze. *Annalen der Meteorologie* (Neue Folge), 16, pp. 57–59.

Drummond, A.J., 1956: On the measurement of sky radiation. *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie*, Serie B, 7, pp. 413–436.

Forgan, B.W., 1996: A new method for calibrating reference and field pyranometers. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 13, pp. 638–645.

Fröhlich, C. and G.E. Shaw, 1980: New determination of Rayleigh scattering in the terrestrial atmosphere. Applied Optics, Volume 19, Issue 11, pp. 1773–1775.

Frouin, R., P.-Y. Deschamps, and P. Lecomte, 1990: Determination from space of atmospheric total water vapour amounts by differential absorption near 940 nm: Theory and airborne verification. Journal of Applied Meteorology, 29, pp. 448–460.

International Commission on Illumination, 1987: Methods of Characterizing Illuminance Meters and Luminance Meters. ICI-No. 69–1987.

International Commission on Illumination, 1994: Guide to Recommended Practice of Daylight Measurement. ICI No. 108-1994.

International Electrotechnical Commission, 1987: International Electrotechnical Vocabulary. Chapter 845: Lighting, IEC 60050-845.

International Organization for Standardization, 1990a: Solar Energy – Specification and Classification of Instruments for Measuring Hemispherical Solar and Direct Solar Radiation. ISO 9060.

International Organization for Standardization, 1990b: Solar Energy – Calibration of Field Pyrheliometers by Comparison to a Reference Pyrheliometer. ISO 9059.

International Organization for Standardization, 1990c: Solar Energy – Field Pyranometers –Recommended Practice for Use. ISO/TR 9901.

International Organization for Standardization, 1992: Solar Energy – Calibration of field pyranometers by comparison to a reference pyranometer. ISO 9847.

International Organization for Standardization, 1993: Solar Energy – Calibration of a pyranometer using a pyrheliometer. ISO 9846.

International Organization for Standardization, 1995: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, Geneva.

Kerr, J.B. and T.C. McElroy, 1993: Evidence for large upward trends of ultraviolet-B radiation linked to ozone depletion. Science, 262, pp. 1032–1034.

Kuhn, M., 1972: Die spektrale Transparenz der antarktischen Atmosphäre. Teil I: Meßinstrumente und Rechenmethoden. Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie, Serie B, 20, pp. 207–248.

Lal, M., 1972: On the evaluation of atmospheric turbidity parameters from actinometric data. Geofísica Internacional, Volume 12, Number 2, pp. 1–11.

Le Baron, B.A., W.A. Peterson and I. Dirmhirn, 1980: Corrections for diffuse irradiance measured with shadowbands. *Solar Energy*, 25, pp. 1–13.

Michalsky, J.J., 1988*a*: The astronomical almanac's algorithm for approximate solar position (1950–2050). Solar Energy, Volume 40, Number 3, pp. 227–235.

Michalsky, J.J., 1988*b*: Errata. The astronomical almanac's algorithm for approximate solar position (1950–2050). *Solar Energy,* Volume 41, Number 1.

McKinlay A.F. and B.L. Diffey, 1987: A reference action spectrum for ultraviolet induced erythema in human skin. In: W.F. Passchier, and B.F.M. Bosnjakovic (eds), Human Exposure to Ultraviolet Radiation: Risks and Regulations, Elsevier, Amsterdam, pp. 83–87.

Parrish, J.A., K.F Jaenicke and R.R. Anderson, 1982: Erythema and melanogenesis action spectra of normal human skin. Photochemistry and Photobiology, 36, pp. 187–191.

Rüedi, I., 2001: International Pyrheliometer Comparison IPC-IX, Results and Symposium. MeteoSwiss Working Report No. 197, Davos and Zurich.

Schneider, W., G.K. Moortgat, G.S. Tyndall and J.P. Burrows, 1987: Absorption cross-sections of NO_2 in the UV and visible region (200–700 nm) at 298 K. Journal of Photochemistry and Photobiology, A: Chemistry, 40, pp. 195–217.

United States Naval Observatory, 1993: *The Astronomical Almanac*, Nautical Almanac Office, Washington DC.

Vigroux, E., 1953: Contribution à l'étude expérimentale de l'absorption de l'ozone. Annales de Physique, 8, pp. 709–762.

Webb, A.R, B.G. Gardiner, M. Blumthaler and P. Foster, 1994: A laboratory investigation of two ultraviolet spectroradiometers. Photochemistry and Photobiology, Volume 60, No. 1, pp. 84–90.

World Meteorological Organization, 1978: International Operations Handbook for Measurement of Background Atmospheric Pollution. WMO-No. 491, Geneva.

World Meteorological Organization, 1986a: Revised Instruction Manual on Radiation Instruments and Measurements. World Climate Research Programme Publications Series No. 7, WMO/TD-No. 149, Geneva.

World Meteorological Organization, 1986b: Recent Progress in Sunphotometry: Determination of the Aerosol Optical Depth. Environmental Pollution Monitoring and Research Programme Report No. 43, WMO/TD-No. 143, Geneva.

World Meteorological Organization, 1993a: Report of the WMO Workshop on the Measurement of Atmospheric Optical Depth and Turbidity (Silver Spring, United States, 6–10 December 1993). Global Atmosphere Watch Report No. 101, WMO/TD-No. 659, Geneva.

World Meteorological Organization, 1993b: Report of the Second Meeting of the Ozone Research Managers of the Parties to the Vienna Convention for the Protection of the Ozone Layer (Geneva, 10–12 March, 1993). WMO Global Ozone Research and Monitoring Project Report No. 32, Geneva.

World Meteorological Organization, 1996: WMO/UMAP Workshop on Broad-band UV Radiometers (Garmisch-Partenkirchen, Germany, 22–23 April 1996). Global Atmosphere Watch Report No. 120, WMO/TD-No. 894, Geneva.

World Meteorological Organization, 1998: Baseline Surface Radiation Network (BSRN): *Operations Manual*. WMO/TD-No. 879, Geneva.

World Meteorological Organization, 1999a: Guidelines for Site Quality Control of UV Monitoring. Global Atmosphere Watch Report No. 126, WMO/TD-No. 884, Geneva.

World Meteorological Organization, 1999b: Report of the LAP/COST/WMO Intercomparison of Erythemal Radiometers. (Thessaloniki, Greece, 13–23 September 1999). WMO Global Atmosphere Watch Report No. 141, WMO/TD-No. 1051, Geneva.

World Meteorological Organization, 2001: Instruments to Measure Solar Ultraviolet Radiation. Part 1: Spectral instruments, Global Atmosphere Watch Report No. 125, WMO/TD-No. 1066, Geneva.

World Meteorological Organization, 2005: WMO/GAW Experts Workshop on a Global Surface-Based Network for Long Term Observations of Column Aerosol Optical Properties (Davos, Switzerland, 8–10 March 2004). Global Atmosphere Watch Report No. 162, WMO/TD-No. 1287, Geneva.

Young, A.T., 1981: On the Rayleigh-scattering optical depth of the atmosphere. Journal of Applied Meteorology, 20, pp. 328–330.

ГЛАВА 8

ИЗМЕРЕНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ СОЛНЕЧНОГО СИЯНИЯ

8.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Термин «солнечное сияние» связан с яркостью солнечного диска, превышающей фон диффузного свечения неба, или, что лучше видно невооруженным глазом, с появлением теней позади освещенных объектов. Как таковой, этот термин больше связан с видимым излучением, а не с излучением в области других длин волн, хотя оба аспекта неотделимы друг от друга. На практике, однако, первая формулировка была получена непосредственно на основе данных сравнительно простого регистратора солнечного сияния Кэмпбелла-Стокса (см. подраздел 8.2.3), принцип работы которого основан на обнаружении солнечного сияния, когда солнечный луч, сфокусированный специальными линзами, способен прожечь специальную темную бумажную ленту. Этот регистратор был введен в эксплуатацию на метеорологических станциях еще в 1880 г. и по-прежнему используется на многих пунктах наблюдений. Поскольку отсутствуют международные требования, касающиеся размеров и качества тех частей регистратора, которые фиксируют солнечное сияние, его использование давало различные значения продолжительности солнечного сияния.

Для получения с мировой сети станций однородных данных о продолжительности солнечного сияния ВМО рекомендовала использовать специальный тип регистратора солнечного сияния Кэмпбелла-Стокса, так называемый временный эталон солнечного сияния (IRSR) (ВМО, 1962). Усовершенствование, полученное с помощью этого «механического определителя» солнечного сияния, было эффективным только в течение предварительного периода, необходимого для нахождения точного физического определения термина «продолжительность солнечного сияния», которое позволяет конструировать как автоматические регистраторы солнечного сияния, так и, по возможности, более точно аппроксимировать «шкалу» регистратора IRSR. В отношении «шкалы» настоятельно рекомендовалось определение порогового значения прямой солнечной радиации, при котором возможно прожигание лент на регистраторах Кэмпбелла-Стокса. Исследования, проведенные на различных станциях, показали, что пороговое значение прямой солнечной радиации для прожигания ленты колеблется между 70 и 280 Вт/м^2 (Bider, 1958; Baumgartner, 1979). Однако дальнейшие исследования, проведенные во Франции в основном с помощью регистратора IRSR, дали среднее значение 120 Вт/м^2 , которое затем было рекомендовано в качестве порога прямой солнечной радиации, чтобы четко определять продолжительность солнечного сияния[1] . Что касается разброса тестовых результатов, то он составляет 20 %, и это значение должно включаться в спецификацию приборов. В качестве эталонного датчика для обнаружения порога прямой солнечной радиации был рекомендован пиргелиометр. Для усовершенствования эталона в будущем необходимо, по-видимому, окончательно установить значение угла зрения пиргелиометра (часть 1, глава 7, раздел 7.2 и пункт 7.2.1.3).

8.1.1 Определение

В соответствии с рекомендациями ВМО (2003)[2] продолжительность солнечного сияния в течение данного периода времени определяется как сумма отрезков времени, для которых прямая солнечная радиация превышает 120 Вт/м^2.

8.1.2 Единицы и шкалы

Физическая продолжительность солнечного сияния (*SD*) является временной характеристикой. В качестве единиц измерения используются секунды или часы. Для климатологических целей используются производные термины, такие как «часы в день» или «число часов солнечного сияния в течение дня», а также проценты – для определения, например, «относительной продолжительности солнечного сияния в течение дня», когда *SD* может быть связана с внеземной или максимально возможной продолжительностью солнечного сияния (SD_0 и SD_{max} соответственно). Важным дополнением к единицам измерения является период измерения (день, 10 дней, месяц, год и т. д.).

8.1.3 Метеорологические требования

Требования, которые необходимо выполнять, приводятся в Части 1. Глава 1. Продолжительность солнечного сияния должна измеряться с точностью до ± 0.1 ч и с разрешением 0.1 ч.

---

1 Рекомендовано Комиссией по приборам и методам наблюдений на восьмой сессии (1981 г.) в соответствии с рекомендацией 10 (КПМН-VIII).

2 Рекомендовано Комиссией по приборам и методам наблюдений на восьмой сессии (1981 г.) в соответствии с рекомендацией 16 (КПМН- X).

Поскольку количество и скорость изменения пороговых переходов прямой солнечной радиации обусловливают возможную неопределенность продолжительности солнечного сияния, метеорологические требования к регистраторам солнечного сияния, по существу, коррелируют с климатологическими условиями облачности (ВМО, 1985).

В случае безоблачного неба ежечасные значения, полученные при восходе или заходе Солнца, могут (в зависимости от количества пыли) быть ошибочными вследствие плохо заданных пороговых или спектральных зависимостей.

В случае переменной облачности (Cu, Cs) скорость изменения перехода высока, и энергетическая освещенность, измеренная пиргелиометром при облачном небе, обычно ниже 80 Вт/м^2, что обусловливает пониженные требования к корректировке порога. Однако угол обзора регистратора может оказывать влияние на результат измерения продолжительности солнечного сияния, если вблизи Солнца находятся скопления ярких облаков.

Необходима более высокая точность, если облака верхнего и среднего яруса (Ci, As) с небольшими изменениями оптической плотности ослабляют прямое солнечное излучение примерно до 120 Вт/м^2. Поэтому большое значение придается углу обзора, а также точности корректировки порога.

Требования к регистраторам солнечного сияния в зависимости от местоположения и времени года различаются в соответствии с преобладающими формами облачности. Облачность можно приблизительно описать посредством трех диапазонов относительной продолжительности солнечного сияния в течение дня SD/SD_0 (см. подраздел 8.1.2), а именно: «облачное небо», когда $0 \le SD/SD_0 < 0{,}3$; «переменная облачность», когда $0{,}3 \le SD/SD_0 < 0.7$) и «ясная погода», когда $0{,}7 \le SD/SD_0 \le 1{,}0$). Результаты измерений в условиях преимущественно облачного неба имеют наибольшие ошибки (обычно самый высокий процент отклонений от эталона).

8.1.3.1 Использование данных о продолжительности солнечного сияния

В первую очередь данные о *SD* используются для характеристики климата местности, особенно курортных районов. При этом учитывается физиологическое воздействие солнечного света большой интенсивности на самочувствие человека.

Описание условий погоды за прошедший период, например за месяц, содержит обычно суточный ход данных о *SD*. Если данные о солнечной радиации отсутствуют, то данные о *SD* представляют большую ценность для сельскохозяйственных целей (ВМО, 1981).

Для перечисленных областей применения погрешность около 10 % для средних значений *SD* представляется приемлемой для периода наблюдений, продолжительностью свыше нескольких десятилетий.

8.1.3.2 Корреляция с другими метеорологическими параметрами

Наиболее значительная корреляция наблюдается между продолжительностью солнечного сияния и суммарной солнечной радиацией *G*. Эта связь описывается так называемой формулой Ангстрема:

$$G/G_0 = a + b \cdot (SD/SD_0) \qquad (8.1)$$

где G/G_0 – так называемый индекс ясности (суммарная солнечная радиация по отношению к ее возможному значению за пределами атмосферы), а SD/SD_0 - относительная продолжительность солнечного сияния (по отношению к ее возможному значению за пределами атмосферы); *a* и *b* – константы, которые должны определяться ежемесячно. По данным, полученным на станциях Германии, установлено, что ошибка среднемесячных значений суммарной солнечной радиации, измеряемой с помощью регистратора Кэмпбелла-Стокса, составляет менее 10 % летом и увеличивается до 30 % зимой (Golchert, 1981).

В формуле Ангстрема подразумевается наличие обратной связи между количеством облаков и продолжительностью солнечного сияния. Это не относится к неплотной облачности верхнего яруса и, по-видимому, к облачным полям, не экранирующим Солнце; поэтому степень обратной связи зависит в основном от объема статистических данных (Stanghellini, 1981; Angell, 1990). Повышение точности данных о *SD* должно уменьшить разброс статистических результатов, но даже точные данные могут дать достоверные результаты только на статистической основе.

8.1.3.3 Требования к автоматической регистрации

Поскольку большинство пунктов наблюдений обеспечено электроэнергией, преимущество регистратора Кэмпбелла-Стокса, состоящее в его автономности, становится не столь существенным. Более того, необходимость ежедневной замены лент приводит к тому, что применение регистраторов Кэмпбелла-Стокса становится проблематичным на автоматических метеорологических станциях или на станциях с ограниченным числом персонала. Другая весомая причина

замены регистраторов Кэмпбелла-Стокса на новые автоматизированные методы измерения состоит в желании избежать затрат на визуальные оценки продолжительности солнечного сияния и получать более точные результаты этих оценок на носителях информации, позволяющих осуществлять обработку данных непосредственно на компьютерах.

8.1.4 Методы измерения

Ниже кратко описаны методы, используемые для измерения продолжительности солнечного сияния, и соответствующие им типы приборов.

(a) Пиргелиометрический метод. Обнаружение с помощью пиргелиометра переходов прямой солнечной радиации через порог 120 Вт/м^2 (согласно рекомендации 10 КПМН-VIII). Значения продолжительности считываются с счетчиков времени, которые приводятся в действие при соответствующих переходах порога в сторону верхних и нижних значений.

Типы приборов: пиргелиометр, соединенный с электронным или компьютерным дискриминатором порога и счетчиком времени.

(b) Пиранометрический метод.

(i) Измерение производится с помощью пиранометра суммарной (G) и рассеянной (D) солнечной радиации, для того, чтобы получить прямую солнечную радиацию с целью распознавания рекомендуемого ВМО порогового значения, как указано в пункте (a).

Типы приборов: все радиометрические системы из двух встроенных пиранометров и одного затеняющего устройства, соединенные с электронным или компьютерным дискриминатором порога и счетчиком времени.

(ii) Пирометрический метод измерения суммарной (σ) солнечной радиации с целью оценки продолжительности солнечного сияния.

Тип прибора: пиранометр в сочетании с электроникой или компьютеризированными устройствами, которые способны выдавать 10 мин значения так же хорошо, как минимум и максимум суммарной (σ) солнечной радиации за ту же десятиминутку.

(c) Метод прожигания. Пороговый эффект прожигания ленты, вызываемый сфокусированной прямой солнечной радиацией (тепловой эффект поглощенной солнечной энергии). Продолжительность солнечного сияния определяется по следам прожога.

Типы приборов: регистраторы солнечного сияния Кэмпбелла-Стокса, особенно рекомендованный вариант IRSR (см. разделы 8.1 и 8.2).

(d) Контрастный метод. Основан на определении различий освещенности в показаниях автономных датчиков, находящихся в различных положениях по отношению к Солнцу, с помощью нормирования выходных сигналов датчиков по значениям сигналов, эквивалентных порогу, рекомендованному ВМО (определяемому на основе сравнения с эталонными значениями *SD* как указано в пункте (b)).

Типы приборов: специально сконструированные приемники с набором датчиков (в основном работающих на фотогальванических элементах), соединенные с электронным дискриминатором и счетчиком времени.

(e) Метод сканирования. Основан на распознавании энергетической освещенности, поступающей от непрерывно сканируемых небольших секторов неба, с помощью ее нормирования по эквиваленту порога энергетической освещенности, рекомендованного ВМО (определяемого на основе сравнения с эталонными SD значениями).

Виды приборов: приемные устройства с одним датчиком, оборудованные специальным сканирующим устройством (например, вращающейся диафрагмой или зеркалом) и соединенные с электронным дискриминатором и счетчиком времени.

Методы измерения продолжительности солнечного сияния, описанные в следующих разделах, являются примерами использования вышеупомянутых принципов. Эти методы и приборы, за исключением переключателя Фостера, участвовали в сравнениях автоматических регистраторов продолжительности солнечного сияния, проведенных ВМО в 1988 – 1989 гг. в Гамбурге, и в сравнениях пиранометров и электронных регистраторов продолжительности солнечного сияния, проведенных Региональной ассоциацией VI (РА-VI) в 1984 г. в Будапеште (ВМО, 1986).

Описание регистратора солнечного сияния Кэмпбелла-Стокса в подразделе 8.2.3 сделано

достаточно подробно, поскольку этот прибор по-прежнему широко используется на национальных сетях метеорологических наблюдений, в связи с чем необходимо учитывать рекомендованные ВМО технические характеристики и правила расчетов.

Тем не менее, заметим, что этот метод был недавно рекомендован[3], поскольку продолжительность яркого солнечного сияния не отмечалась с достаточным постоянством.

Обзор истории создания и развития регистраторов солнечного сияния приведен в работах Coulsen (1970, Hameed и Pittalwala (1989); Sonnetag и Behrens (1992).

8.2 ПРИБОРЫ И ДАТЧИКИ

8.2.1 Пиргелиометрический метод

8.2.1.1 Общие сведения

Данный метод разработан на основе определения солнечного сияния, принятого ВМО (см. подраздел 8.1.1), и поэтому рекомендуется для получения эталонных значений продолжительности солнечного сияния. Метод предполагает использование защищенного от погодных условий пиргелиометра и надежного устройства для слежения за движением Солнца, предназначенного для автоматического или, в крайнем случае, полуавтоматического наведения пиргелиометра на Солнце. Этот метод можно модифицировать, выбрав пиргелиометр, в котором угол обзора влияет на энергетическую освещенность, измеряемую в то время, когда облака закрывают Солнце.

Контроль за порогом солнечного сияния осуществляется постоянным сравнением выходных данных пиргелиометра с пороговым эквивалентным напряжением V_{th} = 120 Вт/м^2 · R мкВ/Вт · м^2, которое рассчитывается по чувствительности пиргелиометра R. Порог перехода определяется, если $\Delta V = V - V_{th}$ меняет знак. Подсоединенный счетчик времени действует при $\Delta V > 0$.

8.2.1.2 Источники ошибок

Пока еще не разработаны единые требования для угла обзора. Большие различия между результатами двух пиргелиометров с различными углами обзора возможны, особенно если Солнце окружено облаками (см. Часть 1, глава 7 раздел 7.2 и пункт 7.2.1.3). Более того, типичные ошибки пиргелиометров, а именно: эффект наклона, температурная зависимость, нелинейность и смещение нуля, зависят от класса пиргелиометра. Более значительные ошибки появляются, если ориентация на Солнце неточная или если окно приемника залито дождем или покрыто снегом.

8.2.2 Пиранометрический метод

8.2.2.1 Общие сведения

Пиранометрический метод для получения данных о продолжительности солнечного сияния основан на фундаментальной взаимосвязи между прямой (I), суммарной (G) и рассеянной (D) солнечной радиацией:

$$I \cdot \cos \zeta = G - D \qquad (8.2)$$

где ζ – зенитный угол Солнца, а $I \cdot \cos \zeta$ – горизонтальная составляющая I. Для того чтобы точно выполнить условия уравнения (8.2), затененный угол обзора пиранометра для измерения D должен быть равным углу обзора пиргелиометра (см. Часть 1, глава 7). Кроме того, спектральные диапазоны, а также временные постоянные пиргелиометров и пиранометров должны быть по возможности идентичными.

При отсутствии направленного к Солнцу пиргелиометра и при наличии полученных с помощью компьютера данных пиранометрических измерений G и D принятый в ВМО численный критерий солнечного сияния может быть выражен, согласно уравнению (8.1), с помощью формулы:

$$(G-D)/\cos \zeta > 120 \text{ W m}^{-2} \qquad (8.3)$$

которая может использоваться применительно к мгновенным отсчетам.

Модификации этого метода на различных станциях сводятся прежде всего к следующему:

(a) выбор пиранометров;
(b) применение затеняющего устройства (затеняющее кольцо или затеняющий диск с устройством слежения за движением Солнца) и геометрия затенения (угол затенения);
(c) корректировка с учетом потерь, обусловленных затеняющим кольцом.

В качестве специальной модификации следует упомянуть замену критерия в уравнении (8.3) на статистически полученную формулу параметризации (для того чтобы избежать определения зенитного угла Солнца) для применения в более простых системах сбора данных (Sonntag and Behrens, 1992).

3 (см. Рекомендация 10 (CIMO-VIII)).

Пиранометрический метод, использующий только один пиранометр, для оценки продолжительности солнечного сияния, основан на двух следующих предположениях о связи между радиацией и облачностью:

(a) Довольно точное вычисление возможной суммарной радиации на поверхности Земли, основано на расчетном значении «заатмосферной радиации» (G_0), принимая во внимание её уменьшение за счёт рассеивания в атмосфере. Уменьшающий фактор зависит от высоты Солнца h и мутности атмосферы T. Соотношение между измеренной суммарной радиацией и таким образом рассчитанной радиацией при ясном небе является хорошей мерой наличия облаков;

(b) Очевидное различие между минимальным и максимальным значениями суммарной радиации, измеренной по 10 минутным интервалам, предполагает временное закрытие Солнца облаками. С другой стороны, отсутствие такого различия, свидетельствует об отсутствии радиации или её наличии только во время 10 минутного интервала (а именно, $SD = 0$ или $SD = 10$ минут).

Основанный на этих предположениях алгоритм может быть использован (Slob и Monna, 1991) для расчёта дневной SD продолжительности солнечного сияния из сумм за 10 минутные SD. В пределах этого алгоритма SD определяется по 10 минутным интервалам с наличием солнечного сияния (а именно, $SD_{10} = f \cdot 10$ минут, где f – часть интервала с солнечным сиянием, $0 \le f \le 1$). Уменьшающий фактор главным образом зависит от оптического пути солнечного излучения, проходящего через атмосферу. Поскольку этот путь зависит от высоты Солнца, $h = 90° - z$, алгоритм разграничивает 3 временных зоны. Хотя в основном $f = 0$ или $f = 1$, особое внимание уделено $0 < f < 1$. Этот алгоритм приведён в Приложении. Неопределённость расчётов составляет около 0,6 часа для дневных сумм.

8.2.2.2 Источники ошибок

Согласно уравнению (8.3) погрешности при измерениях суммарной и рассеянной солнечной радиации ведут к увеличению ошибки расчета прямой солнечной радиации и существенно увеличиваются за счет увеличения зенитного угла Солнца. Поэтому для уменьшения ошибок результатов важно точно вводить поправки на потери рассеянной солнечной энергии из-за использования затеняющих колец (WMO, 1984*a*) и выбирать высококачественный пиранометр.

Технические характеристики регистратора солнечного сияния Кэмпбелла-Стокса (класс IRSR)

Стеклянный шар		*Сферический сегмент*		*Ленты для записи*	
Форма:	Постоянная	Материал:	пушечная бронза или другой металл с эквивалентной прочностью	Материал:	Картон хорошего качества, в незначительной степени подверженный действию влаги
Диаметр:	10 см	Радиус:	73 мм	Ширина:	Точно в пределах 0,3 мм
Цвет:	Очень слабый или бесцветный	Дополнительные технические характеристики:	(a) Центральная линия полудня гравируется поперек внутренней поверхности;	Thickness:	0,4 ± 0,05 мм
Показатель рефракции:	1.52 ± 0,02		(b) Корректировка го-ризонтального наклона производится в соответствии с широтой;	Воздействие влаги:	В пределах 2 %
Фокусное расстояние:	75 мм для натриевого «D» света		(c) Двойное основание для регулировки уровня и азимута	Цвет:	Темный, однородный, невосприимчивый к рассеянному дневному свету
				Градуировка:	Часовые линии черного цвета

8.2.3 Регистратор солнечного сияния Кэмпбелла-Стокса (метод прожигания)

Основной составной частью регистратора солнечного сияния Кэмпбелла-Стокса является стеклянный шар, устанавливаемый в центре сферического сегмента, диаметр которого позволяет солнечным лучам, проходящим через этот шар, фокусироваться строго на ленту, вставленную в пазы сферического сегмента. Способ крепления шара зависит от того, в каких широтах (полярных, умеренных, тропических) используется прибор. Для получения хороших результатов сферический сегмент и шар должны быть сделаны с высокой точностью, а крепление следует выполнять таким образом, чтобы шар располагался точно по центру. В сферическом сегменте имеются три пары перекрывающих друг друга пазов (одна пара для обоих равноденствий) для лент, используемых в различные времена года; при этом форма и длина лент выбираются в соответствии с требованиями геометрии оптики системы. Следует отметить, что проблема, связанная с началом прожога при различных условиях облачности, свидетельствует о том, что этот прибор, так же как и любой другой, работающий в соответствии с теми же принципами, не обеспечивает измерение истинной продолжительности солнечного сияния.

В данной таблице приведены основные технические характеристики и требования к регистратору солнечного сияния Кэмпбелла-Стокса класса IRSR. Регистратор данного класса должен соответствовать детальным техническим требованиям, перечень которых издан Британским метеорологическим бюро, а ленты, предназначенные для использования в IRSR, должны соответствовать техническим требованиям, описание которых издано Метео-Франс.

8.2.3.1 Настройка

При установке регистратора следует провести следующие корректировки:

(a) основание должно быть установлено горизонтально, строго по уровню;

(b) установка сферического сегмента должна быть проведена таким образом, чтобы центральная линия ленты равноденствия совпадала с небесным экватором (это можно сделать с помощью шкалы широт, нанесенной на опоре сегмента);

(c) вертикальная плоскость, проходящая через центр шара, и отметка полудня на сферическом сегменте должны лежать в плоскости географического меридиана (установка «север» – «юг»).

Для того чтобы проверить, соответствует ли установка регистратора требованию пункта (c), необходимо наблюдать отражение Солнца во время истинного полудня для данной местности: если прибор отрегулирован правильно, то отражение должно падать на отметку полудня сферического сегмента или ленты.

8.2.3.2 Оценка данных

Для получения однородных результатов по регистраторам Кэмпбелла-Стокса очень важно выполнять нижеследующие указания по обработке данных IRSR. Суммарная дневная продолжительность яркого солнечного сияния определяется следующим образом: по краю ленты одинакового изгиба отмечаются отрезки, длины которых соответствуют следу прожога; далее с точностью до ближайшей десятой доли часа измеряется суммарная длина имеющихся на ленте отрезков прожога. Оценку данных следует производить так:

(a) если след прожога отчетлив и имеет закруглённые концы, то его длину на каждом конце следует уменьшить на величину, равную половине радиуса изгиба конца следа; это будет соответствовать уменьшению общей длины каждого следа на 0.1 ч;

(b) если след прожога имеет круглую форму, то измеряемая длина должна быть равна половине диаметра следа. Если в день регистрируется более одного закруглённого следа, то этого достаточно, чтобы считать два или три следа эквивалентом 0,1 ч солнечного сияния; четыре, пять, шесть следов – эквивалентом 0,2 ч солнечного сияния и т. д. с шагом 0,1 ч;

(c) если след представляет собой узкую линию, следует измерять всю ее длину, даже тогда, когда лента только слегка обесцвечена;

(d) если отчетливый след с течением времени сокращается по ширине по крайней мере на одну треть, то из суммарной длины для каждого такого сокращения следует вычесть величину, равную 0,1 ч. При этом максимально вычитаемая величина не должна превышать половины общей длины следа.

Для анализа случайных и систематических ошибок, допущенных при оценке данных о продолжительности солнечного сияния, а также с целью обеспечения объективности результатов при сравнении приборов рекомендуется, чтобы оценку данных каждого сравниваемого прибора производили последовательно и независимо два или более специалиста в этой области.

8.2.3.3 Специальные модификации прибора

Так как стандартный регистратор солнечного сияния Кэмпбелла-Стокса полностью не фиксирует солнечное

сияние за летние месяцы на станциях, расположенных на широтах выше 65°, в некоторых странах используются модифицированные версии прибора.

Один из вариантов предусматривает использование двух регистраторов Кэмпбелла-Стокса, установленных один возле другого, при этом один из них установлен обычным образом, а другой направлен на север.

В суровых климатических условиях, возможно, существует необходимость подогрева прибора во избежание обмерзания и конденсации влаги на стеклянном шаре. Сравнение результатов подогреваемых и неподогреваемых приборов показало, что, например, в условиях климата Северной Европы неподогреваемый прибор не регистрирует около 1 % среднемесячного значения солнечного сияния летом и около 5 – 10 % зимой по сравнению с подогреваемым.

8.2.3.4 Источники ошибок

Ошибки данного регистратора возникают, главным образом, вследствие зависимости регистрации прожогов от температуры и влажности ленты, а также вследствие эффекта сильного прожога, особенно в случае разорванных облаков (Ikeda, Aoshima and Miyake, 1986).

Значения, полученные в утренние часы в средних и высоких широтах, часто имеют ошибки, обусловленные обмерзанием или отпотеванием стеклянного шара.

8.2.4 Приборы для оценки контраста

Датчик солнечного сияния Фостера – это электронно-оптическое устройство, которое было введено в эксплуатацию на сетях наблюдения в США в 1953 г. (Foster and Foskett, 1953). Прибор состоит из двух селеновых фотоэлементов, один из которых защищен от прямого солнечного излучения затеняющим кольцом. Элементы соединены таким образом, что при отсутствии прямого солнечного луча никакого сигнала не поступает. Регистратор приводится в действие, когда прямая солнечная радиация превышает примерно 85 Вт/м^2 (Hameed and Pittalwala, 1989). Положение защитного кольца требует корректировки только четыре раза в год для учета сезонных изменений движения Солнца по небосводу.

8.2.5 Приборы для оценки контраста и сканирующие приборы

8.2.5.1 Общие сведения

Несколько различных моделей электронно-оптических датчиков, а именно датчиков для оценки контраста, и сканирующих приборов прошли сравнительные испытания, организованные ВМО (Automatic Sunshine Duration Measurement Comparison) и проведенные в Региональном радиационном центре Региональной ассоциации VI (РА-VI) в Гамбурге с 1988 по 1989 г. Отчет об этих испытаниях содержит детальные описания всех протестированных приборов и датчиков (WMO, в подготовке).

8.2.5.2 Источники ошибок

Распределение облачности на небосклоне или солнечное излучение, отраженное от окружающих объектов, могут влиять на результаты, поскольку применяются различные методы оценки контраста и сравнительно большие углы обзора используемых элементов. Кремниевые фотогальванические элементы без фильтров обычно максимально чувствительны в спектре, близком к инфракрасному, поэтому полученные результаты зависят от спектра прямой солнечной радиации.

Поскольку сравнительно небольшой прямоугольный угол обзора таких приборов отличается в большей или меньшей степени от циркулярно-симметричного угла эталонного пиргелиометра, распределение облачности вокруг Солнца может вызвать отклонения от эталонных значений.

Так как угол обзора является небольшим, некачественное стеклянное покрытие может служить особым источником ошибок. Помимо ошибок в определении высоты Солнца, следует учитывать ошибки спектральной чувствительности датчиков. В настоящее время принято считать, что только один выпускаемый регистратор, в котором использован пироэлектрический приемник, не подвержен спектральным эффектам.

8.3 УСТАНОВКА ПРИЕМНИКОВ СОЛНЕЧНОГО СИЯНИЯ

Для правильной установки приемников солнечного света необходимо руководствоваться следующими тремя положениями.

(a) Приемники должны быть жестко укреплены на неподвижной опоре. Это требование необязательно для датчиков SONI, которые предназначены для установки на буях.

(b) Местоположение приемника в любое время года должно быть открыто Солнцу в течение всего периода, когда Солнце располагается под углами более 3° над горизонтом. Эта рекомендация может быть изменена в следующих случаях:

(c) при отсутствии другого места для установки, когда наличие небольших антенн или других препятствий с небольшими угловыми размерами (не более 2°) допустимо. В этом случае местоположение, высота и угловой размер препятствий должны быть четко описаны, а потенциальная потеря продолжительности солнечного сияния (в часах) в особые часы и дни должна определяться с помощью астрономических расчетов видимой траектории Солнца;

(d) в горных районах (например, в долинах) естественные препятствия должны рассматриваться как фактор локального климата и должны четко описываться, как указано выше.

(e) На месте установки не должно быть поверхностей, отражающих значительное количество прямой солнечной радиации на приемник, поскольку отраженная солнечная радиация в основном может влиять на результаты измерений контраста. Для исключения таких помех близлежащие поверхности не должны быть белого цвета, их следует очищать от снега или затенять.

Корректировка оси приемника описана выше. Для некоторых приемников рекомендуется изменять наклон оси в зависимости от сезона.

8.4 ОБЩИЕ ИСТОЧНИКИ ОШИБОК

Ошибки в оценках продолжительности солнечного сияния, полученных с помощью различных приборов и методов, указываются в виде отклонений от эталонных значений, принятых ВМО для зимних условий Гамбурга (Германия) в 1988 – 89 г.

Однако эталонные значения также в некоторой степени содержат ошибки, обусловленные погрешностями при калибровке используемого пиргелиометра и размеров угла обзора (зависимость от ореола). Для единичных значений необходимо, кроме того, учитывать постоянную времени. Общими источниками ошибок являются:

(a) калибровка регистратора (корректировка порогового эквивалента прямой солнечной радиации (раздел 8.5));

(b) типичная реакция чувствительности регистратора на изменения метеорологических условий (например, температуры, облачности, пыли) и положения Солнца (например, ошибки в ориентации, солнечный спектр);

(c) неправильная установка и неустойчивость основных составляющих приборов;

(d) упрощенная или ошибочная оценка измеренных величин;

(e) ошибки при отсчете времени;

(f) низкий уровень технического обслуживания;

(g) неудовлетворительное качество эксплуатации;

8.5 КАЛИБРОВКА

До описания некоторых методов калибровки целесообразно сделать несколько общих замечаний:

(a) отсутствует стандартизированный метод калибровки приемников *SD*;

(b) при калибровке на открытом воздухе для получения эталонных данных следует использовать пиргелиометрический метод;

(c) ввиду наличия различий между конструкцией приемников *SD* и эталонного прибора, а также естественной изменчивости условий измерений, результаты калибровки следует получать путем длительных сравнений (в течение нескольких месяцев);

(d) обычно калибровка приемников *SD* требует специальных методов для того, чтобы отрегулировать их пороговое значение (с помощью электроники для электрооптических приборов, с помощью программного обеспечения для пиранометрических систем);

(e) для электрооптических приборов с аналоговым выходным устройством период калибровки может быть сравнительно непродолжительным;

(f) лабораторный метод (с использованием лампы) рекомендуется, прежде всего, для регулярной поверки устойчивой работы полевых приборов;

8.5.1 Методы калибровки в натурных условиях окружающей среды

8.5.1.1 Сравнение данных о продолжительности солнечного сияния

Эталонные значения продолжительности солнечного сияния SD_{ref} должны измеряться одновременно со значениями калибруемого приемника SD_{cal}. В качестве эталонного прибора следует использовать пиргелиометр, имеющий устройство для слежения за движением Солнца и соединенный с определителем порога прямой солнечной радиации (см. подраздел 8.1.4). Как вариант можно использовать регулярно калибруемый регистратор солнечного сияния выбранной точности. Поскольку требования к точности порога прямой солнечной радиации, измеряемой приемником, изменяются в зависимости от метеорологических условий (см. подраздел 8.1.3), результаты сравнений должны определяться статистически на основе длинных рядов данных измерений.

Если этот метод применяется ко всему ряду данных за определенный период (с типичными условиями облачности), то первый результат калибровки представляет собой соотношение $q_{tot} = \sum_{tot} SD_{ref} / \sum_{tot} SD_{cal}$.

При q > 1 или q < 1 напряжение, эквивалентное пороговому значению, должно быть соответственно отрегулировано таким образом, чтобы $q = 1$. Поскольку число необходимых корректировок слабо коррелируется с q_{tot}, необходимы дополнительные периоды последовательных сравнений для того, чтобы постепенно оценить подход к идеальному порогу посредством аппроксимирования $q_{tot} = 1$. Для средних широт Европы продолжительность всего периода калибровки может составлять от 3 до 6 месяцев. Поэтому технические устройства для калибровки сетевых приемников должны предусматривать возможность калибровки одновременно нескольких приемников. (Применение qtot в качестве поправочного коэффициента для величины $\sum SD$ дает надежные результаты только в том случае, если при измерении облачные условия будут такими же, как и в период проведения калибровки. В противном случае использовать данный метод не рекомендуется).

Если описываемый метод калибровки применяется к рядам данных, которые выбираются в соответствии со специальными условиями измерений (облачность, угол высоты Солнца, относительная продолжительность солнечного сияния и т. д.), то можно, например, статистически определить факторы $q_{sel} = \sum_{sel} SD_{ref} / \sum_{sel} SD_{cal}$ для различных видов облачности и использовать их для корректировки рядов данных, для которых четко указана облачность.

С другой стороны, корректировка порогового эквивалентного напряжения особенно рекомендуется, если величины q_{sel} рассматриваются в плохих для калибровки условиях облачности (это, например, облачность типа Ci, As). Повторная процедура для валидации корректировки также необходима. В зависимости от погоды сравнение может проводиться в течение нескольких недель или месяцев.

8.5.1.2 Сравнение аналоговых сигналов

Этот метод применяется только для приемников *SD*, имеющих аналоговый выход, линейно реагирующий на поступление прямой солнечной радиации, по крайней мере в диапазоне менее 500 Вт/м^2. Сравнение значений эталонной прямой солнечной радиации, измеряемой пиргелиометром и одновременно измеряемой аналоговым прибором, должно проводиться при безоблачном небе или в другие периоды времени при значениях прямой солнечной радиации менее 500 Вт/м^2, незначительно меняющихся во времени.

Анализ линейной связи такого ряда данных дает наилучшую линию регрессии, по которой можно получить пороговое эквивалентное напряжение для 120 Вт/м^2. Если результат калибровки отклоняется от напряжения, указанного в сертификате, более чем на ± 20 %, то порог приемника должен быть отрегулирован на новое значение.

Для приемников с ярко выраженной спектральной чувствительностью полученные данные при низких углах высоты Солнца и при значениях прямой солнечной радиации около 120 Вт/м^2 должны быть исключены из анализа ввиду их спектральной нелинейности, если не представляет интереса пороговое напряжение при восходе и заходе Солнца. Пороговое эквивалентное напряжение должно экстраполироваться от более высоких значений прямой солнечной радиации.

8.5.1.3 Метод определения среднего эффективного порога солнечной радиации (MEIT)

Так называемый метод MEIT основан на определении ежечасных средних порогов солнечной радиации I_m по средним наблюденным значениям прямой солнечной радиации для калибруемого приемника.

В соответствии с этим методом сначала определяют ежечасные значения продолжительности солнечного сияния $SD_{ref}(h_k, I(n))$ по данным контролируемых компьютером пиргелиометрических измерений для часов h_k и по фиктивным значениям пороговой солнечной радиации $I(n)$, последовательно задаваемым в диапазоне от 60 до 240 Вт/м^2 (последнее означает, что $I(n)$ – (60 + n) Вт/м^2 при n = 0, 1, 2,...,180).

Затем оценивают ежечасные значения $SD(hk)$ на основе данных измерений приёмником радиации; полученные таким образом ежечасные оценки сравнивают с $SD_{ref}(h_k, I(n))$ для того, чтобы найти такое $n = n_k$, для которого $SD(h_k)$ равно $SD_{ref}(h_k, I(n_k))$. Найденное таким образом $I(n_k)$ соответствует среднечасовому эффективному порогу солнечной радиации для часов h_k: $I_m(h_k) = (60 + n_k)$ Вт/м^2. Если n_k не найдено непосредственно, его необходимо определить интерполяцией между соседними значениями.

И, наконец, последним шагом является регулировка порогового эквивалентного напряжения регистратора, если относительное отклонение между средним значением MEIT (значением I_m) и идеальным порогом 120 Вт/м^2 составляет более ± 20 %. Среднее

значение MEIT должно представлять собой, например, среднемесячное значение вследствие большого разброса отклонений ежечасных значений MEIT.

Этот метод неприменим в часы с быстрой сменой пороговых значений; средний градиент за час должен быть менее 5 Вт/м^2 · с. Значения MEIT не являются репрезентативными для всего набора данных за период калибровки.

8.5.2 Метод калибровки в лаборатории

Поскольку в лаборатории моделировать распространение потоков прямого и рассеянного солнечного излучения довольно сложно, можно рекомендовать только «резервную калибровку», которая применима для приемников *SD* с регулируемым пороговым эквивалентным напряжением. Лабораторное контрольное оборудование должно включать стабилизированный источник радиации (желательно со спектром, близким к солнечному) и стенд для точной локальной регулировки приемника *SD* а также тщательно откалиброванный по Солнцу приемник *SD*, который используется в качестве эталонного. Эталонный и калибруемый приемники должны быть одной и той же модели.

В начале проведения испытаний эталонный приемник устанавливается точно в луче лампы таким образом, чтобы аналоговое устройство вывода или обычный «переключатель солнечного сияния» показывал 120 Вт/м^2. После этого эталонное устройство заменяется на проверяемое устройство, пороговое напряжение которого должно быть отрегулировано, чтобы активизировать переключение или получить эквивалент 120 Вт/м^2. Повторные результаты должны быть проверены путем дальнейших повторных замен приборов.

8.6 ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ

В техническое обслуживание обычно включается следующее:

(a) Очистка. Ежедневная очистка соответствующих окон всех приемников, особенно сканирующих устройств с небольшими углами обзора. Приборы без устройств защиты от росы и инея должны проверяться в специальные дни более одного раза.

(b) Контроль. Ежедневный контроль касается проверки вращения сканирующих частей, а также проверки значений получаемых данных.

(c) Смена лент. В регистраторе солнечного сияния Кэмпбелла-Стокса ежедневно следует заменять ленту; в других устройствах соответствующие носители данных также должны регулярно заменяться.

(d) Корректировка. Корректировки необходимы, если сезонное изменение наклона приемника рекомендуется фирмой-изготовителем, а также, возможно – после сильных штормов.

Техническое обслуживание специальных частей приемников и систем для сбора данных должно производиться квалифицированными техниками или инженерами, как предусмотрено в инструкциях.

ПРИЛОЖЕНИЕ

АЛГОРИТМ ВЫЧИСЛЕНИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ СОЛНЕЧНОГО СИЯНИЯ НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЙ ПРЯМОЙ СУММАРНОЙ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ (см. Slob and Monna, 1991, 15 стр.)

Определение суточных значений SD основано на суммировании f данных 10-минутных интервалов, а именно $SD = \Sigma\, SD_{10}$, где $SD_{10} = f \leq 10$ мин. $f = 0$ (нет солнечного сияния, все затянуто облаками) или 1 (солнечное сияние, ясное небо), но особое внимание интервалу $0 < f < 1$ (частичное солнечное сияние, частично облачное небо). Вследствие корреляции между SD и глобальным излучением, измеренным в горизонтальной плоскости, в зависимости от высоты солнца (h), различие устанавливается в первую очередь в отношении sin (h).

Используются следующие переменные:

- h высота солнца в градусах
- G глобальное излучение в горизонтальной плоскости в Вт/м^2
- I прямая солнечная радиация в плоскости перпендикулярной направлению солнца в Вт/м^2
- D рассеянная солнечная радиации в горизонтальной плоскости в Вт/м^2
- T_L мутность (безразмерная величина)

Для измеренных значений G принимается:

- G среднее значение 10-мин данных о глобальном излучении
- G_{min} минимальное значение глобального излучения из измеренных за 10-минутные интервалы
- G_{max} максимальное значение глобального излучения из измеренных за 10-минутные интервалы ($G_{min} \leq G \leq G_{max}$)

Используемые уравнения:

$G_0 = I_0 \sin(h)$, $I_0 = 1367$ Вт/м^2 (для внеземного излучения)

$I = I_0 \exp(-T_L/(0{,}9 + 9{,}4 \sin(h))$, $I_0 = 1367$ Вт/м^2

$c = (G - D)/(I \sin(h))$, где $T_L = 4$ и $D = 1{,}2\, G_{min}$ если ($1{,}2\, G_{min} < 0{,}4$) и $D = 0{,}4$

<table>
<tr><td>Высота солнца</td><td>sin (h)
< 0,1, h < 5,7°</td><td colspan="2">0,1 ≤ sin (h) ≤ 0,3,
5,7° ≤ h ≤ 17,5°</td><td colspan="6">sin (h) ≥ 0,3,
h ≥ 17,5°</td></tr>
<tr><td rowspan="9">Другие критерии</td><td rowspan="9">Нет других критериев</td><td colspan="2" rowspan="3">При $G/G_0 \leq \{0{,}2 + \sin(h)/3 + \exp(-T_L/(0{,}9 + 9{,}4 \sin(h))\}$
когда $T_L = 6$?</td><td colspan="6">Is $G_{max}/G_0 < 0.4$?</td></tr>
<tr><td rowspan="8">Если «да»</td><td colspan="5">Если «нет»</td></tr>
<tr><td colspan="5">При $G_{min}/G_0 > \{0{,}3 + \exp(-T_L/(0{,}9 + 9{,}4 \sin(h))\}$ и когда $T_L = 10$?</td></tr>
<tr><td>Если «да»</td><td>Если «нет»</td><td>Если «да»</td><td colspan="4">Если «нет»</td></tr>
<tr><td colspan="4">При $G_{max}/G_0 > \{0{,}3 + \exp(-T_L/(0{,}9 + 9{,}4 \sin(h))\}$ и $G_{max} - G_{min} < 0{,}1\, G_0$ и когда $T_L = 10$?</td></tr>
<tr><td colspan="2"></td><td colspan="2">Если «да»</td><td colspan="3">Если «нет»</td></tr>
<tr><td colspan="4"></td><td>$c < 0$</td><td>$0 \leq c \leq 1$</td><td>$c > 1$</td></tr>
<tr><td>Итог</td><td>$f = 0$</td><td>$f = 0$</td><td>$f = 1$</td><td>$f = 0$</td><td>$f = 1$</td><td>$f = 1$</td><td>$f = 0$</td><td>$f = c$</td><td>$f = 1$</td></tr>
</table>

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Angell, J.K., 1990: Variation in United States cloudiness and sunshine duration between 1950 and the drought year of 1988. *Journal of Climate*, 3, pp. 296–308.

Baumgartner, T., 1979: Die Schwellenintensität des Sonnenscheinautographen Campbell-Stokes an wolkenlosen Tagen. *Arbeitsberichte der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt,* No. 84, Zürich.

Bider, M., 1958: Über die Genauigkeit der Registrierungen des Sonnenscheinautographen Campbell-Stokes. *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie*, Serie B, Volume 9, No. 2, pp. 199–230.

Coulson, K.L., 1975: *Solar and Terrestrial Radiation. Methods and Measurements*. Academic Press, New York, pp. 215–233.

Foster, N.B. and L.W. Foskett, 1953: A photoelectric sunshine recorder. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 34, pp. 212–215.

Golchert, H.J., 1981: Mittlere Monatliche Globalstrahlungsverteilungen in der Bundesrepublik Deutschland. *Meteorologische Rundschau*, 34, pp. 143–151.

Hameed, S. and I. Pittalwala, 1989: An investigation of the instrumental effects on the historical sunshine record of the United States. *Journal of Climate*, 2, pp. 101–104.

Ikeda, K., T. Aoshima and Y. Miyake, 1986: Development of a new sunshine-duration meter. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Volume 64, Number 6, pp. 987–993.

Jaenicke, R. and F. Kasten, 1978: Estimation of atmospheric turbidity from the burned traces of the Campbell-Stokes sunshine recorder. *Applied Optics*, 17, pp. 2617–2621.

Painter, H.E., 1981: The performance of a Campbell-Stokes sunshine recorder compared with a simultaneous record of normal incidence irradiance. *The Meteorological Magazine,* 110, pp. 102–109.

Slob, W.H. and W.A.A. Monna, 1991: *Bepaling van een directe en diffuse straling en van zonneschijnduur uit 10-minuutwaarden van de globale straling*. KNMI TR136, de Bilt.

Sonntag, D. and K. Behrens, 1992: Ermittlung der Sonnenscheindauer aus pyranometrisch gemessenen Bestrahlungsstärken der Global-und Himmelsstrahlung. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes*, No. 181.

Stanghellini, C., 1981: A simple method for evaluating sunshine duration by cloudiness observations. *Journal of Applied Meteorology*, 20, pp. 320–323.

World Meteorological Organization, 1962: Abridged *Final Report of the Third Session of the Commission for Instruments and Methods of Observation*. WMO-No. 116 R.P. 48, Geneva.

World Meteorological Organization, 1982: Abridged *Final Report of the Eighth Session of the Commission for Instruments and Methods of Observation*. WMO-No. 590, Geneva.

World Meteorological Organization, 1984*a*: Diffuse solar radiation measured by the shade ring method improved by a new correction formula (K. Dehne). *Papers Presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Cost-effective Meteorological Observations (TECIMO).* Instruments and Observing Methods Report No. 15, Geneva, pp. 263–267.

World Meteorological Organization, 1984*b*: A new sunshine duration sensor (P. Lindner). *Papers Presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Cost-effective Meteorological Observations (TECIMO)*. Instruments and Observing Methods Report No. 15, Geneva, pp. 179–183.

World Meteorological Organization, 1985: Dependence on threshold solar irradiance of measured sunshine duration (K. Dehne). *Papers Presented at the Third WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation (TECIMO III)*. Instruments and Observing Methods Report No. 22, WMO/TD-No. 50, Geneva, pp. 263–271.

World Meteorological Organization, 1986: *Radiation and Sunshine Duration Measurements: Comparison of Pyranometers and Electronic Sunshine Duration Recorders of RA VI* (G. Major). WMO Instruments and Observing Methods Report No. 16, WMO/TD-No. 146, Geneva.

World Meteorological Organization, 1990: Abridged *Final Report of the Tenth Session of the Commission for Instruments and Methods of Observation*. WMO-No. 727, Geneva.

World Meteorological Organization, 2003: *Manual on the Global Observing System*. WMO-No. 544, Geneva.

ГЛАВА 9

ИЗМЕРЕНИЕ ВИДИМОСТИ

9.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

9.1.1 Определения

Видимость была впервые определена для метеорологических целей как параметр, который должен оцениваться наблюдателем, причем такого рода наблюдения широко используются. Однако оценка видимости зависит от многих субъективных и физических факторов. Необходимый метеорологический параметр, которым является прозрачность атмосферы, может быть измерен объективно и представлен как метеорологическая оптическая дальность (МОД).

Метеорологическая оптическая дальность – это длина пути светового потока в атмосфере, необходимая для уменьшения этого потока в параллельном пучке лучей от лампы накаливания при цветовой температуре 2700 К до 5 % его первоначального значения; при этом световой поток оценивается по функции фотометрической яркости, которая определена Международной комиссией по освещению (МКО).

Видимость, метеорологическая видимость в дневное время и метеорологическая видимость в ночное время определяется как наибольшее расстояние, на котором черный объект, имеющий подходящие размеры и находящийся у поверхности земли, можно увидеть и распознать в дневное время или можно увидеть и распознать в ночное время, повысив общую освещенность до уровня нормальной дневной освещенности (ВМО, 1992*a*; 2003)[1] .

Дальность прямой видимости (метеорологическая) – это расстояние, на котором видимый контраст наблюдаемого тела на фоне равен порогу чувствительности глаза наблюдателя (ВМО, 1992*a*).

Воздушная дымка создается светом от солнца и неба, рассеянным в глаза наблюдателя атмосферными аэрозолями (и в небольшой степени молекулами воздуха), находящимися в конусе зрения наблюдателя. Рассеянный свет достигает глаза таким же образом, как и рассеянная радиация достигает поверхности Земли.

Воздушная дымка является основным фактором, ограничивающим горизонтальную видимость черных объектов в дневное время за счет ее интегрированного воздействия вдоль конуса зрения от глаза до объекта, выражающегося в повышении видимой яркости достаточно отдаленного черного объекта до уровня, который не позволяет отличить его от фоновой яркости неба. В отличие от случая субъективного восприятия, большая часть рассеянного света попадает в глаз наблюдателя из той части конуса его зрения, которая находится от него на довольно близком расстоянии.

В различных стандартах, таких как стандарт Международной электротехнической комиссии, подробно описаны следующие четыре фотометрических качества (МЭК, 1987):

(а) *световой поток* (обозначение: F (или Φ), единица: люмен) – параметр, рассчитываемый по потоку излучения при оценке излучения по его действию на стандартного фотометрического наблюдателя МКО;

(б) *сила света* (обозначение: I, единица: кандела или лм/ср) – отношение светового потока к единице телесного угла;

(в) *яркость* (обозначение: L, единица: кд/м^2) – отношение силы света к площади.

(г) *освещенность* (обозначение: E, единица: люкс или лм/м^2) – отношение светового потока к площади освещаемой им поверхности.

Коэффициент ослабления (обозначение σ) – доля светового потока, теряемая коллимированным пучком лучей, испускаемых раскаленным источником при цветовой температуре 2700 К при прохождении единицы расстояния в атмосфере. Этот коэффициент является мерой ослабления, возникающего в результате поглощения и рассеивания.

Яркостный контраст (обозначение C) – отношение разности между яркостью объекта и яркостью его фона к яркости фона.

---

1 Во избежание путаницы, видимость в ночное время не следует определять просто как наибольшее расстояние на котором можно увидеть и распознать источники света определенной умеренной силы, (см. Сокращенный окончательный отчет одиннадцатой сессии Комиссии по приборам и методам наблюдений), 1994, ВМО № 807)). Если видимость следует определять исходя из оценки источников света, рекомендуется оценивать дальность видимости по точно определенной интенсивности света и ее практическому применению, подобно дальности видимости на ВПП. Тем не менее, на своей 11 сессии КПМН признала необходимость дальнейших исследований для разрешения практических трудностей, возникающих в связи с употреблением этого определения

Пороговый контраст (обозначение ε) — минимальное значение контраста яркости, который может различить глаз человека, т. е. значение, которое позволяет отличить объект от его фонового освещения. Пороговый контраст у разных людей различный.

Пороговая освещенность (обозначение E_t) – наименьшая освещенность на зрачке глаза наблюдателя, которая позволяет обнаруживать точечные источники света на фоне с данной яркостью. В связи с этим значение E_t изменяется в зависимости от условий освещения.

Показатель пропускания (обозначение T) определяется для коллимированного пучка лучей, испускаемых раскаленным источником при цветовой температуре 2700 К, как часть светового потока, сохраняющаяся в потоке после прохождения им в атмосфере оптического пути заданной длины. Показатель пропускания называется также коэффициентом пропускания. Термины «коэффициент пропускания» или «пропускная способность атмосферы» используются при определении пути, т. е. конкретной длины (например, в случае с трансмиссометром). В этом случае T часто умножается на 100 и выражается в процентах.

9.1.2 Единицы измерения и шкалы

Метеорологическая видимость, или МОД, выражается в метрах или в километрах. Диапазон измерений зависит от дальнейшего использования данных. В то время как дл я потребностей синоптической метеорологии диапазон измерений МОД составляет 100 м – 70 км и более, для других применений он может быть более узким. Так, в гражданской авиации верхней границей может быть и 10 км. Этот диапазон может быть еще более сужен при использовании измерений для оценки дальности видимости на взлетно-посадочной полосе, определяющей условия для взлета и посадки при низкой видимости. Необходимые значения дальности видимости на ВПП составляют лишь от 50 до 1 500 м (см. Главу 2 Части II). Для других применений, таких как обеспечение дорожного движения или морской навигации, диапазон измерений зависит от потребностей и от места проведения измерений.

Ошибки в данных измерений видимости увеличиваются пропорционально видимости, что учитывается в шкалах измерений. Указанный факт отражен в коде, применяемом для синоптических сводок, путем использования трех линейных интервалов с уменьшающимся разрешением, а именно: при видимости 100 – 5000 м она передается в значениях, кратных 100 м; при видимости 6 – 30 км – в значениях, кратных 1 км, и при видимости 35 – 70 км – в значениях, кратных 5 км. Эти шкалы позволяют передавать данные о видимости с разрешением, превышающим точность измерения, за исключением тех случаев, когда видимость составляет менее 900 м.

9.1.3 Метеорологические требования

Понятие «видимость» широко применяется в метеорологии в двух совершенно определенных значениях. Во-первых, это один из параметров, позволяющих оценить характеристики воздушной массы специально для нужд синоптической метеорологии и климатологии. В этом случае видимость является показателем оптического состояния атмосферы. Во-вторых, это оперативный параметр, соответствующий определенным критериям или специальным применениям. В этом случае видимость выражается в виде расстояния, на котором можно видеть конкретные маркеры или огни.

Одно из наиболее важных специальных применений – метеорологическое обслуживание авиации (см. Главу 2 Части II).

Мера видимости, используемая в метеорологии, должна быть свободна от влияния не метеорологических условий, но она должна быть просто связана с субъективными представлениями о видимости и расстоянием, на котором обычные объекты могут наблюдаться в нормальных условиях. Концепция МОД была разработана для удовлетворения этих потребностей, поскольку она удобна для использования инструментальных методов в дневное и ночное время, а также хорошо связана с другими мерами видимости. МОД была официально принята ВМО в качестве меры видимости как для использования в авиации, так и для широкого применения (ВМО, 1990*a*). Это понятие также признано Международной электротехнической комиссией (МЭК, 1987) для использования в атмосферной оптике и визуальной сигнализации.

МОД связана с субъективными представлениями о видимости через пороговый контраст. В 1924 г Кошмидер, а за ним Геймгольц предложили для ε значение 0,02. Другими авторами были предложены иные значения. Они колеблются от 0,0077 до 0,06 или даже до 0,2. Меньшие значения дают большую дальность видимости для данных атмосферных условий. Для требований авиации принято, что ε превышает 0,02 и принимается за 0,05, поскольку для пилота контрастность объекта (маркировочные огни на ВПП) на фоне окружающей местности гораздо меньше контрастности объекта на фоне горизонта. Предполагается, что когда наблюдатель может едва видеть и распознавать черный объект на фоне горизонта, то видимая контрастность объекта составляет 0,05, в связи с чем, как будет

показано ниже, именно значение 0,05 было выбрано в качестве коэффициента пропускания, принятого в определении для МОД.

Требования к точности рассмотрены в Главе 1 Части I.

9.1.4 Методы измерения

Видимость представляет собой сложное психофизическое явление, обусловленное главным образом коэффициентом ослабления, связанным с твердыми и жидкими частицами, находящимися в атмосфере во взвешенном виде: ослабление обусловлено главным образом рассеиванием, а не поглощением света. Оценка видимости зависит от индивидуальной способности восприятия и интерпретации, а также от характеристик источника света и коэффициента пропускания. Таким образом, любая визуальная оценка видимости является субъективной.

Когда видимость оценивается человеком (наблюдателем), она зависит не только от фотометрических и размерных характеристик объекта, которые воспринимаются или должны восприниматься, но и от порогового контраста наблюдателя. В темное время суток она зависит от яркости источников света, фоновой освещенности и – при оценке ее наблюдателем – от адаптации к темноте глаз наблюдателя, а также от пороговой освещенности. Оценка видимости в темное время суток является особенно сложной. Первое определение видимости в ночное время в разделе 9.1.1 дается как эквивалент видимости в дневное время, для того чтобы обеспечить отсутствие искусственных изменений при оценке видимости на рассвете и в сумерках. Второе определение имеет практические применения, особенно для требований авиации, однако оно отличается от первого, и обычно при его использовании получают другие результаты. Однако очевидно, что оба они не являются точными.

С помощью инструментальных методов измеряют коэффициент ослабления, по которому можно рассчитать МОД. Затем на основе данных о пороговых контрастах и освещенности или путем задания для них согласованных значений можно рассчитать видимость. Шепард (1983) указал на то, что

> «строгое соблюдение определения (МОД) потребует установки прожектора и приемника с соответствующими спектральными характеристиками на двух платформах, которые можно разнести (например, вдоль железной дороги) так, чтобы коэффициент пропускания составлял 5 %».

Однако применяемые на практике приборы используются исходя из предположения о том, что коэффициент ослабления не зависит от расстояния. С помощью одних приборов непосредственно измеряют ослабление, а с помощью других измеряют рассеяние света для того, чтобы рассчитать коэффициент ослабления. Они описываются в разделе 9.3. Краткий анализ физики видимости, сделанный в настоящей главе, может быть полезен для понимания взаимосвязи между различными методами измерений коэффициента ослабления, а также для рассмотрения приборов, используемых для его измерения.

Визуальное восприятие: видимость днем и ночью

Условия визуального восприятия основаны на измерении эффективности восприятия глазом человека в дневное время монохроматического излучения в видимом спектре. Термины «дневное видение» и «ночное видение» относятся к условиям дневного и ночного времени соответственно.

Прилагательное «дневное» относится к состоянию аккомодации глаза к внешней освещенности в условиях дневного времени. Более точно дневное видение определяется как зрительная реакция наблюдателя с нормальным зрением на раздражитель, которым является свет, падающий на ямку сетчатки (наиболее чувствительную центральную часть сетчатки), с помощью которой различаются мельчайшие детали и цвета при названных условиях аккомодации к свету.

При дневном видении (зрении посредством центральной части сетчатки) относительная чувствительность глаза к свету изменяется в зависимости от длины волны падающего света. При дневном видении чувствительность глаза максимальна при длине волны 555 нм. Кривая относительной чувствительности глаза к различным длинам волн видимого спектра может быть построена путем определения чувствительности к волне длиной 555 нм в качестве эталонной величины. На рисунке 9.1 представлена кривая, принятая МКО для среднего нормального наблюдателя.

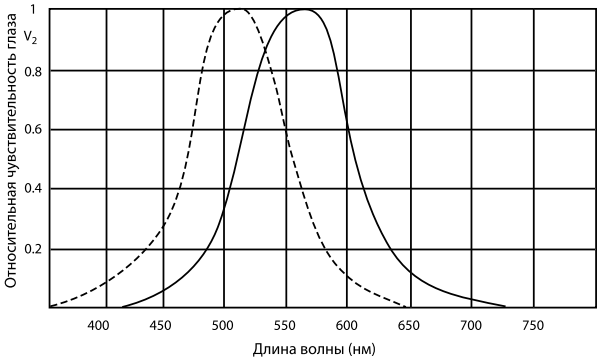


Рис. 9.1. Относительная чувствительность глаза человека к моонохроматическому излучению. Сплошная линия – дневное видение, штриховая линия – ночное видение.

Зрение в темное время суток называется ночным видением (это зрение, при котором возникает возбуждение палочек, а не колбочек сетчатки). Палочки, находящиеся на периферии сетчатки, не обладают чувствительностью к цвету или тонким деталям, но особенно чувствительны к свету низкой интенсивности. При ночном видении максимальная чувствительность глаза соответствует длине волны 507 нм.

Ночное видение требует длительного периода аккомодации (до 30 мин), тогда как период аккомодации при дневном видении составляет всего лишь 2 мин.

Основные уравнения

Основное уравнение для измерения видимости – это закон Бугера-Ламберта:

$$F = F_0\, e^{-\sigma x} \qquad (9.1)$$

где F – световой поток, принимаемый после прохождения пути длиной x в атмосфере, а F_0 – поток при $x = 0$. Путем дифференцирования мы получаем:

$$\sigma = \frac{-dF}{F}\ \frac{1}{dx} \qquad (9.2)$$

Следует принять во внимание, что этот закон действителен только для монохроматического света, однако может применяться с хорошей аппроксимацией и для спектрального потока. Коэффициент пропускания описывается выражением:

$$T = F/F_0 \qquad (9.3)$$

Математические зависимости между МОД и различными параметрами, характеризующими оптическое состояние атмосферы, могут выводиться из закона Бугера-Ламберта.

Из уравнений (9.1) и (9.3) следует, что

$$T = F/F_0 = e^{-\sigma x} \qquad (9.4)$$

Если применить этот закон для получения значений МОД, то принимая, что $T = 0{,}05$, и обозначив $x = P$, можем записать следующее:

$$T = 0{,}05 = e^{-\sigma P} \qquad (9.5)$$

Отсюда математическое соотношение между МОД и коэффициентом ослабления можно представить как:

$$P = (1/\sigma) \cdot \ln(1/0.05) \approx 3/\sigma \qquad (9.6)$$

где ln – логарифм по основанию e, или натуральный логарифм. Объединяя уравнение (9.4), выведенное из закона Бугер-Ламберта, с уравнением (9.6), получаем:

$$P = x \cdot \ln(0.05)/\ln(T) \qquad (9.7)$$

Эта формула взята за основу для измерения МОД с помощью трансмиссометров, причем x в данном случае равно базовой линии трансмиссометра a в уравнении (9.14).

Метеорологическая видимость в дневное время

Яркостный контраст определяется как:

$$C = \frac{L_b - L_h}{L_h} \qquad (9.8)$$

где L_h – яркость горизонта, а L_b – яркость объекта.

Яркость неба на горизонте обусловлена светом, рассеянным вдоль линии зрения наблюдателя.

Следует отметить, что если объект темнее, чем горизонт, то значение C является отрицательным, а если объект черный ($L_b = 0$), то $C = -1$.

В 1924 г Кошмидер установил взаимосвязь, которая стала известна как закон Кошмидера, между кажущимся контрастом (C_x) объекта, который видит на фоне горизонта наблюдатель, находящийся на определенном расстоянии, и действительным контрастом (C_0), т. е. контрастом объекта, который был бы виден на фоне горизонта с очень близкого расстояния. Уравнение Кошмидера может быть записано в следующем виде:

$$C_x = C_0\, e^{-\sigma x} \qquad (9.9)$$

Это уравнение справедливо при условии, что коэффициент рассеяния не зависит от угла азимута, а освещение является однородным вдоль всей линии между наблюдателем, объектом и горизонтом.

Если черный объект наблюдается на фоне горизонта ($C_0 = -1$) и видимый контраст составляет – 0,05, то уравнение (9.9) сокращается до следующего вида:

$$0{,}05 = e^{-\sigma x} \qquad (9.10)$$

Сравнение этого результата с уравнением (9.5) показывает, что если видимый контраст черного объекта, наблюдаемого на фоне горизонта, составляет 0,05, то этот объект находится на расстоянии МОД (P).

Метеорологическая видимость в темное время суток

Расстояние, на котором свет (маркера для определения видимости в ночное время) может быть виден ночью, не просто связано с МОД. Оно зависит не только от МОД и силы света, но и от освещения от других источников света, которое видит наблюдатель.

В 1876 г Аллар предложил закон ослабления света от точечного источника известной силы (I) как функцию расстояния (x) и коэффициента ослабления (σ). Освещенность (E) точечным источником света определяется как:

$$E = I \cdot x^{-2} \cdot e^{-\sigma x} \qquad (9.11)$$

Когда свет едва видим, $E = E_t$ можно записать следующее уравнение:

$$\sigma = (1/x) \cdot \ln \{I/(E_t \cdot x^2)\} \qquad (9.12)$$

Принимая во внимание, что $P = (1/\sigma) \ln (1/0{,}05)$ (уравнение (9.6)), мы можем написать:

$$P = x \cdot \ln (1/0.05) / \ln (I/(E_t \cdot x^2) \qquad (9.13)$$

Соотношения между МОД и расстоянием, на котором могут быть видны огни, рассматриваются в разделе 9.2.3, а использование этого уравнения для визуальных наблюдений описывается в разделе 9.2.

9.2 ВИЗУАЛЬНАЯ ОЦЕНКА МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ДАЛЬНОСТИ

9.2.1 Общие сведения

Визуальная оценка метеорологической оптической дальности может проводиться метеорологом-наблюдателем, использующим естественные или искусственные объекты (группы деревьев, скалы, вышки, колокольни, церкви, огни и т. д.).

Для каждой станции следует подготовить план объектов, используемых для наблюдений, с указанием расстояний до них и пеленгов от наблюдателей. Этот план должен включать объекты, пригодные для наблюдений в дневное время, и объекты, пригодные для наблюдений в темное время суток. Наблюдателю следует также уделять особое внимание существенным изменениям МОД по направлениям.

Наблюдения должен проводить наблюдатель с нормальным зрением, соответствующим образом подготовленный. Как правило, наблюдения должны проводиться без использования каких-либо дополнительных оптических устройств (бинокля, телескопа, теодолита и т. д.), и желательно не проводить наблюдения через окно, особенно когда объекты или огни наблюдаются в ночное время. Глаза наблюдателя должны быть на нормальной высоте над поверхностью земли (около 1,5 м); таким образом, наблюдения не должны проводиться с верхних этажей командно-диспетчерских пунктов или других высоких зданий. Это особенно важно в условиях низкой видимости.

Когда видимость изменяется с направлением, зарегистрированные или сообщаемые значения могут зависеть от того, для чего предназначается сводка. В синоптических сообщениях следует передавать нижние значения видимости, но в сводках для авиации следует руководствоваться указаниями ВМО (1990*a*).

9.2.2 Оценка метеорологической оптической дальности в дневное время

При наблюдениях в дневное время визуальная оценка видимости дает хорошую аппроксимацию истинного значения МОД.

При условии соблюдения следующих требований для наблюдений в дневное время следует выбирать как можно больше объектов, расположенных на разных расстояниях. Выбирать нужно только черные или почти черные по цвету объекты, выделяющиеся на фоне неба на горизонте. Следует по мере возможности избегать выбора объектов светлых тонов, расположенных близко к поверхности земли. Это особенно важно в условиях, когда объект освещается Солнцем.

В случае если альбедо объекта не превышает 25 % погрешность при облачном небе не превысит 3 %, в то время как при солнечном освещении она может быть гораздо больше. Так, например, дом белого цвета будет непригоден для выбора в качестве объекта, а вот группа темных деревьев подходит для этой цели, за исключением тех случаев, когда они ярко освещены солнцем. Если приходится использовать объект на фоне наземных предметов, то он должен быть расположен гораздо ближе своего фона, т. е. по меньшей мере посередине между точкой наблюдения и фоном. Например, дерево, стоящее на опушке леса, будет неподходящим объектом для наблюдений видимости.

Для того чтобы наблюдения были репрезентативными, используемые объекты должны противолежать глазу наблюдателя под углом не менее 0,5°.

Объект, противолежащий под углом менее этой величины, становится невидимым на меньшем расстоянии, чем более крупный объект при тех же условиях. Следует отметить, что отверстие диаметром 7,5 мм, пробитое в карточке, которую наблюдатель держит на расстоянии вытянутой руки, дает примерно такой угол; поэтому рассматриваемый через отверстие объект должен полностью его заполнять. Вместе с тем, нельзя допускать, чтобы такой объект противолежал под углом зрения более 5°.

9.2.3 Оценка метеорологической оптической дальности в ночное время

Методы оценки МОД в ночное время с помощью визуальных наблюдений путем определения расстояний, на которых воспринимаются источники света, описываются ниже.

В качестве объекта для определения видимости можно использовать любой источник света при условии, что его сила в направлении наблюдателя хорошо определена и известна. Желательно, однако, использовать огни, которые могут рассматриваться в качестве точечных источников и сила которых в каком-либо одном направлении не выше, чем в другом, и не ограничена телесным углом, который слишком мал. Следует позаботиться о том, чтобы была обеспечена механическая и оптическая стабильность источника света.

Необходимо проводить различие между источниками, известными как точечные, по соседству с которыми нет других источников или освещенных зон, и группами огней, если даже они отделены друг от друга. В последнем случае такое расположение может оказать влияние на видимость каждого источника, рассматриваемого по отдельности. Для измерения видимости в ночное время рекомендуется использовать только точечные источники, распределенные должным образом.

Следует отметить, что на ночные наблюдения видимости с использованием освещаемых объектов может оказать заметное влияние освещение окружающей местности и физиологические эффекты ослепляющих и других огней, даже если они находятся вне поля зрения. Это влияние еще больше усиливается, если наблюдения проводятся через окно. Таким образом, точное и надежное наблюдение можно провести лишь из темного и должным образом выбранного места.

Более того, нельзя недооценивать значение физиологических факторов, поскольку это серьезный источник разброса получаемых значений наблюдений. Важно, чтобы такие измерения проводили только квалифицированные наблюдатели с нормальным зрением. Необходимо также предусматривать период адаптации (обычно от 5 до 15 минут), в течение которого глаза привыкают к темноте.

Для практических целей связь между расстоянием, на котором воспринимается источник света в ночное время, и значением МОД может быть выражена двумя различными способами:

(а) для каждого значения МОД задается такая сила света, при которой отмечается прямое соответствие между расстоянием, на котором огонь едва виден, и значением МОД;

(б) для огня заданной силы света устанавливается соотношение между расстоянием, на котором воспринимается огонь, и значением МОД.

Второй способ является более простым и, кроме того, более практичным, поскольку весьма сложно установить источники света различной силы на разных расстояниях. Указанный метод включает использование источников света, которые или уже имеются, или устанавливаются вокруг станции, и замену I, x и E_t в уравнении (9.13) соответствующими значениями для имеющихся источников света. Таким образом, метеорологические службы могут подготовить таблицы, где значения МОД даются как функции фоновой яркости и источников света известной силы. Значения, которые должны задаваться пороговой освещенности E_t существенно различаются в зависимости от яркости фона. Следует использовать следующие значения, которые может использовать средний наблюдатель:

(а) $10^{-6,0}$ лк для наблюдений в сумерках и на рассвете или когда едва видимый свет исходит от искусственных источников;

(б) $10^{-6,7}$ лк для наблюдений при лунном свете или когда еще не совсем темно;

(в) $10^{-7,5}$ лк для наблюдений в полной темноте или только при свете звезд.

В таблицах 9.1 и 9.2 приводятся соотношения между МОД и расстоянием, на котором воспринимаются источники света, для каждого из вышеупомянутых методов при различных условиях наблюдений. Они были составлены как руководство для метеорологических служб для помощи в выборе или установке огней при наблюдениях видимости в ночное время и для подготовки инструкций для их наблюдателей в целях расчета значений МОД.

Обычная лампочка накаливания мощностью 100 Вт обеспечивает источник света приблизительно в 100 кд.

Ввиду наличия существенных различий, обусловленных относительно небольшими изменениями

пороговой освещенности и разными условиями общей освещенности, очевидно, что таблица 9.2 предназначена не для того, чтобы дать абсолютный критерий видимости, а для того, чтобы показать необходимость калибровки огней, используемых для оценки МОД в темное время суток; это гарантирует, насколько возможно, сравнимость наблюдений в темное время суток в различных местах и проводимых различными службами.

Таблица 9.1 Соотношение между МОД и силой едва видимого точечного источника света для трех значений E_t

МОД	*Сила света (кд) ламп, едва видимых на расстояниях, указанных в графе для Р*		
Р (м)	*В сумерках* ($E_t = 10^{-6,0}$)	*При лунном свете* ($E_t = 10^{-6,7}$)	*В полной темноте* ($E_t = 10^{-7,5}$)
100	0,2	0,04	0,006
200	0,8	0,16	0,025
500	5	1	0,16
1 000	20	4	0,63
2 000	80	16	2,5
5 000	500	100	16
10 000	2 000	400	63
20 000	8 000	1 600	253
50 000	50 000	10 000	1 580

Таблица 9.2 Соотношение между МОД и расстоянием, на котором точечный источник света в 100 кд едва виден, для трех значений E_t

МОД	*Дальность восприятия (м) лампы в 100 кд как функция значения МОД*		
Р (м)	*В сумерках* ($E_t = 10^{-6,0}$)	*При лунном свете* ($E_t = 10^{-6,7}$)	*В полной темнотes* ($E_t = 10^{-7,5}$)
100	250	290	345
200	420	500	605
500	830	1 030	1 270
1 000	1 340	1 720	2 170
2 000	2 090	2 780	3 650
5 000	3 500	5 000	6 970
10 000	4 850	7 400	10 900
20 000	6 260	10 300	16 400
50 000	7 900	14 500	25 900

9.2.4 Оценка метеорологической оптической дальности при отсутствии удаленных объектов

В определенных местах (открытая равнина, судно и т.д.), а также из-за ограниченного горизонта (долина или ледниковый кар) или отсутствия подходящих удаленных объектов невозможно проводить прямые оценки, за исключением наблюдений при относительно низкой видимости. При отсутствии инструментальных методов значения МОД, превышающие значения, для которых имеются объекты видимости, должны быть получены по общей прозрачности атмосферы. Это можно сделать, если принять во внимание, насколько отчетливо вырисовываются удаленные объекты. Четкие очертания и характерные признаки при небольшом ослаблении цвета или без всякого ослабления цвета указывают на то, что МОД больше расстояния между объектом и наблюдателем. С другой стороны, нечеткие объекты указывают на наличие дымки или других явлений, уменьшающих МОД.

9.2.5 Точность визуальных наблюдений

Общие сведения

Наблюдения объектов обычно должны выполняться наблюдателями, прошедшими специальную подготовку и обладающими зрением, которое принято называть нормальным. Этот человеческий фактор имеет существенное значение при оценке видимости в данных атмосферных условиях, поскольку восприятие и визуальная способность интерпретации у разных людей различны.

Точность визуальных оценок метеорологической оптической дальности в дневное время

Наблюдения показывают, что значения МОД, основанные на инструментальных измерениях, хорошо согласуются с визуальными оценками видимости в дневное время. Видимость и МОД должны быть равны в том случае, если пороговый контраст у наблюдателя составляет 0,05 (при использовании критерия распознавания), а коэффициент ослабления характеризуется одинаковыми значениями как вблизи прибора, так и вблизи наблюдателя.

Middleton Мидлтон. (1952) на основании 1000 измерений обнаружил, что средний пороговый контраст для группы из 10 молодых служащих ВВС, подготовленных в качестве метеорологических наблюдателей, составлял 0,033 при разбросе для отдельных наблюдений от 0,01 и менее до 0,2 и более. Шепард (1983) указал на то, что когда данные Мидлтона. наносятся на логарифмическую шкалу, то они показывают хорошее согласие с распределением Гаусса. Если данные Мидлтона репрезентативны для нормальных условий наблюдений, то мы должны ожидать, что значения оценок видимости в дневное время в среднем будут на 14 % выше, чем МОД, при среднем квадратическом отклонении от МОД 20 %. Эти расчеты прекрасно согласуются с результатами, полученными в ходе Первых сравнений ВМО по измерению

видимости (ВМО, 1990*б*), которые показали, что значения видимости, полученные наблюдателями в дневное время, оказались на 15 % выше, чем данные инструментальных измерений МОД. Диапазон интерквантильных различий между значениями, полученными наблюдателями и с помощью приборов, составлял около 30 % измеренной МОД. Это соответствует среднему квадратическому отклонению приблизительно 22 % в случае распределения Гаусса.

Точность визуальных оценок метеорологической оптической дальности в темное время суток

Из Таблицы 9.2 в разделе 9.2.3 ясно видно, насколько значения МОД могут вводить в заблуждение в том случае, если они основаны только на расстоянии, на котором можно видеть огонь, без должного учета силы света и условий наблюдений. Это подчеркивает необходимость предоставления наблюдателям четких, точных инструкций и обучения их проведению наблюдений видимости.

Следует принять во внимание, что на практике использование методов и таблиц, описанных выше, для подготовки схем размещения излучающих свет объектов не всегда является легкой задачей. Источники света, используемые в качестве объектов, не обязательно удачно расположены или стабильны, не всегда известна сила их света и не всегда они являются точечными. Что касается последнего, то огни могут быть в виде широкого или узкого луча, они могут быть сгруппированы или даже быть разных цветов, к которым глаз имеет различную чувствительность. При использовании таких огней следует соблюдать большую осторожность.

Визуальная оценка дальности видимости огней может давать надежные результаты для видимости в темное время суток только в тех случаях, когда огни и их фон тщательно подобраны, условия наблюдений, в которых находится лицо, их проводящее, тщательно контролируются, а наблюдению может быть посвящено значительное время, для того чтобы обеспечить полную аккомодацию глаз наблюдателя к условиям наблюдений. Результаты первых сравнений ВМО по измерению видимости (ВМО, 1990*б*) показывают, что в темное время суток оценки наблюдателями видимости оказались на 30 % выше данных инструментальных измерений МОД. Интерквартильный диапазон различий между значениями, полученными наблюдателями и полученными с помощью приборов, оказался лишь незначительно больше, чем при наблюдениях в дневное время (приблизительно 35 – 40 % измеренной МОД).

9.3 ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ДАЛЬНОСТИ

9.3.1 Общие сведения

Принятие определенных допущений позволяет преобразовать данные инструментальных измерений в МОД. При измерениях в дневное время, если имеется ряд подходящих ориентиров для проведения прямых наблюдений, использование приборов не всегда является предпочтительным. Однако прибор для измерения видимости часто используется в темное время суток, или при отсутствии ориентиров, или же для автоматических систем наблюдений.

Приборы для измерения МОД могут быть отнесены к одной из двух категорий:

(а) приборы для измерения коэффициента ослабления или коэффициента пропускания в горизонтальном цилиндре воздуха. Ослабление света происходит как за счет рассеяния, так и за счет поглощения частицами, находящимися в воздухе на пути светового луча;

(б) приборы для измерения коэффициента рассеяния света в небольшом объеме воздуха. В условиях естественного тумана поглощением часто можно пренебречь, а коэффициент рассеяния может рассматриваться равным коэффициенту ослабления.

Обе вышеуказанные категории включают приборы, применяемые для визуальных измерений наблюдателем, а также приборы, которые используют источник света и электронное устройство, включающее фотоэлектрический элемент или фотодиод для обнаружения светового луча. Основной недостаток приборов для визуальных измерений – возможные значительные ошибки, если наблюдатель не тратит достаточно времени для адаптации глаз к условиям наблюдений (особенно в темное время суток).

Основные характеристики этих двух категорий приборов для измерения МОД описаны ниже.

9.3.2 Приборы для измерения коэффициента ослабления

Телефотометрические приборы

Ряд телефотометров был разработан для измерения коэффициента ослабления в светлое время суток путем сравнения видимой яркости удаленного объекта с яркостью небесного фона (например, телефотометр Лохля). Однако они, как правило, не используются для повседневных измерений, поскольку, как было указано выше, предпочтительно

использовать прямые визуальные наблюдения. Эти приборы могут, однако, оказаться полезными для экстраполяции значений МОД за пределы самого отдаленного объекта.

Визуальный фотометр

Очень простой прибор, использующийся в темное время суток при наличии удаленного источника света и представляющий собой градуированный нейтральный светофильтр, который обеспечивает гашение в известной степени света; при этом положение фильтра можно регулировать до тех пор, пока свет не становится едва видимым. Показания прибора позволяют судить о степени прозрачности атмосферы между источником света и наблюдателем, на основании чего можно вычислить коэффициент ослабления. Общая точность главным образом зависит от изменений чувствительности глаза и флуктуации силы излучения источника света. Ошибка увеличивается пропорционально увеличению МОД.

Преимуществом этого прибора является то, что он позволяет получать достаточно точные значения МОД в диапазоне 100 м – 5 км с использованием только трех хорошо размещенных источников света, тогда как без помощи этого прибора для достижения той же степени точности необходимо использовать более сложную систему источников света. Однако способ применения такого прибора (позволяющего определить расстояние, на котором свет появляется или исчезает) в значительной степени влияет на точность и однородность измерений.

Трансмиссометры

Измерения с помощью трансмиссометра – наиболее широко используемый метод для измерения среднего значения коэффициента ослабления в горизонтальном цилиндре воздуха между передатчиком, который является источником модулированного светового потока постоянной средней мощности, и приемником, включающим в себя фотодетектор (обычно это фотодиод, помещенный в фокальной точке параболического зеркала или линз). Первоначально наиболее часто используемым источником света являлась галогенная лампа или ксеноновая импульсная газоразрядная лампа. В современных трансмиссометрах используются светодиоды. Модулирование источника света позволяет устранить влияние солнечного света на точность измерений. Коэффициент пропускания определяется по выходному сигналу фотодетектора, что позволяет рассчитать коэффициент ослабления и МОД.

Поскольку оценки МОД с помощью трансмиссометра основаны на ослаблении светового потока параллельного пучка лучей в зависимости от рассеяния и поглощения, то эти оценки тесно связаны с определением МОД. Хороший и правильно обслуживаемый трансмиссометр, работающий в диапазоне, в котором он дает самую высокую точность, обеспечивает прекрасную аппроксимацию истинного значения МОД.

Существует два типа трансмиссометров:

(а) трансмиссометры, которые состоят из передатчика и приемника, находящихся в различных блоках на известном расстоянии друг от друга (рисунок 9.2);

Рис. 9.2. Однолучевой трансмиссометр

(б) трансмиссометры, у которых передатчик и приемник совмещены в одном блоке, а излучаемый луч отражается находящимся на некотором расстоянии зеркалом или обратным отражателем (световой луч проходит расстояние до отражателя и обратно) (рисунок 9.3).

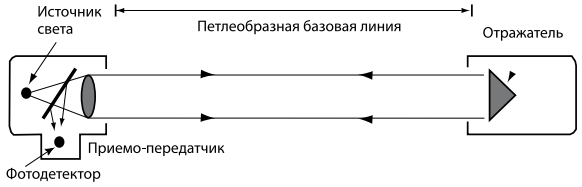


Рис. 9.3. Двухлучевой трансмиссометр

Расстояние, которое проходит луч между передатчиком и приемником, обычно называется базовой линией, и это расстояние может изменяться от нескольких метров до 150 м (или даже достигать 300 м) в зависимости от диапазона значений МОД, которые должны измеряться прибором, а также от того, для каких целей должны использоваться данные измерений.

Как было видно из выражения для МОД в уравнении (9.7), отношение:

$$P = a \cdot \ln(0{,}05) / \ln(T) \qquad (9.14)$$

где a – базовая линия трансмиссометра, представляет собой основную формулу для измерений с помощью трансмиссометров.

Справедливость ее зависит от допущений, предусматривающих, что применение законов Кошмидера, Бугера-Ламберта является приемлемым и что коэффициент ослабления вдоль базовой линии трансмиссометра является таким же, как и на линии между наблюдателем и объектом при данном значении МОД. Соотношение между коэффициентом пропускания и МОД справедливо для капель тумана, но в тех случаях, когда видимость ухудшена за счет других гидрометеоров, таких как дождь или снег, или литометеоров, таких как низовая песчаная метель, значения МОД следует интерпретировать очень осторожно.

Если необходимо, чтобы данные измерений оставались приемлемыми в течение длительного периода времени, световой поток должен оставаться постоянным в течение всего этого периода. При использовании галогенового источника света проблема старения нити лампы носит менее критический характер и световой поток остается более постоянным. Однако в некоторых трансмиссометрах используется система обратной связи (за счет восприятия и измерения небольшой части излучаемого потока), обеспечивающая большую однородность светового потока с течением времени или коррекцию в случае любых изменений.

Как мы увидим в разделе, посвященном точности измерений МОД, значение, принятое для базовой линии трансмиссометра, определяет диапазон измерений МОД. В целом принято, что этот диапазон лежит между величиной, равной базовой линии, и величиной, превышающей ее в 25 раз.

Дальнейшее совершенствование принципа измерения с помощью трансмиссометров — использование двух приемников или обратных отражателей, находящихся на разных расстояниях, с тем, чтобы расширить как нижний предел (короткая базовая линия), так и верхний предел (длинная базовая линия) диапазона измерений МОД. Эти приборы известны как приборы с «двойной базовой линией».

В некоторых случаях, когда базовая линия очень короткая (несколько метров), в качестве источника света использовался фотодиод (т. е. монохроматический свет, близкий к инфракрасному). Однако для получения репрезентативного коэффициента ослабления обычно рекомендуется использовать полихроматический свет видимого спектра.

Определение видимости с помощью ЛИДАРА

Технологии доплеровских метеорологических лазерных локаторов ЛИДАР, как они описаны для лазерного облакомера в Главе 15 Части 1, могут быть использованы для определения видимости в случае, если луч строго горизонтален. Продольный профиль сигнала обратного рассеяния S зависит от выходящего сигнала S_0, расстояния x, коэффициента обратного рассеяния β, фактора передачи T согласно выражению:

$$S(x) \sim S_0 \cdot 1/x^2 \cdot \beta(x) \cdot T^2 \text{ where } T = \int -\sigma(x)\, dx \quad (9.15)$$

Если атмосфера горизонтально однородна, то β и σ – константы, а коэффициент ослабления σ определяется только по двум точкам профиля:

$$\ln\left(S(x) \cdot x^2 / S_0\right) \sim \ln \beta - 2\,\sigma\, x \qquad (9.16)$$

В условиях неоднородной атмосферы зависящие от дальности параметры $\beta(x)$ и $\sigma(x)$ могут быть определены с помощью алгоритма Клетта (Клетт, 1985).

При МОД, приближающейся к 2 000 м, точность ЛИДАР становится неудовлетворительной.

9.3.3 Приборы для измерения коэффициента рассеяния

Ослабление света в атмосфере происходит как за счет рассеяния, так и за счет поглощения. Наличие загрязняющих веществ вблизи от промышленных зон, ледяные кристаллы (переохлажденный туман) или пыль могут привести к тому, что величина поглощения станет значительной. Однако, как правило, фактором поглощения можно пренебречь, а явление рассеяния, обусловленное отражением, рефракцией и дифракцией на каплях воды, становится основным фактором, определяющим ухудшение видимости. Тогда коэффициент ослабления может приниматься равным коэффициенту рассеяния, а прибор для измерения последнего может использоваться для оценки МОД.

Измерения удобнее всего выполнять, направляя луч света на небольшой объем воздуха и определяя фотометрическими методами долю света, рассеянного при достаточно большом телесном угле и в направлениях, которые не являются критическими. При условии полного экранирования от других источников света или при условии, что свет источника модулирован, прибор такого типа можно использовать как в светлое, так и в темное время суток. Коэффициент рассеяния b является функцией, которую можно записать в следующем виде:

$$b = \frac{2\pi}{\Phi_v} \int_0^{\pi} I(\phi) \sin(\phi)\, d\phi \qquad (9.17)$$

где Φ_v – поток воздуха, поступающий в объем воздуха V, а $I(\Phi)$ – сила света, рассеиваемого в направлении Ф по отношению к падающему лучу. Следует принять во внимание, что точное определение b требует измерения и интегрирования значений света, рассеянного от луча под всеми углами. Используемые на практике приборы измеряют рассеянный свет по ограниченному углу и основаны на высокой степени корреляции между ограниченным интегральным значением и полным интегральным значением.

В этих приборах используются три метода измерений: измерения обратного рассеяния

прямого рассеяния и рассеяния, интегрированного по широкому углу.

(а) *Обратное рассеяние*. В приборах для измерения обратного рассеяния (рисунок 9.4) луч света направляется на небольшой объем воздуха перед передатчиком, а приемник помещается в том же блоке и ниже источника света, куда поступает в обратном направлении свет, рассеянный исследуемым объемом воздуха. Некоторые исследователи пытались определить соотношение между видимостью и коэффициентом обратного рассеяния, но в целом принято считать, что такая корреляция не является удовлетворительной.

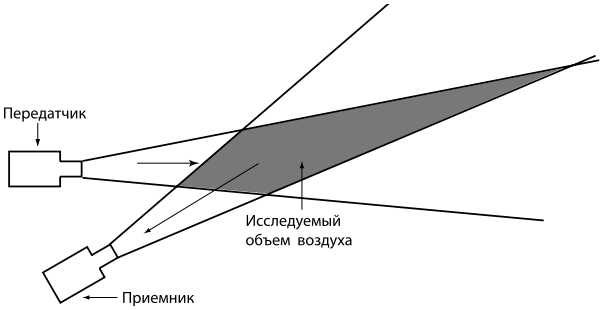


Рис. 9.4. Измеритель видимости, основанный на измерении обратного рассеяния

(б) Прямое рассеяние. Ряд авторов продемонстрировал, что оптимальным является угол между 20 и 50 °. Поэтому приборы для измерения прямого рассеяния включают в себя передатчик и приемник, причем угол между лучами составляет от 20 до 50 °. При другой конструкции прибора предусматривается установка посередине между передатчиком и приемником одной диафрагмы либо двух диафрагм, каждая из которых расположена на небольшом расстоянии от передатчика или приемника. На рисунке 9.5 показаны две конфигурации приборов, о которых шла речь.

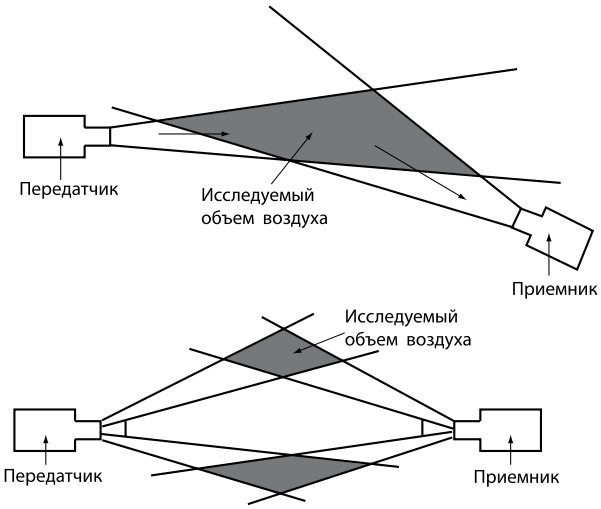


Figure 9.5. Two configurations of visibility meters measuring forward scatter

в) Рассеяние в пределах широкого угла. Такой прибор, представленный на рисунке 9.6, известен как интегрирующий нефелометр и основан на принципе измерения рассеяния в максимально широком угле: идеально от 0 до 180°, однако на практике примерно от 0 до 120°. Приемник устанавливается перпендикулярно оси источника света, который обеспечивает освещение с широким углом. Хотя в теории такой прибор должен давать более точные значения коэффициента рассеяния, чем прибор, измеряющий небольшой диапазон углов рассеяния, на практике при его использовании сложнее избежать изменения коэффициента ослабления в исследуемом объеме воздуха из-за нахождения в нем самого прибора. На практике интегрирующие нефелометры редко применяются для измерения МОД, но широко используются для измерения количества загрязняющих веществ.

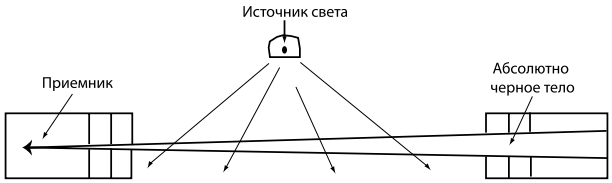


Рис. 9.6. Измеритель видимости, основанный на измерении рассеянного света в широком угле

Во всех перечисленных выше приборах, как и в большинстве трансмиссометров, приемники включают в себя фотодетекторы или фотодиоды. Используемый свет излучается в виде импульсов (например, применяется ксеноновая газоразрядная лампа большой мощности). Для использования приборов этого

типа достаточно ограниченного пространства (как правило, 1 – 2 м). В связи с этим они полезны при отсутствии ориентиров видимости или источников света (на судах, обочинах дорог и т. д.). Поскольку в данном случае измерения относятся лишь к небольшому объему воздуха, их репрезентативность для состояния атмосферы в том или ином месте может быть поставлена под сомнение. Однако репрезентативность можно улучшить путем осреднения большого числа проб или измерений. Кроме того, иногда сглаживание результатов достигается путем исключения экстремальных значений.

Использование приборов этого типа нередко ограничивалось конкретными приложениями (например, для измерения видимости на автострадах или определения наличия или отсутствия тумана). Кроме того, они применяются в тех случаях, когда достаточно менее точных измерений МОД. В настоящее время они все чаще используются в автоматических метеорологических системах наблюдений, поскольку могут измерять МОД в широком диапазоне и по сравнению с трансмиссометрами относительно слабее реагируют на загрязнение.

9.3.4 Выбор места и установка приборов

Измерительные приборы должны устанавливаться в таких местах, где имеется гарантия того, что измерения будут достаточно репрезентативными. Таким образом, для синоптических целей приборы следует размещать в местах, свободных от локального загрязнения атмосферы, т. е. от дыма и промышленных выбросов, вдали от пыльных дорог и т. д.

Объем воздуха, в котором измеряется коэффициент ослабления или коэффициент рассеяния, как правило, должен находиться на уровне глаза наблюдателя, т. е. примерно на высоте 1,5 м над поверхностью земли.

Необходимо учитывать, что трансмиссометры и приборы для измерения коэффициента рассеяния следует устанавливать таким образом, чтобы Солнце не попадало в оптическое поле в любое время дня. Добиться этого можно путем установки оптической оси в направлении север – юг (до ±45°) горизонтально для широт до 50° или за счет использования систем экранов или отражателей.

Для целей авиации измерения должны быть репрезентативными для условий аэропорта. Эти условия, которые в основном относятся к проведению полетов самолетов, описываются в Главе 2 Части 2.

Приборы следует устанавливать в соответствии с теми направлениями, которые указаны изготовителями. Особое внимание необходимо уделять обеспечению соосности передатчиков и приемников и правильной юстировке светового луча. Опоры, на которых устанавливают передатчики/приемники, должны обладать механической прочностью (и в то же время быть упругими – при установке в аэропортах), для того чтобы избежать нарушения соосности из-за движения грунта во время замерзания и особенно во время таяния. Кроме того, крепления не должны изгибаться под воздействием теплового удара.

9.3.5 Калибровка и техническое обслуживание приборов

Для того чтобы получить удовлетворительные и надежные данные наблюдений, необходимо проводить техническое обслуживание приборов для измерения МОД, эксплуатировать их в соответствии с требованиями фирм-изготовителей и постоянно содержать их в хорошем рабочем состоянии. Регулярные поверки и калибровка согласно рекомендациям изготовителя должны обеспечивать их оптимальное функционирование.

Следует регулярно производить калибровку в условиях очень хорошей видимости (более 10 – 15 км). Необходимо избегать таких атмосферных условий, которые приведут к ошибкам в калибровке. Например, при наличии сильных восходящих потоков или после ливневых осадков отмечаются значительные изменения коэффициента ослабления в слое воздуха у поверхности земли, и если используется несколько удаленных друг от друга трансмиссометров (как это бывает в аэропортах), то результаты их измерений характеризуются значительной дисперсией. В таких условиях проводить калибровку не рекомендуется.

Следует принять во внимание, что оптические поверхности большинства трансмиссометров нуждаются в регулярной чистке, и необходимо планировать ежедневное техническое обслуживание некоторых приборов, особенно в аэропортах. Эти приборы следует регулярно чистить во время или после атмосферных возмущений, поскольку дождь или ливни, а также сильные ветры могут приводить к тому, что оптические системы покрываются большим количеством водяных капель и твердых частиц, в результате чего возникают значительные ошибки при измерении МОД. То же самое справедливо и в отношении снегопада, который может блокировать оптические системы. Часто перед оптическими системами устанавливаются системы подогрева для улучшения функционирования прибора в таких условиях. Иногда используются системы, подающие воздух, для того чтобы в какой-то степени решить все эти проблемы и избежать необходимости в частой чистке приборов.

Однако следует указать на то, что системы подачи воздуха и системы подогрева могут создавать воздушные потоки, более теплые, чем окружающий воздух, и тем самым отрицательно влиять на результаты измерений коэффициента ослабления воздушной массы. В засушливых зонах песчаные бури или поднимающийся в воздух песок могут блокировать оптическую систему и даже повредить ее.

9.3.6 Источники погрешностей при измерениях метеорологической оптической дальности и оценки точности измерений

Общие сведения

Все оперативные приборы, используемые на практике для измерений МОД, исследуют относительно небольшой объем воздуха по сравнению с тем, что видит глаз наблюдателя. Приборы могут производить точные измерения МОД только в тех случаях, когда объем воздуха, который они исследуют, является репрезентативным для атмосферы, окружающей место наблюдения, до радиуса, равного МОД. Легко представить себе такую ситуацию, когда в условиях зарядов тумана, локального дождя или снежной бури показания прибора вводят в заблуждение. Однако опыт показал, что такие ситуации отмечаются довольно редко, и постоянный мониторинг МОД с помощью прибора позволяет обнаружить изменения МОД до того, как их распознал наблюдатель, работающий без приборов. Тем не менее, результаты инструментальных измерений МОД должны интерпретироваться с осторожностью.

Другой фактор, который должен приниматься во внимание при обсуждении репрезентативности измерений, – однородность самой атмосферы. Для всех значений МОД коэффициент ослабления в небольшом объеме воздуха обычно колеблется быстро и нерегулярно, и результаты отдельных измерений МОД с помощью измерителей рассеяния и трансмиссометров с короткой базовой линией, не имеющих встроенных систем сглаживания или осреднения, характеризуются значительной дисперсией. В связи с этим необходимо проводить много измерений и сглаживать или осреднять их для получения репрезентативного значения МОД.

Анализ результатов первых сравнений ВМО по измерению видимости (ВМО, 1990*б*) показывает, что для большинства приборов осреднение в течение периода более 1 минуты не дает никаких преимуществ, однако для самых «шумных» приборов предпочтительное время осреднения составляет более 2 минут.

Точность телефотометров и визуальных фотометров

Визуальные измерения, основанные на измерениях коэффициента ослабления, проводить довольно трудно, причем основным источником погрешностей является изменчивость функционирования глаза человека. Эти ошибки были описаны в разделах, касающихся методов визуальной оценки МОД.

Точность трансмиссометров

Основные источники погрешностей при измерениях с помощью трансмиссометра следующие:

(а) нарушение соосности передатчиков и приемников;
(б) недостаточная жесткость и стабильность креплений передатчика/приемника (замерзание и оттаивание грунта, тепловой удар);
(в) старение и неправильная центровка источников излучения;
(г) ошибки при калибровке (плохая видимость или проведение калибровки в нестабильных условиях, влияющих на коэффициент ослабления);
(д) нестабильность электронного оборудования системы;
(е) передача на большое расстояние коэффициента ослабления в виде сигнала слабого тока, подверженного интерференции от электромагнитных полей (особенно в аэропортах); предпочтительно преобразовывать сигналы в цифровой вид;
(ж) помехи, обусловленные восходом или заходом Солнца, и плохая начальная ориентация трансмиссометров;
(з) атмосферное загрязнение, приводящее к загрязнению оптических систем;
(и) локальные атмосферные условия (ливневые осадки и сильные ветры, снег и т. д.), обусловливающие нерепрезентативные результаты измерения коэффициента ослабления или отклонения от закона Кошмидера (снег, ледяные кристаллы, дождь, песок и т. д.).

Хорошо откалиброванный и правильно обслуживаемый трансмиссометр должен давать репрезентативные результаты измерения МОД, если коэффициент ослабления вдоль оптической оси прибора является репрезентативным коэффициентом ослабления в пределах МОД. Однако трансмиссометр может обеспечивать производство точных измерений МОД в рамках ограниченного диапазона. Кривая относительной погрешности для МОД может быть построена по данным, полученным путем дифференцирования основной формулы трансмиссометра (см. уравнение (9.7)). На рисунке 9.7 показаны изменения

относительной погрешности в зависимости от пропускания при допущении того, что точность измерений коэффициента пропускания (*T*) должна составлять 1 %.

Такая погрешность (1 %) коэффициента пропускания, которая может считаться нормальной для многих старых приборов, не включает погрешности, связанные с дрейфом приборов и загрязнением их оптических элементов, или разброс в результатах измерений, обусловленный самим явлением. Если точность уменьшается примерно до 2 – 3 % (с учетом других факторов), то значение относительной погрешности, приведенное на вертикальной оси графика, следует умножить на тот же коэффициент 2 или 3.

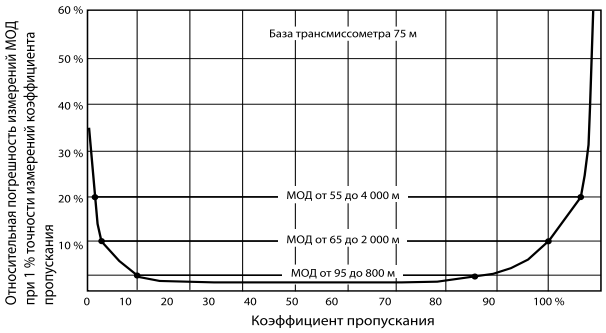


Рис. 9.7. Зависимость погрешности измерений метеорологической оптической дальности от погрешности коэффициента пропускания 1 %.

Следует также принять во внимание, что относительная погрешность измерений МОД возрастает экспоненциально в начале и конце кривой, тем самым обусловливая ограничение верхних и нижних пределов диапазона измерений МОД. Кривая на рисунке 9.7 указывает на то, где находится предел диапазона измерений в том случае, если погрешность 5, 10 или 20 % допускается на верхней и нижней границах диапазона измерений при базовой линии 75 м. Можно также вывести, что при измерениях МОД в пределах 1,25 – 10,7 длины базовой линии относительная погрешность МОД должна быть низкой (примерно 5 %), если исходить из допущения, что погрешность для Т составляет 1 %. Относительная погрешность МОД превышает 10 % в тех случаях, когда МОД составляет менее 0,87 длины базовой линии или превышает ее более чем в 27 раз. При дальнейшем расширении диапазона измерений ошибка быстро увеличивается и становится неприемлемой.

Однако результаты первых сравнений ВМО по измерениям видимости (ВМО, 1990*б*) показали, что лучшие трансмиссометры при правильной их калибровке и хорошем техническом обслуживании могут обеспечивать измерения МОД при среднем квадратическом отклонении примерно 10 % в тех случаях, когда МОД равна величине, до 60 раз превышающей базовую линию.

Точность измерителей рассеяния

Основные источники погрешностей при измерениях МОД с помощью измерителей рассеяния следующие:

(а) погрешности калибровки (слишком плохая видимость или проведение калибровки в нестабильных условиях, влияющих на коэффициент ослабления);

(б) отсутствие возможности повторения процедуры или отсутствие материалов при использовании для калибровки непрозрачных рассеивателей;

(в) нестабильность электронного оборудования системы;

(г) передача на большое расстояние коэффициента рассеяния в качестве сигнала слабого тока или низкого напряжения, подверженного интерференции от электромагнитных полей (особенно в аэропортах); предпочтительно преобразовывать сигналы в цифровой вид;

(д) возмущения, обусловленные восходом или заходом Солнца, и плохая первоначальная ориентация прибора;

(е) атмосферные загрязнения, приводящие к загрязнению оптических систем (оптические элементы этих приборов менее чувствительны к грязи по сравнению с трансмиссометрами, однако сильное загрязнение все же оказывает на них влияние);

(ж) атмосферные условия (дождь, снег, ледяные кристаллы, песок, местное загрязнение и т. д.), приводящие к тому, что коэффициент рассеяния отличается от коэффициента ослабления.

Результаты первых сравнений ВМО по измерениям видимости (ВМО, 1990*б*) показывают, что при низких значениях МОД измерители рассеяния, как правило, являются менее точными, чем трансмиссометры, и их показания имеют большую изменчивость. Было также обнаружено доказательство того, что как класс измерители рассеяния более подвержены влиянию осадков, чем трансмиссометры. Однако самые лучшие измерители рассеяния продемонстрировали небольшую уязвимость к осадкам или вообще ее отсутствие и давали оценки МОД со средним квадратическим отклонением около 10 % в диапазоне МОД 100 м – 50 км. Почти все измерители рассеяния в ходе сравнений показали наличие значительной систематической ошибки в какой-либо части диапазона их измерений. Оптические системы измерителей рассеяния также продемонстрировали хорошую устойчивость к загрязнению.

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Обзор различий между измерителями рассеяния и трансмиссометрами предложен в ВМО, 1992б.

Международная электротехническая комиссия, 1987: *Международный электротехнический словарь*. Глава 845: Свет, МЭК 50.

Middleton, W.E.K., 1952: *Vision Through the Atmosphere*. University of Toronto Press, Toronto.

Sheppard, B.E., 1983: Adaptation to MOR. *Preprints of the Fifth Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation* (Toronto, 11 – 15 April 1983), pp. 226 – 269.

Klett, J.D., 1985: Lidar inversion with variable backscatter/extinction ratios. *Applied Optics*, 24, pp. 1638 – 1643.

Всемирная Метеорологическая Организация, 1989: *Руководство по Глобальной системе наблюдений*. ВМО – № 488, Женева.

Всемирная Метеорологическая Организация, 1990*а*: *Руководство по системам метеорологических наблюдений и распространения информации на аэродромах*. ВМО – № 731, Женева.

Всемирная Метеорологическая Организация, 1990*б*: *Первые сравнения ВМО по измерениям видимости: Заключительный доклад* (D.J. Griggs, D.W. Jones, M. Ouldridge and W.R. Sparks) Метеорологические приборы и методы наблюдений, Отчет №. 41, WMO /TD – №. 401, Женева.

Всемирная Метеорологическая Организация, 1992*а*: *Международный метеорологический словарь*. ВМО – № 182, Женева.

Всемирная Метеорологическая Организация, 1992*б*: Приборы для измерения видимости: различия между измерителями рассеяния и трансмиссометрами (J.P. van der Meulen). Papers *Presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation (TECO – 92)* (Вена, Австрия, 11 – 15 Мая 1992), Метеорологические приборы и методы наблюдений, Отчет №. 49, WMO /TD – №. 462, Женева.

Всемирная Метеорологическая Организация, 2003: *Руководство по Глобальной системе* наблюдений. ВМО – № 544, Женева.

ГЛАВА 10

ИЗМЕРЕНИЕ ИСПАРЕНИЯ

10.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

10.1.1 Определения

Международный гидрологический словарь (ВМО/ЮНЕСКО, 1992) и *Международный метеорологический словарь* (ВМО, 1992) дают следующие определения (с некоторыми отличиями):

(Действительное) испарение – количество воды, испаряющейся с открытой поверхности воды и/или почвы.

Транспирация – процесс, при котором вода с растений переносится в атмосферу в виде пара.

(Действительное) суммарное испарение (или эффективное суммарное испарение) – количество водяного пара, испаряющегося с поверхности почвы и растений при естественном уровне влагосодержания почвы.

Потенциально возможное испарение (или испаряемость) – количество водяного пара, которое могло бы испариться с поверхности чистой воды с единицы площади и за единицу времени при существующих условиях.

Потенциальное суммарное испарение – максимальное количество воды, которая может испариться в данных климатических условиях с участка сплошной растительности, полностью покрывающей почву и хорошо снабжаемой водой. Потенциальное суммарное испарение включает испарение с поверхности почвы и транспирацию растений в конкретном районе в определенный период времени. Потенциальное суммарное испарение выражается как толщина слоя воды.

Если используется термин п*отенциальное суммарное испарение*, то должны ясно указываться типы испарения и транспирации. За более подробной информацией по этим терминам следует обращаться к публикации ВМО (1994).

Прим. редактора перевода: в русскоязычных словарях, энциклопедиях используется также для обозначения суммарного испарения термин эвапотранспирация. Он же используется и в данном русскоязычном тексте в дальнейшем.

10.1.2 Единицы измерения

Скорость1 испарения определяют как количество воды, испарившейся с единицы площади за единицу времени. Она может быть выражена как масса или объем жидкой воды, испарившейся с площади за единицу времени; обычно она выражается как эквивалентная толщина слоя жидкой воды, испарившейся за единицу времени с поверхности любой площади. За единицу времени обычно приняты сутки. Объем испарившейся воды следует выражать в миллиметрах (ВМО, 2003). В зависимости от типа прибора обычная погрешность измерения составляет от 0,1 до 0,01 мм.

10.1.3 Метеорологические требования

Оценки как испарения со свободных поверхностей воды и с почвы, так и суммарного испарения с поверхностей, покрытых растительностью, имеют большое значение для гидрологического моделирования, а также для гидрометеорологических и сельскохозяйственных исследований, например, при проектировании и эксплуатации водохранилищ, ирригационных и дренажных систем.

Требования к проведению работ описаны в главе 1 части I. Для суточных сумм максимальный диапазон составляет 0 – 100 мм при разрешении 0,1 мм. Неопределенность при 95-процентной степени достоверности должна составлять ± 0,1 мм для объемов менее 5 мм и ± 2 % для больших объемов. Точность в 1 мм предложена в качестве достижимой. В принципе, обычные приборы могут удовлетворять таким требованиям к точности, однако сложности при размещении и эксплуатации приводят к появлению значительно больших погрешностей измерений (ВМО, 1976).

Факторы, влияющие на скорость испарения с любого предмета или поверхности, можно в целом разделить на две группы: метеорологические факторы и факторы, связанные с характеристиками поверхности, – причем каждый из них может ограничивать скорость испарения. В свою очередь, метеорологические факторы делятся на энергетические и аэродинамические переменные. Энергия необходима для превращения воды из жидкости в пар; в природе это происходит главным образом за счет солнечной радиации и земного излучения. Аэродинамические переменные, такие как скорость ветра у поверхности земли и разность значений давления пара на участке между поверхностью и нижними слоями атмосферы, влияют на скорость переноса водяного пара.

Полезно различать случаи наличия или отсутствия несвязанной воды на поверхности. К важным факторам относятся количество и состояние воды, а также такие характеристики поверхности, которые влияют на процесс переноса в воздухе или через поверхность объекта. Противодействие переносу влаги в атмосферу зависит, например, от шероховатости поверхности; в аридных и полуаридных районах чрезвычайно большое значение имеют размер и форма испаряющей поверхности. Транспирация растений, помимо уже отмеченных метеорологических и поверхностных факторов, в значительной степени определяется характеристиками и параметрами реагирования растений. Это включает, например, количество и размер устьиц (устьичные отверстия на листьях), а также то, открыты они или закрыты. Устьичное сопротивление переносу влаги характеризуется, поведением растения в течение суток, но также в значительной степени зависит от поступления почвенной влаги к корневой системе.

Поступление почвенной влаги к корням и испарение с открытой почвы зависят от количества и характеристик почвенных капилляров, а именно от текстуры и состава почвы. На испарение с поверхностей озер и водохранилищ влияет тепло, аккумулируемое водоемом.

Методы оценки испарения и суммарного испарения являются как правило косвенными: либо посредством точечных измерений при помощи прибора или измерительной установки либо путем расчета с использованием других измеренных метеорологических переменных (ВМО, 1997).

10.1.4 Методы измерения

Прямые измерения испарения или суммарного испарения с обширных естественных водных поверхностей или суши в настоящее время осуществить затруднительно. Однако разработано несколько косвенных методов на основе точечных измерений или других расчетов, которые дают приемлемые результаты.

Потеря воды со стандартной насыщенной влагой поверхности измеряется с помощью приборов для измерения испарения (эвапориметров), которые можно разделить на атмометры и испарители, или испарительные бассейны. Эти приборы непосредственно не измеряют ни испарение с естественных водных поверхностей, ни действительное, ни потенциальное суммарное испарение. Поэтому без внесения поправок полученные значения не могут быть использованы для надежной оценки испарения или действительной и потенциальной эвапотранспирации с естественных поверхностей.

Почвенный испаритель (лизиметр) представляет собой сосуд (или контейнер), установленный в грунте вровень с его поверхностью и наполненный почвой, на которой может быть выращена растительность. Он представляет собой многоцелевой прибор для изучения нескольких фаз гидрологического цикла в естественных условиях. Оценки суммарного испарения (или испарения в том случае, если почва лишена растительности) могут производиться путем измерения и расчета всех остальных компонентов водного баланса контейнера, таких как выпадение осадков, дренаж подземных вод и изменение запаса воды почвенного монолита. Как правило, поверхностный сток устраняется. Почвенные испарители могут также использоваться для оценки потенциального испарения с почвы или потенциального суммарного испарения почвы, покрытой растительностью, при условии поддержания влажности почвы на уровне полевой влагоемкости.

Для водохранилищ или озер, стоковых площадок или небольших водосборов оценки испарения могут производиться на основании водного и энергетического балансов, а также с использованием аэродинамического подхода и подхода с учетом дополнительных взаимосвязей. Вышеуказанные методики описываются в разделе 10.5.

Следует также подчеркнуть, что различные испарители или лизиметры представляют различающиеся по физической природе средства измерений. Поправочные коэффициенты, которые требуются для того, чтобы они представляли данные измерений испарения с озера или действительного или потенциального суммарного испарения, неизбежно являются различными. Таким образом, такие приборы и их установка должны описываться очень тщательно и точно, чтобы иметь как можно более полное представление об условиях, в которых производились измерения.

Более подробное описание всех методов представлено в публикации ВМО (1994).

10.2 АТМОМЕТРЫ

10.2.1 Виды приборов

Атмометр – это прибор для измерения испарения с увлажненной пористой поверхности. Увлажненные поверхности представляют собой либо пористые керамические шарики, цилиндры или пластины, либо открытые диски из фильтровальной бумаги, насыщенные водой. Испаряющим элементом

атмометра Ливингстона является керамический шарик диаметром около 5 см, соединенный с сосудом с водой стеклянной или металлической трубкой. Атмосферное давление на поверхности воды в резервуаре поддерживает шарик в насыщенном состоянии. Атмометр Беллани состоит из керамического диска, зафиксированного вверху глазурованной керамической воронки, в которую вода попадает через бюретку, выполняющую роль резервуара и измерительного устройства. Испаряющим элементом испарителя Пише является диск из фильтровальной бумаги, прикрепленный к перевернутой цилиндрической градуированной трубке, закрытой с одной стороны; из этой трубки вода поступает на диск. Последовательные измерения объема воды, оставшейся в градуированной трубке, позволяют оценить количество воды, потерянной на испарение за любой заданный промежуток времени.

10.2.2 Измерение с помощью атмометров

Хотя принято считать, что атмометры дают относительную меру испарения с поверхности растений, в действительности полученные данные измерений мало связаны с испарением с естественных поверхностей.

Показания испарителей Пише при условии их тщательной, стандартизованной, экранированной установки с определенным успехом использовались для получения аэродинамической составляющей; умножение функций ветра и дефицита насыщения водяного пара необходимы для расчета испарения при использовании, например, комбинационного метода Пенмана после получения корреляций между ними.

Хотя испарение, измеренное с помощью атмометров, вероятно, может быть эмпирически связано с испарением с естественной поверхности, можно предполагать, что эта связь для разных типов поверхности и климата будет различной. Вероятно, атмометры будут по-прежнему применяться в мелкомасштабных исследованиях. Их существенные преимущества – это небольшой размер, низкая цена и малый расход воды. Густая сеть атмометров может быть расположена на небольшой площадке для микрометеорологических исследований. Не рекомендуется использовать атмометры для исследований в области водных ресурсов, если имеются другие данные.

10.2.3 Источники ошибки в атмометрах

Одна из основных проблем6 в работе атмометров – это поддержание чистоты испарительных поверхностей. Загрязненные поверхности существенно влияют на скорость испарения точно так же, как это происходит со смоченным термометром в психрометрии.

Кроме того, на измерения испарения значительное влияние часто оказывают различия в их размещении. Это особенно касается размещения по отношению к потоку движущегося воздуха вблизи испаряющей поверхности в том случае, если прибор экранирован.

10.3 ИСПАРИТЕЛИ И ИСПАРИТЕЛЬНЫЕ БАССЕЙНЫ

Изготавливаемые испарители и испарительные бассейны имеют самые различные формы и размеры, и существуют разные способы их размещения. Среди различных типов используемых испарителей следует отметить испаритель класса «А» (Соединенные Штаты Америки), испаритель

ГГИ-3000 (Россия) и испарительный бассейн площадью 20 м^2 (Россия), описание которых приводится ниже. В настоящее время эти приборы широко применяются в качестве стандартных сетевых приборов для измерения испарения, и их характеристики изучались в самых разнообразных климатических условиях и в большом диапазоне широты и высоты. Данные этих приборов находятся в тесной, хотя сложной и зависящей от климатической зоны, связи с метеорологическими элементами, определяющими испарение, при условии точного соблюдения стандартов при изготовлении и инструкций по размещению.

Российский измерительный бассейн площадью 20 м^2 рекомендован в качестве международного эталонного испарителя.

10.3.1 Испаритель класса (США)

Испаритель класса «А» (Соединенные Штаты Америки) – это цилиндрический сосуд глубиной 25,4 см и диаметром 120,7 см. Испаритель устанавливается на деревянной платформе в виде рамки с тем, чтобы дно испарителя находилось на высоте 3 – 5 см от поверхности земли, что обеспечивает циркуляцию воздуха под испарителем, удерживает дно испарителя выше уровня воды на поверхности земли во время дождливой погоды и обеспечивает простоту осмотра базы испарителя. Испаритель изготавливается из оцинкованного железа толщиной 0,8 мм, меди или монеля, причем поверхность испарителя не окрашивается. Испаритель заполняется на 5 см ниже верхней кромки (так называемый эталонный уровень).

Уровень воды измеряется с помощью крючковой рейки или стационарной игольчатой водомерной рейки. Крючковая рейка состоит из подвижной шкалы и верньера с крючком, конец которого при правильной установке прибора касается поверхности воды. Успокоитель с небольшим отверстием на дне диаметром около 10 см и глубиной около 30 см разбивает любые мелкие волны, которые могут возникнуть в испарителе, и служит в качестве держателя для крючковой рейки во время наблюдения. Испаритель пополняется как только уровень воды по показаниям водомерной рейки опускается более чем на 2,5 см ниже исходного уровня.

10.3.2 Испаритель ГГИ-3000 (Россия)

Испаритель ГГИ-3000 (Россия) – это цилиндрический сосуд с коническим дном и площадью поверхности 3000 см^2 и глубиной 60 см. Испаритель устанавливается в грунте, причем его края на 7,5 см выступают над поверхностью земли. В центре испарителя находится металлическая мерная трубка, на которую при измерениях испарения устанавливают объемную бюретку. Бюретка снабжена клапаном, который открывается, для того чтобы уровень воды в ней сравнялся с уровнем воды в испарителе. Затем клапан закрывается, и производится точное измерение объема воды в бюретке. Уровень воды над металлической мерной трубкой определяется на основе объема воды в бюретке и ее размеров. Указатель, прикрепленный к металлической реперной трубке, показывает высоту, на которую необходимо установить уровень воды в испарителе. Уровень воды следует поддерживать таким образом, чтобы он не опускался ниже или не поднимался выше острия указателя более чем на 5 и 10 мм соответственно. Обычно рядом с испарителем ГГИ-3000 устанавливается дождемер ГГИ-3000 с приемной площадью 3000 см^2.

10.3.3 Испарительный бассейн площадью 20 м^2 (Россия)

Этот испарительный бассейн представляет собой цилиндрический бак с плоским дном площадью 20 м^2, глубиной 2 м и диаметром 5 м. Он изготавливается путем сварки 4 – 5-миллиметровых листов железа и устанавливается в грунте, причем его края выступают над землей на 7,5 см. Внутренняя и выступающая внешняя поверхности бака окрашены в белый цвет. Бассейн оборудован специальным доливным баком и успокоителем с мерной трубкой, на которую при измерении высоты уровня воды в бассейне устанавливается объемная бюретка. В успокоителе рядом с мерной трубкой установлен специальный стерженек, заканчивающийся острием иглы и служащий указателем высоты, до которой должен корректироваться уровень воды в бассейне. Уровень воды должен всегда поддерживаться таким образом, чтобы он был не ниже и не выше острия иглы более чем на 5 и 10 мм соответственно. К доливному баку прикреплена стеклянная трубка с делениями для измерения количества воды, доливаемой в испарительный бассейн, и для грубого контроля измерений по бюретке.

10.3.4 Измерения с помощью испарителей и испарительных бассейнов

Скорость испарения измеряется путем наблюдения изменения уровня свободной поверхности воды в испарителе или бассейне. Эти измерения можно проводить с помощью таких устройств, описанных выше, как испарители класса «А» и ГГИ-3000 соответственно.

Используется несколько типов автоматических испарителей. Уровень воды в таком испарителе поддерживается путем постоянного долива воды в испаритель из доливного бака или отлива воды из испарителя после дождя. Количество доливаемой или отливаемой воды регистрируется. В некоторых испарительных бассейнах или испарителях уровень воды непрерывно регистрируется с помощью поплавка в успокоителе. Поплавок приводит в действие самописец.

Измерения испарения с поверхности испарителя положены в основу ряда методик для оценки испарения и суммарного испарения с естественных поверхностей, потеря воды которыми представляет интерес. Измерениям, производимым с помощью испарителей, отдается предпочтение, поскольку в любом случае они являются результатом воздействия всех метеорологических параметров, а данные измерений можно получить сразу же и за любой требуемый период времени. Поэтому испарители часто используются для получения текущей информации об испарении в пределах наблюдательной сети.

10.3.5 Размещение испарителей и испарительных бассейнов

Для испарителей и испарительных бассейнов в основном используются следующие три вида размещения:

(a) размещение в грунте, когда основная емкость испарительного бассейна расположена ниже уровня земли, при этом испаряющая поверхность находится на уровне поверхности земли или вблизи нее;

(b) размещение над землей, когда весь испаритель и испаряющая поверхность находятся на небольшой высоте над поверхностью земли;

c) размещение на заякоренных плавающих платформах на озерах или других водных объектах.

Испарительные площадки должны размещаться на совершенно ровных и открытых участках, свободных от всякого рода препятствий, таких как деревья, здания, кустарники или приборные будки. Расстояние между такими отдельными препятствиями, если они небольшого размера, и испарителем должно быть в пять раз больше их высоты над испарителем; для препятствий, образующих скопления, это расстояние должно быть в 10 раз больше. Участки должны быть достаточно большими, чтобы на показания не влиял снос струй или краевые эффекты со стороны участка с сельскохозяйственной культурой или какие-либо другие. Такие эффекты могут распространяться на расстояние более 100 м. Участок должен быть огорожен, чтобы защитить приборы и не допустить к воде животных; однако ограда должна быть устроена таким образом, чтобы не нарушать структуру поля ветра над испарителем.

Покров поверхности испарительной площадки следует поддерживать в состоянии как можно близком к естественному покрову, характерному для данной территории. Траву, сорняки и тому подобное необходимо регулярно скашивать, для того чтобы их высота не превышала высоту кромки испарителя (7,5 см). Такая же высота травы (менее 7,5 см) предпочтительна также для испарителей класса «А». Прибор ни в коем случае нельзя устанавливать на бетон, асфальт или гравий. Испарители этого типа не следует закрывать от солнца.

10.3.6 Источники ошибки в испарителях и испарительных бассейнах

От способа установки испарителя зависят как различные преимущества, так и источники ошибок при измерениях.

Испарители, установленные над поверхностью земли, дешевы, и их легко устанавливать и обслуживать. Они чище установленных в грунте испарительных бассейнов, поскольку грязь не смывается в них в больших количествах с окружающей поверхности. Любую утечку, возникшую после установки, легко обнаружить и устранить. Однако количество испарившейся воды больше, чем из установленных в грунте испарителей, главным образом за счет дополнительной лучистой энергии, поглощаемой через боковую поверхность. Нежелательное воздействие стенки испарителя можно в значительной степени исключить, используя защищенный испаритель, но это приводит к его удорожанию, нарушению стандартных инструкций и изменению «устойчивых связей», упомянутых в разделе 10.3.

Размещение испарителя в грунте способствует уменьшению нежелательных граничных эффектов, таких как влияние излучения на боковую поверхность и теплообмен между собственно испарителем и атмосферой. Однако недостатками является следующее:

(a) в испарителе накапливается больше ненужных веществ, и его трудно очищать;
(b) течь трудно обнаружить и устранить;
(c) высота окружающей растительности является в некоторой степени более критичной. Кроме того, имеет место значительный теплообмен между водной массой испарителя и почвой, и это зависит от многих факторов, включая тип почвы и ее влагосодержание, а также растительный покров.

В случае плавучего испарителя условия более приближены к испарению с поверхности озера, чем к испарению с прибрежного испарителя, установленного или над землей или на уровне земли, хотя способности аккумулировать тепло у плавучего испарителя и у озера различны. На плавучий испаритель, однако, оказывает влияние то озеро, в котором он находится, и испаритель не всегда является хорошим индикатором испарения с поверхности озера. Имеются значительные трудности при проведении наблюдений и, в частности, забрызгивание и выплескивание часто ухудшают репрезентативность данных. Установка и эксплуатация таких испарителей требуют значительных затрат.

При любом способе размещения важно, чтобы испаритель был изготовлен из нержавеющего металла и чтобы все соединения были прочными и не давали течи.

Сильный дождь и очень сильный ветер могут вызвать выплескивание из испарителей, в результате чего измерения могут стать ошибочными.

Имеет значение уровень водной поверхности в испарителе. Если испаритель переполнен, то до 10 % (или более) любых жидких осадков может вылетать из него в виде брызг, что приведет к завышенной оценке испарения. Слишком низкий уровень воды приведет к уменьшенной скорости испарения (2,5 % на каждый сантиметр ниже 5-сантиметрового исходного уровня в районах с умеренным испарением) в результате затененности бортиком. Если допустить очень низкий уровень воды, то скорость испарения увеличивается за счет повышенного нагрева водной поверхности.

Рекомендуется ограничить допускаемый интервал изменения уровня воды либо с помощью автоматических методов, путем подгонки уровня при снятии каждого показания, либо путем отлива или долива

воды, когда уровень достигает верхней или нижней отметок соответственно.

10.3.7 Обслуживание испарителей и испарительных бассейнов

Осмотр следует проводить не реже одного раза в месяц, уделяя особое внимание обнаружению течи.

Испаритель следует чистить по мере необходимости, удаляя мусор, осадок, водоросли и нефтяные пленки. Рекомендуется добавление в воду небольшого количества медного купороса или других альгицидов для ограничения роста водорослей.

Если вода замерзает, необходимо сколоть весь лед со стенок испарительного бассейна и, пока лед плавает, произвести замеры уровня. Если лед разрушен, то тот факт, что часть воды находится в замерзшем состоянии, незначительно влияет на ее уровень. Если толщина льда не позволяет его расколоть, измерения следует отложить до того времени, когда это можно будет сделать; тогда испарение следует определять за более продолжительный период времени.

Нередко приходится защищать испаритель от птиц и мелких животных, особенно в засушливых и тропических районах. Это можно обеспечить с помощью использования следующих средств:

(a) Химических репеллентов. Во всех случаях использования такой защиты необходимо принимать меры, чтобы физические характеристики воды в испарителе значительно не изменялись.

(b) Проволочной сетки, натянутой над испарителем. Стандартные сетки такого типа широко используются в ряде районов. Они защищают воду от птиц и животных, но они уменьшают потери на испарение за счет частичного экранирования поверхности воды от солнечной радиации и уменьшения интенсивности движения воздуха над водной поверхностью. Для оценки ошибки, обусловленной воздействиями проволочной сетки на поле ветра и тепловые характеристики испарителя, рекомендуется сравнить показания защищаемого испарителя с показаниями стандартного испарителя, расположенного на ближайшей подходящей для сравнения площадке. Испытания с предохранительным цилиндром, который изготовлен из 25-миллиметровой стальной сетки с шестиугольными ячейками, удерживаемой каркасом из 8-миллиметровых стальных прутьев, выявили стабильное уменьшение скорости испарения, равное 10 % за двухлетний период на трех различных площадках.

10.4 ИЗМЕРИТЕЛИ СУММАРНОГО ИСПАРЕНИЯ (ЛИЗИМЕТРЫ)

Несколько типов лизиметров описано в специальной технической литературе. Подробное описание конструкций некоторых приборов, используемых в различных странах, приводится в публикациях ВМО (1966; 1994).

Обычно лизиметр представляет собой внутренний наполненный почвой контейнер, установленный в углублении в грунте с укрепленными стенками или в наружном заглубленном контейнере со специальными устройствами для измерения фильтрации и изменения влагосодержания почвы.

Не существует универсального международного стандартного лизиметра для измерения суммарного испарения. Площадь поверхности используемых лизиметров изменяется от 0,05 м^2 до нескольких сотен квадратных метров, а их глубина – от 0,1 до 5,0 м. В соответствии с принципом их действия лизиметры могут быть классифицированы как невесовые и весовые приборы. Каждый из этих типов приборов имеет свои конкретные достоинства и недостатки, и выбор какого-либо типа лизиметра зависит от поставленной задачи.

Невесовые (фильтрационный тип) лизиметры могут использоваться только для измерений, производимых через большие промежутки времени, за исключением тех случаев, когда влагосодержание почвы может быть измерено каким-либо независимым и надежным способом. Большие лизиметры фильтрационного типа используются для исследований водного баланса и суммарного испарения в том случае, если растительный покров состоит из зрелых деревьев – высоких, с глубокими корнями. Небольшие лизиметры простого типа для почвы, лишенной растительности либо покрытой травой или сельскохозяйственными культурами, могут давать результаты, полезные для практических целей во влажных условиях. Лизиметр такого типа может быть легко установлен, а стоимость его технического обслуживания невысока, благодаря чему он подходит для использования при организации сети наблюдений.

Стоимость весовых лизиметров, за исключением простых микролизиметров для измерения почвенного испарения, гораздо выше, но их преимущество заключается в том, что они обеспечивают надежные и точные оценки суммарного испарения за небольшие промежутки времени при условии соблюдения необходимых мер предосторожности в отношении конструкции, эксплуатации и размещения.

Разработано несколько видов технологий взвешивания с использованием механических и гидравлических принципов. Более простые небольшие лизиметры обычно вынимают из углубления для них и размещают на механических весах с помощью передвижных подъемных кранов. Контейнер лизиметра может быть установлен на стационарных механических весах для непрерывной регистрации показаний. Конструкция системы взвешивания и регистрации может быть значительно упрощена путем использования датчиков нагрузки и тензодатчиков с изменяющимся электрическим сопротивлением. В гидравлических системах взвешивания используется принцип вытеснения жидкости в результате изменения плавучести контейнера (так называемый плавучий лизиметр) или принцип изменения давления жидкости в гидравлических датчиках нагрузки.

Большие взвешиваемые и регистрирующие лизиметры рекомендуются для точных измерений в исследовательских центрах, а также для стандартизации и параметризации других методов измерения эвапотранспирации и ее моделирования. Взвешиваемые лизиметры небольшого размера весьма полезны и подходят для использования в сети. Микролизиметры для измерения испарения с почвы – это относительно новое средство измерений.

10.4.1 Измерение с помощью лизиметра

Скорость суммарного испарения можно определить из обобщенного уравнения водного баланса для контейнеров лизиметра. Значение суммарного испарения равно количеству осадков (или воды при поливе) за вычетом количества просочившейся (дренированной, отфильтрованной) воды изменения запаса воды в почве.

Таким образом, программа наблюдений на площадках, где установлены лизиметры, включает наблюдения за осадками (или поливом), фильтрацией и изменением запаса воды в почве. Полезно включить в эту программу также наблюдения за ростом и развитием растений.

Количество осадков (а также воды в поливе, если он имеет место) предпочтительно измерять на уровне земли стандартными методами. Сбор фильтрующейся воды производится в резервуаре, и ее объем может измеряться через регулярные интервалы времени или регистрироваться с помощью прибора. Для точных измерений изменения водных запасов используются точные гравиметрические методы, описанные выше. При взвешивании лизиметр следует экранировать во избежание воздействия ветровой нагрузки.

Долговременные значения суммарного испарения вполне удовлетворительно можно оценивать с применением объемного метода. С помощью этого метода производятся измерения осадков и фильтрации. Допускается, что за период между наблюдениями изменение запаса воды стремится к нулю. Изменения влагосодержания почвы могут быть определены путем доведения содержания влаги в почве до значения, характерного для полевых условий в начале и конце этого периода.

10.4.2 Размещение измерителей суммарного испарения

Наблюдения за суммарным испарением должны учитывать растительный покров и условия влажности на общей территории вокруг станции (ВМО, 2003). Для имитации репрезентативных значений интенсивности суммарного испарения почва и растительный покров лизиметра должны соответствовать почве и растительному покрову окружающей территории, а любые неблагоприятные эффекты, вызванные присутствием приборов, должны быть сведены к минимуму. Наиболее важные требования к размещению лизиметров описаны ниже.

Для обеспечения сохранения гидромеханических свойств естественной почвы рекомендуется поместить ее в контейнер в виде целого блока (монолита). В случае почвы рыхлого, довольно однородного типа и при наличии большого контейнера достаточно наполнить контейнер слой за слоем в той же последовательности и с той же плотностью, как и в натуральном разрезе почвы.

С целью моделирования естественного дренажного процесса в контейнере следует обеспечить свободный дренаж у его дна. В зависимости от текстуры почвы может оказаться необходимым обеспечить искусственное отсасывание на днище лизиметра посредством разрежения воздуха.

Лизиметр, кроме микролизиметров, предназначенных для измерения испарения почвы, должен быть достаточно большим и глубоким, а его кромка низкой насколько это практически возможно, чтобы получить репрезентативный, свободно растущий зеленый покров без каких-либо ограничений для его развития.

В целом, расположение лизиметров зависит от требований, связанных с препятствиями для ветра, таких же, как требования к установке испарительных бассейнов, а именно: площадка должна быть расположена вне зоны влияния зданий, даже одиночных деревьев, метеорологических приборов и т. д. Для того чтобы свести к минимуму эффекты адвекции, площадки с лизиметрами следует

располагать на достаточном расстоянии от влияющих на поле ветра препятствий, имеющихся на окружающей территории, т. е. на расстоянии не менее чем 100 – 150 м. Предотвращение эффектов адвекции очень важно при измерениях, проводимых на орошаемых землях.

10.4.3 Источники ошибки в измерениях с помощью лизиметров

Для измерений с помощью лизиметров характерно несколько источников ошибки, возникающей вследствие нарушения естественных условий самим прибором. Ниже перечислены некоторые основные факторы:

(a) Ограниченный рост корневой системы.

(b) Изменение турбулентной диффузии в результате нарушения однородности растительного покрова между лизиметром и окружающей территорией. Любое нарушение однородности может быть обусловлено наличием кольцеобразного слоя, образованного стенкой контейнера и подпорными стенами, а также в результате возникновения различий в самом растительном покрове.

(c) Недостаточная тепловая эквивалентность лизиметра и окружающей почвы в результате следующих причин:
   - (i) термоизоляции от подпочвенного слоя;
   - (ii) термических эффектов воздуха, поднимающегося или опускающегося между контейнером и стенками углубления;
   - (iii) изменения термических свойств почвы вследствие изменения ее структуры и влажности.

(d) Недостаточная эквивалентность водного баланса в лизиметре и в окружающей почве в результате:
   - (i) нарушения структуры почвы;
   - (ii) ограниченного дренажа;
   - (iii) вертикальной фильтрации через стенки углубления;
   - (iv) предотвращения стока с поверхности и поперечного движения почвенной влаги.

Существует несколько удобных способов сведения к минимуму ошибок, возникающих при измерениях лизиметрами (например, регулировка температуры под контейнером, сокращение вертикальной фильтрации стен с помощью колец с фланцами и т. д.). Помимо требований к точному воспроизведению конструкции оборудования лизиметра, особенно большое значение имеет достаточная репрезентативность растительности и типа почвы для изучаемой местности. Более того, местоположение площадки почвенного испарителя должно быть полностью репрезентативным для естественных полевых условий.

10.4.4 Обслуживание лизиметров

Для обеспечения репрезентативности растительного покрова в лизиметре необходимо учитывать несколько факторов. Все сельскохозяйственные и другие работы (сев, внесение удобрений, жатва и тому подобное) в контейнере и на окружающей территории должны проводиться одинаково и одновременно. Во избежание ошибок, связанных с атмосферными осадками, растения около и внутри контейнера должны поддерживаться в вертикальном положении, а опавшие листья и сломанные стебли не должны находиться на поверхности лизиметра.

Обслуживание технических устройств является специфическим для каждого вида приборов и его описание не может быть дано в этом документе.

Желательно, по крайней мере, один раз в год проверять измеритель суммарного испарения на течь путем экранирования его поверхности для предотвращения суммарного испарения и последующего наблюдения в течение нескольких дней за объемом дренажа, который должен быть равен количеству воды, добавленной на его поверхность.

10.5 ОЦЕНКА ИСПАРЕНИЯ С ЕСТЕСТВЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Как показано в разделе 10.1.3, анализ факторов, влияющих на испарение, свидетельствует о том, что скорость испарения с естественных поверхностей обязательно будет отличаться от скорости испарения с измерителя испарения, установленного в таких же атмосферных условиях, поскольку физические характеристики двух испаряющих поверхностей не идентичны.

На практике интерес представляет скорость испарения или суммарного испарения с естественных поверхностей, например, испарение с поверхности водохранилища или озера, с территорий, занятых сельскохозяйственными культурами, а также пространственное распределение испарения с таких обширных поверхностей суши, как районы водосбора.

В частности, точные пространственные оценки суммарного испарения в регионах с различными характеристиками поверхности и формами землепользования получить очень трудно (ВМО, 1966; 1997).

Подходящие методы для оценки испарения с поверхности озера или водохранилища – это использование

водного баланса, энергетического баланса и аэродинамических подходов, метода комбинирования аэродинамических и энергобалансовых уравнений и взаимодополняющей связи между действительным и потенциальным испарением. Кроме того, в ряде методик испарение, измеренное с помощью испарителя, используется для установления связи озеро-испаритель. Эти связи являются специфическими для каждого типа испарителя и способа их размещения. Они также зависят и от климатических условий (см. ВМО, 1985; 1994 (глава37)).

Значения в точке или ареале не ограниченного наличием воды суммарного испарения с поверхности суши, покрытой растительностью, могут быть получены путем определения такого потенциального суммарного испарения (или суммарного испарения для эталонной сельскохозяйственной культуры) методами, аналогичными уже вышеописанным методам для озер, но адаптированными к условиям растительности. Некоторые методы используют дополнительные коэффициенты зависимости от стадии роста для каждого вида растительности, такой как сельскохозяйственные культуры, и/или интегрированное значение устьичного сопротивления, характерное для растительности в целом.

Королевский Нидерландский метеорологический институт применяет следующую процедуру, разработанную Г.Ф. Маккинком (Хогхарт, 1971) для расчета суточного (24 часа) эталонного испарения E_r с растительности при среднесуточной температуре T воздуха и суточном количестве суммарной радиации Q:

если давление насыщенного водяного пара e_s при температуре воздуха T:

$$e_s(T) = 6{,}107 \ \ 10^{7{,}5 \frac{T}{237{,}3+T}} \qquad \text{гПа}$$

наклон кривой насыщенного водяного пара в зависимости от температуры T:

$$\Delta(T) = \frac{7{,}5 \cdot 237{,}3}{(237{,}3+T)^2} \cdot \ln(10) \cdot e_s(T) \qquad \text{гПа/°C}$$

психрометрический коэффициент:

$$\Delta(T) = 0{,}646 + 0{,}0006T \qquad \text{гПа/°C}$$

удельная теплота испарения воды:

$$\lambda(T) = 1\,000 \cdot (2\,501 - 2{,}38 \cdot T) \qquad \text{Дж /кг}$$

плотность воды:

$$\rho = 1\,000 \qquad \text{кг/м}^3$$

суммарная суточная радиация (количество за 24 часа):

$$Q \qquad \text{Дж/м}^2$$

температура воздуха (среднесуточная):

$$T \qquad \text{°C}$$

тогда суточное эталонное испарение (суточная интенсивность испарения) с растительности:

$$E_r = \frac{1\,000 \cdot 0.65 \cdot \delta(T)}{\{\delta(T) + \gamma(T)\} \cdot \rho \cdot \lambda(T)} \cdot Q \qquad \text{мм}$$

Примечание: константа 1 000 используется для преобразования метров в миллиметры; константа 0,65 является типичной эмпирической константой.

Связывая измеренное значение интенсивности действительного суммарного испарения с оценками не ограниченного наличием воды потенциального суммарного испарения, а затем последовательно связывая эту нормализованную величину с влагосодержанием почвы, дефицитом воды в почве или водным потенциалом в корневой зоне, можно получить коэффициенты для расчета действительной интенсивности суммарного испарения при данном влагосодержании.

Значения действительного суммарного испарения с земной поверхности могут оцениваться и непосредственно в ходе наблюдений за изменениями влагосодержания почвы путем измерений влажности почвы на регулярной основе. Можно произвести измерения более точно, используя весовой лизиметр. В других методах применяются измерения турбулентности (например, метод корреляции турбулентного потока) и измерения профилей (например, методы использования данных для пограничного слоя, а также метод расчета коэффициента энергетического баланса Боуэна на двух уровнях). Эти методы более дорогостоящие, для их реализации требуются специальные приборы и датчики влажности, скорости ветра и температуры. Такие оценки для изучаемых типов почв и растительного покрова, могут быть использованы в качестве надежных независимых справочных данных при выявлении эмпирических связей в процессе моделирования суммарного испарения.

При определении суммарного испарения с поверхности бассейна возникает проблема, связанная с тем, что в случае нарушения непрерывности характеристик поверхности значения интенсивности суммарного испарения в пределах рассматриваемой территории становятся различными. При рассмотрении

значений, полученных в результате измерений через короткие промежутки времени, необходимо оценивать суммарное испарение с использованием эмпирических связей. Для оценки суммарного испарения с поверхности водного бассейна за большой период времени (в целях сведения к минимуму эффектов накопления) может быть использован метод водного баланса (см. ВМО, 1971). Один из подходов, применяемых для оценок испарения с обширных территорий, связан с методом водного баланса, при этом суммарное испарение по площади оценивается на основе данных радиозондирования. Информация об описанных выше методах, их преимуществах и пределах их применения представлена в публикации ВМО (1994, глава 38).

Измерение испарения с поверхности снега является более сложной задачей, и, возможно, данные таких измерений менее точные, чем расчет испарения с поверхности воды.

Во многих странах для измерения испарения с поверхности снежного покрова используются испарители, изготовленные из полиэтилена или бесцветной пластмассы; наблюдения проводятся только при отсутствии снегопада.

Испарение со снежного покрова можно оценивать на основании данных наблюдений влажности воздуха и скорости ветра на одном или двух уровнях над поверхностью снежного покрова и непосредственно у поверхности с использованием уравнения турбулентной диффузии. Оценки считаются наиболее надежными, когда значения испарения вычисляются для пятидневных и более длинных периодов.

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Hooghart, J.C. (ed.), 1971: *Evaporation and Weather*. TNO Committee of Hydrological Research, Technical Meeting 44, Proceedings and Information No. 39, TNO, The Hague.

World Meteorological Organization, 1966: *Measurement and Estimation of Evaporation and Evapotranspiration.* Technical Note No. 83, WMO-No. 201.TP.105, Geneva.

World Meteorological Organization, 1971: *Problems of Evaporation Assessment in the Water Balance* (C.E. Hounam). WMO/IHD Report No. 13, WMO-No. 285, Geneva.

World Meteorological Organization, 1973: *Atmospheric Vapour Flux Computations for Hydrological Purposes* (J.P. Peixoto). WMO/IHD Report No. 20, WMO-No. 357, Geneva.

World Meteorological Organization, 1976: T*he CIMO International Evaporimeter Comparisons*. WMO-No. 449, Geneva.

World Meteorological Organization, 1977: *Hydrological Application of Atmospheric Vapour-Flux Analyses* (E.M. Rasmusson). Operational Hydrology Report No. 11, WMO-No. 476, Geneva.

World Meteorological Organization, 1985: *Casebook on Operational Assessment of Areal Evaporation*. Operational Hydrology Report No. 22, WMO-o. 635, Geneva.

Всемирная Метеорологическая Организация, 1992 : *Международный метеорологический словарь*. Второе издание, ВМО-No. 182, Женева.

Всемирная Метеорологическая Организация/ Организация Объединенных Наций по вопросам образования, науки и культуры, 1992: *Международный гидрологический словарь*. ВМО-№ 385, Женева.

World Meteorological Organization, 1994: *Guide to Hydrological Practices*. Fifth edition, WMO-No. 168, Geneva.

World Meteorological Organization, 1997: *Estimation of Areal Evapotranspiration*. Technical Reports in Hydrology and Water Resources No. 56, WMO/TD-No. 785, Geneva.

Всемирная Метеорологическая Организация, 2003: *Наставление по Глобальной системе наблюдений*. Том I, ВМО-№ 544, Женева.

ГЛАВА 11

ИЗМЕРЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ

11.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Влажность почвы является важным компонентом атмосферного водного цикла как в небольшом сельскохозяйственном масштабе, так и в крупномасштабном моделировании взаимодействия суши/атмосферы. Растительность и сельскохозяйственные культуры всегда в большей степени зависят от состояния влажности на корневом уровне, нежели от выпадения осадков. Составление водного баланса для планирования ирригации, а также составление фактического графика ирригационных мероприятий требует наличия информации о влажности почвы на местном уровне. Наличие информации о степени влажности почвы способствует прогнозированию риска паводков или образования тумана.

Тем не менее на метеорологических станциях редко проводятся регулярные наблюдения за состоянием влажности почвы. Документация о влажности почвы обычно ограничивалась описанием «состояния почвы» в соответствии с кодовыми таблицами ВМО 0901 и 0975, а его измерение оставлялось на усмотрение гидрологов, сельскохозяйственных специалистов и других весьма заинтересованных сторон. Приблизительно в 1990 году метеорологи стали проявлять больший интерес к измерению влажности почвы. Отчасти это объяснялось тем, что в результате новаторской работы Диадорффа (Deardorff) (1978) численные модели атмосферы разных масштабов стали в большей мере приспособлены к работе с данными о потоках явного и латентного тепла в поверхностных слоях почвы. Кроме того, новые разработанные методы измерения влажности почвы являются более практически применимыми для метеорологических станций по сравнению с большинством классических методов.

Для удовлетворения возрастающей потребности в определении влажности почвы будет проведено обсуждение чаще всего применяемых методов и приборов, в том числе их преимуществ и недостатков. Будут также упомянуты некоторые менее распространенные методы наблюдения.

11.1.1 Определения

При определении влажности почвы измеряются либо содержание почвенной влаги, либо потенциал почвенной влаги.

Содержание почвенной влаги

Содержание почвенной влаги выражается в виде массы или объема влаги в почве, при этом энергетическое состояние почвенной влаги выражается в виде потенциала почвенной влаги. Отношение между содержанием и потенциалом не является универсальным и зависит от характеристик местной почвы, таких как плотность почвы и текстура почвы.

Содержание влаги в почве, определяемое на основе массы, выражается в виде гравиметрического содержания влаги в почве – θ_g, определяемого формулой:

$$\theta_g = M_{water}/M_{soil} \qquad (11.1)$$

где M_{water} – это масса воды в образце почвы, а M_{soil} – масса сухой почвы, содержащейся в образце. Значения θ_g обычно выражаются в метеорологии в процентах.

Поскольку параметры осадков, суммарного испарения и переноса растворенных веществ обычно выражаются в виде потока, объемное выражение содержания влаги в почве часто является более полезным. Объемное содержание влаги в почве в образце почвы – θ_v, выражается формулой:

$$\theta_v = V_{water}/V_{sample} \qquad (11.2)$$

где V_{water} – это объем воды в образце почвы, а V_{sample} – общий объем сухой почвы + воздух + вода в образце. И данное отношение обычно выражается в процентах. Зависимость между гравиметрическим и объемным содержание влаги выражается формулой:

$$\theta_v = \theta_g\,(\rho_b/\rho_w) \qquad (11.3)$$

где ρ_b – плотность сухой почвы, а ρ_w – плотность почвенной воды.

Основным способом измерения влагосодержания почвы является гравиметрический метод, описанный ниже в разделе 11.2. Поскольку в основе этого метода лежат прямые измерения, он является стандартом, по которому сравниваются все другие методы. К сожалению, взятие гравиметрических проб нарушает структуру почвы и делает невозможным повторные измерения на том же самом образце почвы. Ввиду трудностей точного измерения объемов сухой почвы и воды объемное содержание влаги

обычно не определяются непосредственным образом. Потенциал влажности почвы

Потенциал влажности почвы является описанием энергетического состояния почвенной влаги и важным параметром для анализа переноса воды, оценок запаса воды и определения взаимосвязей в системе почва – растения – вода. Разность потенциалов почвенной влаги между двумя участками почвы характеризует тенденцию перетока воды от участка с высоким потенциалом к участку с низким потенциалом. При высыхании почвы потенциал ее влажности становится более отрицательным и потому увеличивается работа, которая должна быть выполнена для извлечения воды из почвы. В результате этого затрудняется извлечение воды растениями и, таким образом, водный потенциал в растении уменьшается, что приводит к нагрузке на растение и в конечном итоге к его сильному увяданию.

Формально потенциал влажности почвы является мерой измерения способности почвенной влаги совершать работу или, в случае отрицательного потенциала, – работу, которую необходимо совершить для извлечения воды из почвы. Общий потенциал почвенной влаги ψ_t – совокупный эффект всех силовых полей – выражается в виде формулы:

$$\psi_t = \psi_z + \psi_m + \psi_o + \psi_p \qquad (11.4)$$

где ψ_z – это гравитационный потенциал, определяемый высотой места над средним уровнем моря; ψ_m – матричный потенциал (благодаря которому происходит всасывание воды почвенной матрицей); ψ_o – осмотический потенциал, являющийся результатом энергетических эффектов растворенных в воде веществ; ψ_p – потенциал давления (т.е.гидростатическое давление ниже поверхности воды, или иначе – давление столба жидкости).

Совокупность потенциалов, не связанных с составом воды или почвы, именуется гидравлическим потенциалом – ψ_h. В случае насыщенной почвы он выражается в виде формулы $\psi_h = \psi_z + \psi_p$, а в случае ненасыщенной почвы – формулой $\psi_h = \psi_z + \psi_m$. При использовании фразы «водный потенциал», возможно с символом ψw, рекомендуется проверять данное автором определение, поскольку этот термин может быть использован для формулы $\psi_m + \psi_z$, а также для формулы $\psi_m + \psi_o$.

Градиенты отдельных потенциалов не всегда будут достаточно эффективными в создании стока. Например, ψ_0 требует наличия полупроницаемой мембраны для создания стока, а ψ_p будет существовать в условиях насыщения или подпора, однако в большинстве случаев практических применений почва является ненасыщенной.

11.1.2 **Единицы измерения**

При решении уравнений баланса массы или неразрывности применительно к воде необходимо помнить о том, что компоненты набора параметров содержания воды являются безразмерными. Гравиметрическое содержание влаги в почве выражается в виде веса почвенной влаги, содержащейся в единице веса почвы (кг воды/кг сухой почвы). Аналогично этому, объемное содержание влаги является объемной долей ($м^3$ воды/$м^3$ почвы).

Базовой единицей водного потенциала является единица энергии (в джоулях, кг $м^2$/$сек^2$) на единицу массы – Дж/кг. При ином способе описания энергия на единицу объема (Дж/$м^3$) является эквивалентом давления, выраженного в паскалях (Па = кг/м · $сек^2$). Единицами измерения, встречающимися в старой литературе, являются бар (= 100 кПа), атмосфера (= 101,32 кПа), или фунты на квадратный дюйм (= 6,895 кПа). Третьим классом единиц измерения являются единицы измерения высоты столба воды или ртути в (санти)метрах – энергия на единицу веса. Отношение этих трех потенциальных классов единиц выражается следующей формулой:

$$\psi\ (\mathrm{J\ kg^{-1}}) = \gamma \times \psi\ (\mathrm{Pa}) = [\psi\ (\mathrm{m})]\ /\ \mathrm{g} \qquad (11.5)$$

где γ = 103 кг/$м^3$ (плотность воды) и g = 9,81 м/$сек^2$ (ускорение свободного падения). Поскольку потенциал почвенной влаги характеризуется широким диапазоном значений, он часто выражается в логарифмической шкале – в виде логарифма давления водяного столба. Обычно используемая единица для него называется p_F, и равна логарифму десятичному от абсолютного значения высоты водяного столба, выраженной в сантиметрах.

11.1.3 **Метеорологические требования**

Почва состоит из отдельных частиц и комков минеральных и органических материалов, разделенных пространством или порами, которые заполнены водой и воздухом. Относительный объем пористого пространства уменьшается по мере увеличения размера частиц почвы (интуитивно ожидалось бы обратное). Перемещение жидкой воды в почве зависит от размера, строения и как правило геометрии пористого пространства.

При добавлении большого количества воды в образец «сухой» почвы часть этой воды в результате действия гравитации быстро просачивается через любые относительно большие трещины и каналы. Оставшаяся часть воды будет стремиться вытеснить часть воздуха в пространстве между частицами и в первую очередь в крупных пористых пространствах.

В широком смысле слова четко определенный «фронт увлажнения» будет перемещаться в почве в направлении сверху вниз, оставляя при этом все более толстый слой, сохраняющий всю влажность, которую он может удержать, несмотря на действие гравитации. Соответственно этот слой почвы именуется «полевой влагоемкостью» – состояние, при котором большинство видов почвы характеризуется формулой $\psi \approx 10$ кПа (пФ* ≈ 2). Это состояние почвы нельзя смешивать с нежелательной ситуацией «насыщенной» почвы, когда все пористое пространство заполнено водой. После вызывающего насыщение события, такого как сильный дождь, почве обычно требуется по меньшей мере 24 часа для достижения полевой влагоемкости. Когда содержание влажности снижается ниже уровня полевой влагоемкости, последующее ограниченное перемещение воды в почве происходит частично в жидком виде и частично в паровой фазе в результате дистилляции (в зависимости от температурных градиентов в почве), и иногда в результате переноса воды в корнях растений.

Корни растения в почвенном блоке будут извлекать жидкую воду из водяных пленок вокруг частиц почвы, с которыми они находятся в контакте. Скорость, с которой возможно это извлечение, зависит от потенциала важности почвы. Наступает момент, когда силы, удерживающие пленки влажности у частиц почвы, не могут быть преодолены всасывающей способностью корней растений, в результате чего растениям не хватает воды и они утрачивают свою упругость (тургор): влажность почвы достигает «точки увядания», которая в большинстве случаев наблюдается при потенциале влажности почвы минус 1,5 МПа (пФ ≈ 4,2). В сельском хозяйстве доступной растениям влажностью почвы обычно считается количественная разница между полевой влагоемкостью и точкой увядания, и это значение характеризуется существенным различием в зависимости от вида почвы: в песчаных почвах оно может быть менее 10 объемных процентов, а в почвах с большим содержанием органического вещества оно может превышать 40 объемных процентов.

Желательно обычно знать содержание и потенциал влажности почвы как функцию глубины. Модели суммарного испарения (модели эвапотранспирации касаются главным образом небольшой глубины (десятки сантиметров); сельскохозяйственные же применения требуют наличия информации о влажности на глубине обитания корней (порядка одного метра); а модели общей циркуляции атмосферы включают ряд слоев до нескольких метров. Для гидрологических потребностей и нужд водного баланса, таких как модели стока в масштабе водосбора, а также для оказания воздействия на свойства почвы, такие как механическая прочность, теплопроводность и диффузионная способность, требуется информация о содержании влаги в почве на различной глубине. В зависимости от вида применения меняется точность, требуемая в отношении определения содержания влажности и пространственного и временного разрешения. Часто возникает проблема, связанная с неоднородностью многих видов почвы, суть которой заключается в том, что единственное место наблюдения не может обеспечить абсолютную информацию о состоянии влажности почвы а какой-либо территории, а предоставляет лишь относительные сведения о ее изменении.

11.1.4 Методы измерения

Методы и приборы, имеющиеся для оценки состояния влажности почвы, могут быть классифицированы тремя способами. Во-первых, проводится различие между определением влагосодержания и определением потенциала влажности. Во-вторых, так называемый прямой метод требует наличия обширной репрезентативной территории, на которой можно брать большое количество образцов почвы для проведения разрушающего анализа в лаборатории. При косвенных методах используется прибор, помещаемый в почву для измерения определенной характеристики почвы, связанной с ее влажностью. В-третьих, методы могут быть классифицированы согласно оперативной приемлемости, при этом учитывается постоянный состав нанимаемых работников, степень зависимости от наличия лаборатории, сложность функционирования и достоверность результата. Кроме того, предварительные затраты на приобретение приборного оборудования должны сравниваться с последующими затратами на местные регулярные наблюдения и обработку данных.

Такие обзоры как подготовленные ВМО (1968; 1989; 2001), и Schmugge, Jackson и McKim (1980) являются весьма полезными для ознакомления с практическими проблемами, однако, например, диэлектрические методы измерений влажности почвы стали достаточно корректными только после 1980 года, поэтому не следует чрезмерно полагаться на слишком ранние обзоры при выборе оперативного метода.

Имеются четыре оперативных альтернативы для определения содержания почвенной влаги. Во-первых, существует классическое гравиметрическое определение влаги, которое является простым прямым методом. Во-вторых, существует лизиметрия – не разрушающий почву вариант гравиметрических измерений. Он заключается в том, что заполненный почвой контейнер взвешивается либо эпизодически, либо постоянно для получения

сведений об изменении общей массы в контейнере; эти сведения могут быть частным или общим результатом изменений во влажности почвы (более подробно лизиметры рассматриваются в части I, глава 10). В-третьих, содержание влаги может определяться косвенным образом посредством различных радиологических методов, таких как рассеяние нейтронов или поглощение гамма-излучения. В-четвертых, данные о содержании влаги могут определяться, исходя из диэлектрических характеристик почвы, например путем использования динамической рефлектометрии.

Измерение потенциала влажности почвы может осуществляться несколькими косвенными методами, в частности с использованием тензиометров, резисторных блоков и почвенных психрометров. Ни один из этих приборов не является эффективным в настоящее время в отношении полного спектра возможных значений потенциала влаги. Информация о расширенном исследовании всех различных методов измерений влажности почвы содержится в обновленных справочниках, подготовленных Клютом (Klute) (1986), Дирксеном (Dirksen) (1999), и Смитом (Smith) и Муллинсом (Mullins) (упоминаемым в данном документе как Гарднер и др. (Gardner and others), 2001, и Муллинс (Mullins), 2001).

11.2 ПРЯМОЕ ГРАВИМЕТРИЧЕСКОЕ ИЗМЕРЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ВЛАГИ В ПОЧВЕ

Гравиметрическое измерение содержания влаги в почве θ_g обычно осуществляется непосредственным образом. Образцы почвы массой около 50 г берутся в полевых условиях с помощью наиболее доступных орудий (лопаты, спиральные ручные буры, ковшовые буры, керновые буры с механическим приводом), при этом образец структуры почвы разрушается по возможности в минимальной степени (Dirksen, 1999). Пробы почвы следует немедленно поместить в водонепроницаемый, бесшовный, предварительно взвешенный и маркированный контейнер. Поскольку пробы будут помещены в печь, этот контейнер должен выдерживать высокие температуры и при этом не плавиться и не терять собственную массу. Самыми распространенными контейнерами для почвы являются алюминиевые банки, однако в случае высушивания проб в лаборатории в микроволновых печах следует использовать неметаллические контейнеры. Если пробы почвы должны перевозиться на большое расстояние, следует использовать ленту для герметизации контейнера, с тем чтобы предотвратить потерю влажности в результате испарения.

Пробы и контейнер взвешиваются в лаборатории перед высушиванием и после него, при этом разница представляет собой массу воды, первоначально содержавшейся в пробе почвы. Процедура высушивания заключается в помещении открытого контейнера в электрическую печь при температуре 105 °C до тех пор, пока масса не стабилизируется на постоянном уровне. Время, обычно необходимое для высушивания, колеблется от 16 до 24 часов. Необходимо отметить, что высушивание при температуре 105 ± 5 °C является частью общепринятого процесса определения «содержания влаги в почве», исходной целью которого является измерение содержания только «свободной влаги», которое не связано с матрицей почвы (Гарднер и другие) (Gardner and others, 2001).

Если пробы почвы содержат значительные количества органического вещества, то при температуре 105 °C может произойти чрезмерное окисление его и некоторая часть органического вещества из пробы будет потеряна. Хотя трудно определить конкретную температуру, при которой происходит такое, понижение температуры печи со 105 до 70 °C является, очевидно, достаточным, для того чтобы избежать существенной потери органического вещества. Однако это может привести к оценкам содержания влаги, которые являются слишком низкими. Следует проверять и регистрировать температуру и время высушивания в печи.

Кроме применения электрической печи, для гравиметрического определения содержания воды в почве также может эффективно использоваться высушивание в микроволновой печи (Gee и Dodson, 1981). При использовании этого метода температура воды в почве быстро повышается до точки кипения, при которой она остается постоянной в течение определенного периода времени, обусловленного поглощением тепла водой в процессе испарения. Затем температура быстро повышается, как только энергия, поглощаемая водой в почве, превысит энергию, которую необходимо расходовать для испарения воды. При использовании этого метода следует проявлять осторожность, поскольку при значительном повышении температуры пластмассовые контейнеры могут расплавиться, если в пробе почвы присутствуют камни.

Гравиметрическое содержание влаги в воздушно-сухой (25 °C) минеральной почве часто составляет менее 2 %, однако по мере приближения почвы к точке насыщения содержание влаги может увеличиться до значений от 25 до 60 % в зависимости от типа почвы. Объемное содержание влаги в почве θv может находиться в пределах от менее 10 % для воздушно-сухой почвы до 40 – 50 % для

приближающихся к точке насыщения минеральных почв. Определение величины θv почвы требует проведения измерения плотности почвы, например, посредством покрытия комка почвы парафином и его взвешивания в воздухе и воде или при помощи какого-либо другого метода (Campbell и Henshall, 2001).

Содержание влаги в каменистой или гравийной почве может быть весьма неопределенным. В тех случаях когда камни занимают существенный объем почвы, они изменяют результат прямого измерения почвенной массы, не оказывая при этом аналогичного воздействия на пористость почвы. Например, гравиметрическое содержание влаги может составлять 10 % для пробы почвы с объемной плотностью в 2 000 кг/м^3; в то же время содержание влаги в пробе, состоящей из мелкого почвенного материала (камни и гравий исключаются), составило бы 20 %, если объемная плотность мелкого почвенного материала составляла 1 620 кг/м^3.

Хотя гравиметрическое содержание влаги для фракции мелкозернистой почвы $\theta_{g,fines}$ является величиной, обычно используемой для пространственного и временного сравнения, может также существовать необходимость определения объемного содержания влаги в гравийной почве. Последнее значение может иметь важное значение при расчете объема влаги в корневой зоне. Соотношение между гравиметрическим содержанием влаги в мелкозернистом почвенном материале и объемным содержанием влаги выражается формулой:

$$\theta_{v,stony} = \theta_{g,fines} (\rho_b / \rho_v)(1 + M_{stones}/M_{fines}) \quad (11.6)$$

где $\theta_{v,stony}$ – объемное содержание влаги в почве, в состав которой входят камни или гравий, а M_{stones} и M_{fines} – соответственно, массы камней и мелкозернистых почвенных фракций (Klute, 1986).

11.3 СОДЕРЖАНИЕ ВЛАГИ В ПОЧВЕ: КОСВЕННЫЕ МЕТОДЫ

Способность почвы удерживать влагу является функцией текстуры и структуры почвы. При отборе пробы почвы исследуемая почва разрушается, и соответственно изменяется ее способность удерживать воду. Косвенные методы измерения содержания влаги в почве являются целесообразными, когда они позволяют собирать информацию с одного и того же участка от многих точек наблюдений, не разрушая при этом систему почва – вода. Кроме того, при помощи большинства косвенных методов определяется объемное содержание влаги в почве и при этом совершенно отсутствует какая-либо необходимость в определении плотности почвы.

11.3.1 Радиологические методы

Существуют два различных радиологических метода для измерения содержания влаги в почве. Одним из них является широко используемый метод рассеяния нейтронов, который основан на взаимодействии нейтронов большой энергии (быстрых нейтронов) с ядрами атомов водорода в почве. При помощи другого метода измеряется ослабление гамма-лучей во время их прохождения через почву. Оба метода используют портативное оборудование для проведения многочисленных измерений на станциях постоянных наблюдений и требуют тщательной калибровки, предпочтительно в почве, в которой должно использоваться данное оборудование.

При использовании любого устройства радиоактивного излучения необходимо соблюдать определенные меры предосторожности. Изготовитель предоставляет защитный экран, которым необходимо постоянно пользоваться. Измерительный щуп находится вне защитного экрана только тогда, когда он опускается в скважину в почве, армированную трубой. При соблюдении руководств и правил радиационной безопасности, составленных фирмами-изготовителями и органами здравоохранения, нет никакой опасности подвергнуться воздействию повышенного уровня радиации независимо от того, как часто используется оборудование. Тем не менее вне зависимости от типа используемого устройства радиоактивного излучения оператор должен носить при себе определенный вид дозиметра, который позволит ежемесячно оценивать и фиксировать персональные уровни облучения.

11.3.1.1 Метод рассеяния нейтронов

При определении влажности в почве при помощи нейтронов (Visvalingam и Tandy, 1972; Greacen, 1981) в почву опускается зонд, в который вмонтированы радиоактивный источник, испускающей нейтроны большой энергии (быстрые нейтроны), и счетчик медленных нейтронов. Ядра водорода, масса которых почти равна массе нейтронов, обладают способностью замедления нейтронов при столкновении с ними по меньшей мере в десять раз, равно как и большинство других содержащихся в почве ядер. Поскольку в любой почве большая часть водорода присутствует в виде молекул воды, плотность потока медленных («тепловых») нейтронов вблизи нейтронного зонда приблизительно пропорциональна объемному содержанию влаги в почве.

После ряда столкновений определенная доля замедленных нейтронов вновь достигнет зонда и его

счетчика. Если содержание влаги в почве является значительным, немногие нейтроны способны пролететь большое расстояние до того момента, когда они станут тепловыми и неэффективными, и в таком случае 95 % подсчитанных нейтронов поступает из относительно небольшого объема почвы. Во влажной почве «радиус воздействия» может составлять лишь 15 см, тогда как в сухой почве этот радиус может увеличиться до 50 см. В этой связи измеряемый объем почвы меняется в зависимости от содержания влаги, и невозможно разделять тонкие слои. Таким образом, этот метод в меньшей степени подходит для локализации разрывов непрерывности в содержании влаги и не может эффективно использоваться в верхнем слое почвы толщиной в 20 см из-за разрыва непрерывности в среде почва – воздух.

Возможно несколько вариантов расположения источника и детектора в нейтронном зонде, однако наилучшим является зонд с двойным детектором и источником в центре – как правило в цилиндрическом контейнере. Подобное расположение позволяет обеспечить почти сферическую зону воздействия и получить более линейную зависимость сосчитанных нейтронов от влагосодержания почвы.

Для соединения нейтронного зонда с основным электронным оборудованием используется кабель, с тем чтобы этот зонд можно было опускать в предварительно подготовленную скважину в почве, армированную трубой. Труба, армирующая скважину, должна быть без стыков и с достаточно толстой стенкой (не менее 1,25 мм), чтобы обеспечить жесткость, но не настолько толстой, чтобы вызывать значительное замедление нейтронов. Эта труба должна быть изготовлена из устойчивого к коррозии материала, такого как нержавеющая сталь, алюминий или пластмасса, хотя следует избегать использование поливинилхлорида, поскольку он поглощает медленные нейтроны. Обычно достаточной является прямая труба диаметром в 5 см, для того чтобы опускать зонд в эту трубу, не опасаясь, что он там застрянет. При установке армирующей трубы следует проявлять аккуратность для обеспечения того, чтобы между этой трубой и почвенной матрицей не было ни одной воздушной полости. Труба должна выступать над поверхностью почвы как минимум на 10 см, с тем чтобы обеспечить установку поверх армирующей трубы бокса, содержащего электронное оборудование. Все армирующие трубы должны быть снабжены съемными крышками для предотвращения попадания дождевой воды в эти трубы.

Для повышения экспериментальной воспроизводимости результатов измерений содержание воды в почве определяется не непосредственно по числу зарегистрированных медленных (тепловых) нейтронов, а по расчетному соотношению (CR), выраженному следующей формулой:

$$CR = C_{\text{soil}}/C_{\text{background}} \tag{11.7}$$

где C_{soil} – число тепловых нейтронов, зарегистрированных от почвы, а $C_{\text{background}}$ – число тепловых нейтронов в эталонном носителе. Все нейтронные зонды снабжаются в настоящее время стандартным образцом для этих фоновых калибровок – обычно в сопоставлении с водой. Стандартный образец, в который помещается зонд, должен иметь как минимум 0,5 м в диаметре, с тем чтобы представлять «неопределенный» носитель. Калибровка для определения $C_{\text{background}}$ может проводиться посредством снятия 10 одноминутных показаний, которые должны усредняться, или посредством единственного одночасового показания. C_{soil} определяется на основе усреднения нескольких показаний измерений в почве на конкретной глубине/в конкретном месте. Для целей калибровки лучшего всего взять три пробы вокруг армирующей скважину трубы и усреднить показатели содержания воды, соответствующие среднему CR, рассчитанному для этой глубины. Для каждой глубины следует оценивать как минимум пять различных содержаний влаги в почве. Хотя некоторые калибровочные кривые могут быть аналогичными, следует проводить отдельную калибровку для каждой глубины. Срок службы большинства зондов составляет более 10 лет.

11.3.1.2 Ослабление гамма-излучения

Если нейтронный метод измеряет объемное содержание воды в большой сфере, то при использовании метода абсорбции гамма-излучения сканируется тонкий слой. В настоящее время прибор двух-зондового гамма-каротажа используется в лабораторных условиях, поскольку для использования в полевых условиях стали пригодными диэлектрические методы. Другой причиной этого является то, что гамма-лучи представляют собой большую опасность при работе с ними по сравнению с устройствами на основе рассеяния нейтронов, а также тот факт, что оперативные расходы на приборы гамма-излучения являются относительно высокими.

Изменения в ослаблении гамма-излучения для заданного массового коэффициента поглощения могут быть связаны с изменениями общей плотности почвы. Поскольку поглощение гамма-излучения обусловлено массой, то невозможно определить содержание воды, пока неизвестно ослабление гамма-излучения, вызванное плотностью сухой почвы в данном месте и пока она остается

неизменной при изменении содержания влаги. В этой связи непростой задачей является точное определение содержания влаги в почве на основе различия между общими значениями ослабления и значениями ослабления в сухой почве.

По сравнению с методом рассеяния нейтронов затухание гамма-излучения обладает преимуществом, позволяющим проведение точных измерений на глубине в несколько сантиметров ниже раздела между воздухом и поверхностью почвы. Хотя данный метод характеризуется высокой степенью разрешения, малый объем оцениваемой почвы приведет к большему отражению в результатах значительной пространственной изменчивости, вызванной неоднородностью почвы (Gardner и Calissendorff, 1967).

11.3.2 Диэлектрические постоянные системы почва – вода

При помещении какого-либо вещества в электрическое поле конденсатора или волновода его воздействие на электрические силы в этом поле выражаются в виде соотношения между силами в данном веществе и теми силами, которые существовали бы в вакууме. Это отношение, именуемое диэлектрической проницаемостью или «диэлектрической постоянной», применительно к жидкой воде почти в 20 раз превышает соответствующее соотношение для усредненной сухой почвы, поскольку молекулы воды являются постоянными диполями. Диэлектрические свойства льда и воды, рассматриваемые в связи с почвенной матрицей, сопоставимы с соответствующими характеристиками сухой почвы. Благодаря этому объемное содержание свободной почвенной влаги может определяться по диэлектрическим характеристикам влажной почвы посредством надежных, быстрых и недеструктивных методов измерения без потенциальных опасностей, связанных с радиоактивными устройствами. Кроме того, подобные диэлектрические методы могут быть полностью автоматизированы для получения данных. В настоящее время коммерчески доступными и широко используемыми являются два метода для оценки диэлектрических характеристик почвенной влаги, а именно динамическая рефлектометрия и частотное измерение.

11.3.2.1 Динамическая рефлектометрия

Динамическая рефлектометрия – это метод, позволяющий определять диэлектрическую постоянную путем мониторинга прохождения электромагнитного импульса, который запускается вдоль волновода, образуемого двумя погруженными в почву параллельными стержнями. Этот импульс отражается в конце волновода, и скорость его распространения, которая является обратно пропорциональной квадратному корню из диэлектрической постоянной, может точно измеряться существующими электронными приборами.

Наиболее широко используемое соотношение между диэлектрическими свойствами почвы и содержанием влаги в почве было представлено в компактной форме на основе экспериментальных данных авторами Topp, Davis и Annan (1980) в виде следующей формулы:

$$\theta_v = -0.053 + 0.029\,\varepsilon - 5.5 \cdot 10^{-4}\,\varepsilon^2 + 4.3 \cdot 10^{-6}\,\varepsilon^3 \quad (11.8)$$

где ε – диэлектрическая постоянная системы почва – вода. Эта эмпирическая зависимость доказала свою применимость для многих видов почвы и в целом не зависит от текстуры почвы и содержания в ней гравия (Drungil, Abt и Gish, 1989). В то же время калибровка применительно к конкретному виду почвы является желательной для почв с низкой плотностью или с высоким содержанием органических веществ. Для сложных почвенных смесей в качестве полезного зарекомендовало себя уравнение Де Лоора (De Loor) (Dirksen и Dasberg, 1993).

Обычно расстояние между параллельными зондами составляет 5 см, а их длина колеблется от 10 до 50 см; стержни зонда могут быть изготовлены из любого металла. Объем образца представляет собой главным образом цилиндр с радиусом в несколько сантиметров вокруг параллельных зондов (Knight, 1992). Длина коаксиального кабеля от зонда до прибора для обработки сигнала не должна превышать 30 м. Характеристики почвенной влаги могут быть получены при помощи погруженного в почву комплекта зондов, при этом каждый из них размещен горизонтально на разной глубине и подсоединен к полевому регистратору данных при помощи мультиплексора.

11.3.2.2 Измерение частотного диапазона

В то время как динамическая рефлектометрия использует микроволновый поддиапазон гигагерцового диапазона, сенсоры на одночастотном методе измеряют диэлектрическую постоянную на единственной частоте мегагерцового диапазона. При измерениях с помощью микроволнового диэлектрического зонда используются открытый коаксиальный кабель и один рефлектометр, установленный на конце зонда для измерения амплитуды и фазы на конкретной частоте. Результаты измерений в почве сравниваются с результатами измерений в воздухе и обычно калибруются с помощью диэлектрических блоков и/или жидкостей с

известными диэлектрическими свойствами. Одним из преимуществ использования жидкостей для калибровки является идеальный электрический контакт между наконечником зонда и данным материалом (Jackson, 1990).

Поскольку используется один наконечник зонда малого размера, оценивается только небольшой объем почвы и поэтому исключительно важное значение имеет контакт с почвой. В связи с этим такой метод прекрасно подходит для лабораторных измерений или измерений в точке, но подвержен, вероятно, погрешностям, обусловленным пространственной изменчивостью измеряемой величины, если он используется в полевых условиях (Dirksen, 1999).

11.4 ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛА ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ

Основные приборы, позволяющие измерять матричный потенциал, являются относительно недорогими и надежными, для того чтобы использоваться в программах мониторинга полевого масштаба. Однако каждый прибор имеет ограниченный доступный диапазон потенциала влажности. Тензиометры хорошо работают только во влажной почве, в то время как блоки электрического сопротивления лучше действуют в умеренно сухой почве.

11.4.1 Тензиометры

Наиболее широко используемым и наименее дорогостоящим устройством для измерения потенциала почвенной влаги является тензиометр. Тензиометры являются простыми приборами, как правило состоящими из пористой керамической чашки и герметической пластмассовой цилиндрической трубы, соединяющей пористую чашку с определенным регистрирующим давление устройством в верхней части цилиндра. Они измеряют матричный потенциал, поскольку растворенные вещества могут свободно проходить через пористую чашку.

При функционировании тензиометра устанавливается условие его квазиравновесия с системой почва – вода. Пористая керамическая чашка служит в качестве мембраны, через которую протекает вода, и поэтому для правильного функционирования чашка всегда должна оставаться насыщенной. Следовательно, все поры керамической чашки и цилиндрической трубы первоначально заполняются водой, из которой удален воздух. Помещенный в почву тензиометр будет подвергаться воздействию отрицательных потенциалов почва – вода, вызывая движение воды из тензиометра в окружающую его почвенную матрицу. Движение воды из тензиометра создаст отрицательный потенциал или всасывание в цилиндре тензиометра, который будет фиксироваться регистрирующим устройством. Для целей регистрации подходит простая U-образная трубка, наполненная водой или ртутью, вакуумный манометр Бурдона или преобразователь давления (Marthaler и другие, 1983).

Если потенциал почвенной влаги увеличивается, то вода перемещается из почвы обратно в тензиометр, результатом чего является уменьшение регистрируемого отрицательного потенциала почвенной влаги. Этот обмен водой между почвой и тензиометром, а также подверженность тензиометра отрицательным потенциалам приведет к тому, что растворенные газы освобождаются из раствора, создавая воздушные пузырьки. Образование воздушных пузырьков изменит показатели давления в цилиндре тензиометра и приведет к ошибочным показаниям. Другое ограничение заключается в том, что тензиометр имеет практический рабочий предел $\psi \approx -85$ кПа. При давлении за пределами минус 100 кПа (≈ -1 атм.) вода будет кипеть при температуре окружающей среды, образуя пузырьки водяного пара, которые нарушают вакуум внутри цилиндра тензиометра. Соответственно, из цилиндров необходимо время от времени удалять воздух при помощи насоса с ручным приводом, а затем вновь наполнять их водой.

В условиях засухи существенное количество воды может перемещаться из тензиометра в почву. Таким образом, наличие тензиометров может изменить то самое состояние, которое они призваны измерять. Дополнительным подтверждением этого процесса является то, что извлеченные из почвы тензиометры часто содержали вблизи керамических чашек большое число собранных корней. Как правило, в тех случаях когда тензиометры действуют в качестве «ирригатора», через керамические чашки теряется так много воды, что становится невозможным поддерживать вакуум в цилиндре, и тензиометр перестанет работать.

Перед установкой, но после того как тензиометр был наполнен водой и была произведена дегазация, керамическая чашка должна оставаться влажной. Если керамическую чашку обернуть во влажную ткань и поместить в контейнер с водой, то она будет оставаться влажной во время перевозки прибора из лаборатории в поле. В поле готовится скважина соответствующего размера и глубины. Скважина должна быть достаточно большой, чтобы плотно прилегать ко всем сторонам цилиндра, и достаточно глубокой, для того чтобы тензиометр достаточно выступал над поверхностью почвы для удаления

воздуха и обеспечения повторного наполнения. Поскольку керамическая чашка должна оставаться в контакте с почвой, в случае каменистой почвы полезным может оказаться подготовка жидкого раствора из выкопанной на площадке земли и его заливка в скважину до помещения в нее тензиометра. Следует также соблюдать осторожность и обеспечить, чтобы скважина была должным образом засыпана, исключив таким образом любое уменьшение давления, которое может привести к заполнению водой пространства вокруг тензиометра. Эта предосторожность сведет к минимуму любое движение воды вниз по стенкам цилиндра, которое привело бы к созданию нерепрезентативных условий в системе почва – вода.

Воздействию окружающей среды подвержена лишь незначительная часть тензиометра, однако попадание на нее солнечной радиации может вызвать тепловое расширение верхнего конца цилиндра тензиометра. Аналогичным образом, наличие градиентов температуры между поверхностью почвы и керамической чашкой может привести к тепловому расширению или сжатию нижнего конца цилиндра. Для сведения к минимуму риска того, что температура вызовет ложные показания потенциала влажности, цилиндр тензиометра следует помещать в тени и изготовлять его из непроводящих материалов, а также снимать показания ежедневно в одно и то же время, предпочтительно рано утром.

Новой разработкой является осмотический тензиометр, в котором трубка измерителя заполняется полимерным раствором для лучшего функционирования в сухой почве. Дополнительную информацию о тензиометрах см. в работах Dirksen (1999) и Mullins (2001).

11.4.2 Блоки электрического сопротивления

Блоки электрического сопротивления, несмотря на их нечувствительность к потенциалам влажности почвы в определенном диапазоне влажности, являются прекрасным дополнением тензиометров. Они состоят из электродов, заключенных в определенный пористый материал, который в течение порядка двух дней достигнет состояния квазиравновесия с почвой. В качестве материалов для изготовления блоков обычно используются нейлоновая ткань, стекловолокно и гипс с рабочим диапазоном порядка минус 50 кПа (для нейлона) или минус 100 кПа (для гипса) и до минус 1500 кПа. Типичные размеры блока составляют 4 см × 4 см × 1 см. Срок службы гипсовых блоков равен нескольким годам, однако уменьшается в почве с высокой влажностью или соленостью (Perrier и Marsh, 1958).

При помощи этого метода определяется потенциал влажности в качестве функции электрического сопротивления, которая измеряется мостом переменного тока (обычно ≈ 1000 Гц), поскольку постоянный ток вызывает эффекты поляризации. В то же время сопротивление уменьшается в случае засоленной почвы, давая при этом ложные показания о завышенной влажности почвы. Гипсовые блоки менее чувствительны к воздействию солености почвы, поскольку электроды постоянно находятся под воздействием насыщенного раствора сульфата кальция. В показания гипсовых блоков необходимо вносить поправки на температуру (Aggelides и Londra, 1998).

Благодаря тому, что блоки электрического сопротивления не выдаются над поверхностью земли, они прекрасно подходят для полустационарных сельскохозяйственных сетей для измерения характеристик потенциала влаги, в том случае если их установка осуществляется тщательным и систематическим образом (ВМО, 2001). При установке блоков электрического сопротивления лучше всего вырыть небольшую траншею для подводящих проводов, прежде чем готовить скважину для блоков, с тем чтобы свести к минимуму движение воды вдоль проводов к блокам. Возможной полевой проблемой является то, что в результате рассыхания и разбухания почвы может быть нарушен контакт с блоками. С другой стороны, блоки электрического сопротивления не затрагивают расположение корней растений.

Блоки электрического сопротивления относительно недороги, однако они нуждаются в индивидуальной калибровке. Это обычно осуществляется перед установкой в поле путем насыщения блоков дистиллированной водой и последующего их помещения под пресс с заранее заданным давлением (Wellings, Bell и Raynor, 1985), при этом используются как минимум пять различных значений давления. К сожалению, сопротивление меньше на кривой высыхания почвы по сравнению с кривой ее увлажнения, в результате чего при измерении в поле появляются ошибки, связанные с явлением гистерезиса, т.к. блоки сопротивления медленно достигают равновесия с меняющейся влажностью почвы (Tanner и Hanks, 1952). Поскольку кривые калибровки блоков сопротивления со временем изменяются, то блоки необходимо калибровать до установки, а затем регулярно проверять либо в лаборатории, либо в поле.

11.4.3 Психрометры

Психрометры используются в лабораторных исследованиях образцов почвы в качестве эталона для других методов (Mullins, 2001), однако имеется также модель для работы в полевых условиях, именуемая

психрометром Спаннера (Rawlins и Campbell, 1986). Психрометр представляет собой миниатюрную термопару, помещенную внутри небольшой камеры с пористой стенкой. Термопара охлаждается благодаря эффекту Пельтье, при этом на спае термопары конденсируется влага. При испарении влаги со спая его температура уменьшается и возникает ток, который измеряется амперметром. Эти измерения быстро реагируют на изменения потенциала почвенной влаги, но весьма чувствительны к температуре и солености (Merrill и Rawlins, 1972).

Наиболее низкий потенциал влаги, обычно связанный с активным забором воды растениями, соответствует относительной влажности от 98 до 100 %. Это означает, что для точного измерения потенциала влажности почвы в пределах 10 кПа температура должна будет контролироваться с точностью более 0,001 К. Отсюда следует, что полевые психрометры лучше всего использовать для измерения низких матричных потенциалов, составляющих менее минус 300 кПа. Кроме того, компоненты прибора отличаются по своим характеристикам теплоемкости, и поэтому суточные колебания температуры почвы могут привести к образованию градиентов температуры в психрометре (Brunini и Thurtell, 1982). В этой связи психрометры Спаннера не следует использовать на глубинах менее 0,3 м, а показания следует снимать ежедневно в одной и то же время, предпочтительно ранним утром. Таким образом, почвенный психрометр представляет собой трудный и требовательный метод даже для специалистов.

11.5 ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ

Ранее в этой главе упоминалось о том, что единственное место для проведения наблюдений не может обеспечить получение абсолютной информации о влажности почвы в регионе, а лишь относительные сведения о ее изменении, поскольку почвы часто бывают весьма неоднородными. В то же время определение почвенной влаги в верхнем слое почвы может производиться в настоящее время посредством измерений при помощи находящихся в космосе приборов с использованием методов дистанционного зондирования. Это позволяет осуществлять мезомасштабную интерполяцию для оценки скорости суммарного испарения, оценки стресса растений и т.д., а также способствует включению информации о балансе влажности в модели погоды (Jackson и Schmugge, 1989; Saha, 1995). В связи с этим полезность определения почвенной влаги на метеорологических станциях значительно возросла, поскольку спутниковые измерения нуждаются в «земной правде» для обеспечения точности путем сопоставления результатов дистанционных измерений с традиционными. Кроме того, измерения на станции необходимы для обеспечения информацией о состоянии влаги в более глубоких почвенных слоях, которую невозможно наблюдать со спутников или воздушных судов. Здесь кратко изложены некоторые принципы бортовых измерений почвенной влаги; дополнительные подробности см. в части II, глава 8.

Дистанционное зондирование становится возможным благодаря двум необычным характеристикам влажности в почве. Во-первых, как уже обсуждалось выше в контексте временной рефлектометрии, диэлектрическая постоянная воды на порядок величины превышает диэлектрическую постоянную сухих почв в микроволновом диапазоне. При дистанционном зондировании эта характеристика может быть использована либо пассивно, либо активно (Schmugge, Jackson и McKim, 1980). Пассивное зондирование анализирует естественные микроволновые излучения с поверхности Земли, а активное зондирование основано на оценке отраженного сигнала, получаемого от посланного излучения со спутника.

Микроволновый радиометр дает отклик при излучательной способности от 0,95 до 0,6 или ниже, и этот диапазон используется при пассивных микроволновых измерениях. При активных измерениях при помощи спутникового радиолокатора наблюдается увеличение отраженного сигнала примерно на 10 дБ при переходе состояния почвы от сухого к влажному. Микроволновое излучение характеризуется яркостной температурой T_b и пропорционально излучающей способности β и температуре поверхности почвы – T_{soil}, или:

$$T_b = \beta\, T_{soil} \qquad (11.9)$$

где T_{soil} измеряется в кельвинах, а β зависит от текстуры почвы, шероховатости поверхности и растительного покрова. Любой растительный полог будет влиять на почвенный компонент.

Объемное содержание влаги связано с общим активным обратным рассеянием S_t согласно формуле:

$$\theta_v = L\,(S_t - S_v)\,(RA)^{-1} \qquad (11.10)$$

где L – коэффициент затухания в растительном покрове; S_v – обратное рассеяние от растительного покрова; R – шероховатость почвенной поверхности; и A – чувствительность к почвенной влаге.

Вследствие этого реакция микроволнового сигнала на содержание влаги в почве может быть выражена

в виде эмпирической зависимости. Глубина анализируемого слоя почвы составляет порядка 5 – 10 см. Пассивный метод является надежным, однако его пиксельное разрешение ограничено не менее чем 10 км, поскольку спутниковые антенны имеют ограниченный размер. Пиксельное разрешение активного спутникового радиолокатора в 100 раз выше, однако активное зондирование является весьма чувствительным к шероховатости поверхности и требует калибровки по данным о поверхности.

Второй характеристикой почвенной влаги, измеряемой путем дистанционного зондирования, является ее относительно большая теплоемкость и теплопроводность. Поэтому большинство почв имеет большую тепловую инерцию. Соответственно, если этому не мешает облачность, для оценки влажности почвы можно использовать результаты дистанционного зондирования температуры поверхности почвы в течение суток (Idso и другие, 1975; Van de Griend, Camillo и Gurney, 1985).

11.6 ВЫБОР МЕСТА И РАЗМЕР ПРОБЫ

Стандартные наблюдения за влажностью почвы на основных станциях следует проводить на разных глубинах от 10 см до 1 м, а также еще ниже, если имеет место значительная глубинная инфильтрация. Наблюдения следует проводить с частотой приблизительно 1 раз в неделю. Косвенные измерения не обязательно проводить на метеорологической площадке, а скорее вблизи нее и ниже достаточно горизонтальной естественной поверхности, которая является типичной для природной окружающей среды.

Репрезентативность любой точки наблюдения за влажностью почвы является ограниченной ввиду высокой вероятности существования разновидностей почвенной структуры как в горизонтальном, так и вертикальном направлениях (пористость, плотность, химический состав). Горизонтальные колебания потенциала почвенной влаги как правило относительно меньше, чем подобные колебания содержания влаги в почве. Определения гравиметрического содержания влаги являются достоверными только в точке измерения, что вызывает необходимость взятия большого числа проб для адекватного описания состояния влажности почвы в данном месте. При расчете числа проб n, необходимых для оценки содержания влаги в почве при соблюдаемом уровне точности (L), размер пробы можно определить по формуле:

$$n = 4\ (\sigma^2/L^2) \qquad (11.11)$$

где σ^2 – это дисперсия между пробами, полученная на основе предварительного эксперимента по взятию проб. Например, предположим, что в результате предварительного взятия проб было получено (типичное) значение σ^2, равное 25 %, а необходимый уровень точности находится в пределах 3 %. В таком случае понадобится 12 проб из этого места (если можно допустить, что содержание влаги в почве равномерно распределяется по данному месту).

При региональном подходе район делится на несколько слоев на основе однородности соответствующих параметров в пределах слоев, например, схожести гидрологических характеристик, текстуры почвы, типа почвы, растительного покрова, уклона и т.п. Пробы с каждого участка должны браться независимым образом, а данные обрабатываться с учетом веса (вклада) результата каждого слоя в соответствии с его относительной площадью. Самым важным фактором, определяющим распределение почвенной влаги в водоразделах с небольшим уклоном, является топографический, который часто бывает достаточным критерием для подразделения на пространственные единицы с однородными характеристиками. Аналогичным образом, на наклонном пастбище потребуется более интенсивное взятие проб, чем на плоском сельхозугодье. Однако наличие растительности обычно уменьшает различия в почвенной влажности, обусловленные топографическими характеристиками.

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Aggelides, S.M. and P.A. Londra, 1998: Comparison of empirical equations for temperature correction of gypsum sensors. *Agronomy Journal*, 90, pp. 441–443.

Brunini, O. and G.W. Thurtell, 1982: An improved thermocouple hygrometer for in situ measurements of soil water potential. *Soil Science Society of America Journal*, 46, pp. 900–904.

Campbell, D.J. and J.K. Henshall, 2001: Bulk density. In: K.A. Smith and C.E. Mullins, *Soil and Environmental Analysis: Physical Methods*, Marcel Dekker, New York, pp. 315–348.

Deardorff, J.W., 1978: Efficient prediction of ground surface temperature and moisture, with inclusion of a layer of vegetation. *Journal of Geophysical Research*, 83, pp. 1889–1904.

Dirksen, C., 1999: *Soil Physics Measurements.* Catena Verlag, Reiskirchen, Germany, 154 pp.

Dirksen, C. and S. Dasberg, 1993: Improved calibration of time domain reflectometry soil water content measurements. *Soil Science Society of America Journal*, 57, pp. 660–667.

Drungil, C.E.C., K. Abt and T.J. Gish, 1989: Soil moisture determination in gravelly soils with time domain reflectometry. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineering, 32,* pp. 177–180.

Gardner, W.H. and C. Calissendorff, 1967: Gamma-ray and neutron attenuation measurement of soil bulk density and water content. *Proceedings of the Symposium on the Use of Isotope and Raditation Techniques in Soil Physics and Irrigation Studies* (Istanbul, 12–16 June 1967). International Atomic Energy Agency, Vienna, pp. 101–112.

Gardner, C.M.K., D.A. Robinson, K. Blyth and J.D. Cooper, 2001: Soil water content. In: K.A. Smith, and C.E. Mullins, *Soil and Environmental Analysis: Physical Methods*, Marcel Dekker, New York, pp. 1–64.

Gee, G.W. and M.E. Dodson, 1981: Soil water content by microwave drying: A routine procedure. *Soil Science Society of America Journal*, 45, pp. 1234–1237.

Greacen, E.L., 1981: *Soil Water Assessment by the Neutron Method.* CSIRO, Australia, 140 pp.

Idso, S.B., *R.D. Jackson, R.J. Reginato and T.J. Schmugge,* 1975: The utility of surface temperature measurements for the remote sensing of sun for soil water status. *Journal of Geophysical Research,* 80, pp. 3044–3049.

Jackson, T.J., 1990: Laboratory evaluation of a field-portable dielectric/soil moisture probe. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,* 28, pp. 241–245.

Jackson, T.J. and T.J. Schmugge, 1989: Passive microwave remote sensing system for soil moisture: Some supporting research. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,* 27, pp. 225–235.

Klute, A. (ed.), 1986: *Methods of Soil Analysis, Part 1: Physical and Mineralogical Methods.* American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, United States, 1188 pp.

Knight, J.H., 1992: Sensitivity of time domain reflectometry measurements to lateral variations in soil water content. *Water Resources Research,* 28, pp. 2345–2352.

Marthaler, H.P., *W. Vogelsanger, F. Richard and J.P. Wierenga,* 1983: A pressure transducer for field tensiometers. *Soil Science Society of America Journal,* 47, pp. 624–627.

Merrill, S.D. and S.L. Rawlins, 1972: Field measurement of soil water potential with thermocouple psychrometers. *Soil Science,* 113, pp. 102–109.

Mullins, C.E., 2001: Matric potential. In: K.A. Smith, and C.E. Mullins, *Soil and Environmental Analysis: Physical Methods.* Marcel Dekker, New York, pp. 65–93.

Perrier, E.R. and A.W. Marsh, 1958: Performance characteristics of various electrical resistance units and gypsum materials. *Soil Science,* 86, pp. 140–147.

Rawlins, S.L. and G.S. Campbell, 1986: Water potential: Thermocouple psychrometry. In: A. Klute, (ed.), *Methods of Soil Analysis – Part 1: Physical and Mineralogical Methods.* American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, United States, pp. 597–618.

Saha, S.K., 1995: Assessment of regional soil moisture conditions by coupling satellite sensor data with a soil-plant system heat and moisture balance model. *International Journal of Remote Sensing,* 16, pp. 973–980.

Schmugge, T.J., T.J. Jackson, and H.L. McKim, 1980: Survey of methods for soil moisture determination. *Water Resources Research,* 16, pp. 961–979.

Tanner, C.B. and R.J. Hanks, 1952: Moisture hysteresis in gypsum moisture blocks. *Soil Science Society of America Proceedings,* 16, pp. 48–51.

Topp, G.C., J.L. Davis and A.P. Annan, 1980: Electromagnetic determination of soil water content: Measurement in coaxial transmission lines. *Water Resources Research,* 16, pp. 574–582.

Van de Griend, A.A., P.J. Camillo and R.J. Gurney, 1985: Discrimination of soil physical parameters, thermal inertia and soil moisture from diurnal surface temperature fluctuations. *Water Resources Research,* 21, pp. 997–1009.

Visvalingam, M. and J.D. Tandy, 1972: The neutron method for measuring soil moisture content: A review. *European Journal of Soil Science,* 23, pp. 499–511.

Wellings, S.R., J.P. Bell and R.J. Raynor, 1985: *The Use of Gypsum Resistance Blocks for Measuring Soil Water Potential in the Field.* Report No. 92, Institute of Hydrology, Wallingford, United Kingdom.

World Meteorological Organization, 1968: *Practical Soil Moisture Problems in Agriculture.* Technical Note No. 97, WMO-No. 235.TP.128, Geneva.

World Meteorological Organization, 1989: *Land Management in Arid and Semi-arid Areas.* Technical Note No. 186, WMO-No. 662, Geneva.

World Meteorological Organization, 2001: *Lecture Notes for Training Agricultural Meteorological* Personnel (J. Wieringa and J. Lomas). Second edition, WMO-No. 551, Geneva.

ГЛАВА 12

АЭРОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ, ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ

12.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

12.1.1 Определения

Приведенные ниже определения из публикаций ВМО (1992; 2003*a*) относятся к аэрологическим измерениям с использованием радиозонда.

Радиозонд: прибор, поднимаемый на газонаполненной оболочке в атмосферу и снабженный устройствами для измерения одного или нескольких метеорологических параметров (давления, температуры, влажности и др.), а также радиопередатчиком для передачи информации о результатах измерений на станцию наблюдения.

Радиозондовое наблюдение: наблюдение с помощью радиозонда за метеорологическими параметрами на высотах, как правило, за атмосферным давлением, температурой и влажностью.

ПРИМЕЧАНИЕ: Радиозонд может прикрепляться к газонаполненной оболочке либо может сбрасываться (сбрасываемый зонд) с воздушного судна или ракеты.

Станция термодинамического радиозондирования: станция, на которой с помощью электронных средств проводятся наблюдения за атмосферным давлением, температурой и влажностью на высотах.

Аэрологическое наблюдение: метеорологическое наблюдение, производимое в свободной атмосфере прямыми или косвенными методами измерения.

Аэрологическая станция, аэрологическая синоптическая станция, станция температурно-ветрового радиозондирования: станция на поверхности земли, с которой проводятся аэрологические наблюдения.

Зондирование: определение одного или нескольких метеорологических параметров на высотах с помощью приборов, поднимаемых газонаполненной оболочкой, самолетом, змеем, планером, ракетой и т. п.

В настоящей главе рассматриваются в основном радиозондовые системы. Измерения, осуществляемые с использованием специальных платформ, специализированного оборудования или косвенным образом с применением методов дистанционного зондирования, рассматриваются в различных главах части II настоящего Руководства. Радиозондовые системы обычно используются для измерения давления, температуры и относительной влажности. В большинстве оперативных пунктов радиозондовые системы используются также для определения ветра на высотах (см. часть I, главу 13). Кроме того, на некоторых радиозондах установлены системы датчиков для определения таких характеристик атмосферы, как содержание озона или радиоактивность. В настоящей главе эти дополнительные измерения подробно не рассматриваются.

12.1.2 Единицы, используемые при аэрологических измерениях

Единицами измерения метеорологических параметров при радиозондовых наблюдениях являются гектопаскаль для давления, градус Цельсия для температуры и процент для относительной влажности. Данные об относительной влажности сообщаются по отношению к давлению насыщенного пара над поверхностью воды даже при температурах ниже 0 °C.

Единицей геопотенциальной высоты, используемой при аэрологических наблюдениях, является стандартный геопотенциальный метр, определяемый как 0,980 665 динамического метра. В тропосфере значение геопотенциальной высоты приблизительно равно геометрической высоте, выраженной в метрах.

При расчетах данных, полученных с помощью радиозондов, следует использовать значения физических функций и постоянных, принятые ВМО (1988).

12.1.3 Метеорологические требования

12.1.3.1 Радиозондовые данные для метеорологического обеспечения

Аэрологические измерения температуры и относительной влажности – два вида основных измерений, данные которых используются при инициализации анализов моделей численных прогнозов погоды для оперативного прогнозирования погоды. Радиозонды обеспечивают большую часть измерений температуры и относительной влажности в точках над сушей, в то время как радиозонды, запускаемые с отдаленных островов или морских судов, обеспечивают ограниченный охват такими данными над океанами. Измерения температуры с разрешением по вертикали, аналогичным разрешению при радиозондовых

измерениях, могут проводиться с самолета либо во время набора высоты и снижения, либо при полете на крейсерских эшелонах. Самолетные наблюдения используются для дополнения радиозондовых наблюдений, особенно над морем. Спутниковые наблюдения за распределением температуры и водяного пара обеспечивают более низкое вертикальное разрешение, чем измерения с помощью радиозондов или воздушных судов. Спутниковые наблюдения особенно важны для полей анализа численного прогноза погоды над океанами и в других районах земного шара, где данных радиозондовых и самолетных наблюдений недостаточно или где они отсутствуют совсем.

Точные измерения вертикальной структуры полей температуры и водяного пара в тропосфере чрезвычайно важны для всех видов прогнозирования, особенно для регионального и местного прогнозирования. Измерения позволяют построить вертикальный разрез слоев облаков или тумана. Кроме того, вертикальная структура полей температуры и водяного пара обусловливает устойчивость атмосферы и, следовательно, количество и формы облаков, которые должны прогнозироваться. Радиозондовые измерения вертикальной структуры могут, как правило, производиться с точностью, достаточной для удовлетворения большинства потребностей пользователей. Однако наличие отрицательных систематических погрешностей в данных измерений относительной влажности в облаках в условиях высокой влажности создает проблемы при анализе численного прогноза погоды в случаях, когда такие погрешности не компенсируются.

Данные измерений вертикальной структуры полей температуры и относительной влажности с высоким разрешением имеют большое значение для исследований загрязнения окружающей среды (например, для определения толщины пограничного слоя атмосферы). Высокое разрешение при измерениях вертикальной структуры необходимо также для прогнозирования влияния рефракции атмосферы на распространение электромагнитного излучения или звуковых волн.

Для гражданской авиации, артиллерии и других применений в области баллистики, таких как запуск космических аппаратов, необходимы оперативные данные измерений плотности воздуха в зависимости от давления (рассчитанных на основе данных радиозондовых измерений температуры и относительной влажности).

Радиозондовые наблюдения чрезвычайно важны для исследований изменения климата на высотах. При этом важно надлежащим образом вести регистрацию тех систем, которые используются для измерений, а также любых изменений в оперативных или корректирующих процедурах использования оборудования. В этом контексте было сочтено необходимым установить все те изменения в радиозондовых приборах и практических процедурах, которые имели место с момента начала использования радиозондов на регулярной основе (см., например, WMO, 1993*a*). Для исследований изменения климата, основанных на радиозондовых измерениях, требуется чрезвычайно высокая стабильность систематических погрешностей в данных радиозондовых измерений. Однако погрешности в более ранних радиозондовых измерениях некоторых метеорологических параметров, в частности относительной влажности и давления, были слишком высоки для того, чтобы обеспечить достоверную справочную базу на основе многолетних наблюдений на всех уровнях, с которых поступали данные с радиозондов. В связи с этим понадобились усовершенствования и изменения в конструкциях радиозондов. Кроме того, учитывая ограниченность средств, направляемых на метеорологические наблюдения, и желание продолжать широкомасштабное использование радиозондов, необходимо, чтобы расходные материалы для радиозондов оставались дешевыми. Соответственно, пользователям следует пойти на определенный компромисс в отношении точности систем измерений с учетом того, что изготовители радиозондов производят системы, которые должны работать в чрезвычайно широком спектре метеорологических условий:

давление от 1 050 до 5 гПа,
температура от 50 до –90 °C
относительная влажность от 100 до 1 %.

При этом системы должны постоянно и надежно функционировать, несмотря на сильные дожди, грозы и тяжелые условия обледенения.

12.1.3.2 Взаимосвязь между спутниковыми и радиозондовыми аэрологическими измерениями

Спутниковые системы надирных (в самой нижней точке горизонта) наблюдений не дают представления о вертикальной структуре с той же точностью или степенью доверия, как системы, установленные на радиозондах или воздушных судах. Современные спутниковые системы зондирования температуры и водяного пара обеспечивают наблюдение либо за восходящими потоками излучения в инфракрасной области от эмиссии двуокиси углерода или водяного пара, либо, в качестве альтернативы, – эмиссии кислорода или водяного пара в микроволновом диапазоне (см. часть II, главу 8). Излучение, за

которым ведется наблюдение со спутника, представляет собой интегрированное излучение в атмосфере на разных уровнях. Диапазон уровней определяется распределением излучающих газов по вертикали и поглощением со стороны атмосферы на частотах спутникового канала. Данные о большинстве излучений, полученные по спутниковому каналу измерения температуры, приблизительно соответствуют средней температуре слоя, толщина которого составляет, по меньшей мере, 10 км. Распределение по высоте (весовая функция) наблюдаемого излучения в канале для измерения температуры изменяется в определенной степени в зависимости от географического местоположения. Это происходит потому, что способность атмосферы переносить излучение незначительно зависит от температуры. Концентрация излучающих газов может в незначительной степени колебаться в зависимости от географического местоположения и наличия облачности; на обмен радиационным теплом могут также оказывать влияние аэрозоли и вулканическая пыль. Таким образом, основные спутниковые наблюдения за температурой путем зондирования обеспечивают хорошее горизонтальное разрешение и пространственный охват по всему земному шару для сравнительно толстых слоев по вертикали, однако точное распределение наблюдаемого атмосферного излучения по вертикали в какой-либо заданной точке определить довольно трудно.

Большая часть данных об излучении, получаемых при надирных наблюдениях по спутниковым каналам для измерения содержания водяного пара в тропосфере, относится к слоям атмосферы толщиной примерно от 4 до 5 км. Давление в атмосферных слоях, за излучением которых наблюдают при помощи канала для измерения водяного пара, колеблется в зависимости от географического местоположения в гораздо большей степени, чем в случае каналов для измерения температуры. Это связано с тем, что толщина слоя и давление в середине слоя, за которым ведется наблюдение, в значительной степени зависят от распределения водяного пара по вертикали. Например, слои, за которыми ведется наблюдение с помощью определенного канала для измерения водяного пара, будут располагаться ближе к земной поверхности в случае, когда верхняя тропосфера очень сухая. Показатели излучения, за которыми ведется наблюдение при помощи канала для измерения водяного пара, зависят от температуры водяного пара. Поэтому рассчитать распределение водяного пара по вертикали можно лишь в том случае, если имеются приемлемые данные о вертикальной структуре поля температуры.

Спутниковые системы лимбовых наблюдений могут обеспечивать измерения структуры атмосферы с более высоким вертикальным разрешением по сравнению со спутниковыми системами надирных наблюдений; примером системы такого типа является измерение температуры и водяного пара, рассчитанных для случаев исчезновения радиосигнала глобальной системы позиционирования (GPS). По этой методике вертикальная структура измеряется вдоль горизонтали по крайней мере на удаленность 200 км (Курсински и др., 1997).

Таким образом, методы, разработанные для использования информации, полученной при помощи зондирования со спутников, в моделях численного прогноза погоды, включают в себя информацию, полученную с помощью других систем наблюдения, главным образом радиозондов и воздушных судов. Эта информация может содержаться в первоначальной оценке вертикальной структуры в какой-либо заданной географической точке; эта оценка, в свою очередь, рассчитывается на основе полей прогностической модели или берется из справочников, в которых данные о возможной вертикальной структуре основаны на типичных радиозондовых измерениях в данной географической точке или в зависимости от типа воздушной массы. Кроме того, данные радиозондовых измерений используются в качестве опорных данных для взаимного сравнения данных наблюдений с различных спутников или данных наблюдений под различными углами зрения с определенного спутникового канала. При этом можно провести сравнения напрямую с данными радиозондовых наблюдений, либо косвенным путем, учитывая влияние радиозондовых измерений на вертикальную структуру полей численных прогнозов погоды.

Следовательно, радиозондовые и спутниковые системы зондирования являются взаимодополняющими системами наблюдения и обеспечивают при совместном использовании наиболее надежную глобальную систему наблюдения.

12.1.3.3 Максимальная высота радиозондовых наблюдений

Наблюдения при помощи радиозондов проводятся на регулярной основе для измерений вплоть до высоты около 35 км. Однако большая часть наблюдений по всему земному шару проводится до высоты не более 25 км, что связано с более высокой стоимостью оболочек и газа, необходимых для подъема оборудования на высоты с очень низким давлением. При низком давлении в большинстве радиозондовых систем быстро возрастают погрешности измерения температуры. Поэтому некоторые из имеющихся радиозондовых систем вообще непригодны для проведения наблюдений при низком давлении на больших высотах.

Проблемы, связанные с искажением показаний датчиков во время полета и очень большими величинами постоянной времени (инерции) датчиков при низкой температуре и низком давлении, ограничивают практическую пригодность радиозондовых измерений относительной влажности тропосферой.

12.1.3.4 Требования к точности

В настоящем разделе и далее в обобщенном виде представлены требования к точности радиозондовых наблюдений и проведено сравнение их с характеристиками оперативных радиозондов. В нижеприведенных разделах также подробно рассматриваются точность, надежность и достоверность измерений, а также источники погрешностей измерений.

Практические требования к точности радиозондовых наблюдений приведены в приложении 12.A ВМО (1970) и описывают очень полезный подход к рассмотрению точности и надежности измерений с помощью инструментальных систем, который применяется при создании таких систем. Представление о точности измерений основывается на данных о наблюдавшейся изменчивости атмосферы. Определены следующие два вида предельных значений:

(a) предельные значения точности измерений, за рамками которых не требуется усовершенствования измерений для различных целей;

(b) предельные значения точности измерений, ниже которых полученными данными можно пренебречь при расчетах для различных целей.

Предельные значения точности измерений при работе приборов, рассчитанные в публикации ВМО (1970) для измерений ветра на высотах и для радиозондовых измерений температуры, относительной влажности и геопотенциальной высоты, приведены в таблицах с 1 по 4 в приложении 12.B.

12.1.3.5 Температура: требования и точность измерений

Большинство современных радиозондовых систем позволяют измерять температуру в тропосфере со стандартной погрешностью в пределах от 0,2 до 0,5 К. Такая точность, как правило, лежит в пределах значений, получаемых при коэффициенте три от оптимальных характеристик, предложенных в таблице 2 приложения 12.B. К сожалению, в некоторых сетях станций радиозондирования в тропических регионах все еще можно обнаружить стандартные погрешности, превышающие 1 К. Данные измерений на этих станциях выходят за пределы наиболее низкой предельной точности, указанной в таблице 2 приложения 12.B, и подпадают в категорию данных измерений, которые уже не имеют ценности для решения поставленной задачи.

При давлении в стратосфере, превышающем примерно 30 гПа, точность измерения для большинства современных радиозондов аналогична точности измерений в тропосфере. Таким образом, в этой части стратосферы погрешности радиозондовых измерений примерно в 2 раза превышают установленное предельное значение погрешности при оптимальной работе. При давлении ниже 30 гПа погрешности результатов измерений для устаревших типов радиозондов с понижением давления быстро возрастают и в некоторых случаях приближаются к предельному значению, после чего эти данные перестают быть полезными для решения поставленной задачи. Быстрое возрастание погрешностей измерения температуры с помощью радиозондов при очень низком давлении происходит в результате увеличения погрешностей в измерении температуры, связанных с инфракрасным и солнечным излучением в сочетании с быстрым возрастанием погрешностей в определении высот, на которых измеряется температура.

При очень низком давлении даже относительно небольшие погрешности в радиозондовых измерениях давления приводят к большим погрешностям в значениях высот и, следовательно, в сообщаемых значениях температуры (см. раздел 12.1.3.7).

12.1.3.6 Относительная влажность

В современных радиозондовых измерениях погрешности относительной влажности могут превышать, по меньшей мере, в два или три раза предельное значение погрешности при оптимальной работе приборов в случае высокой относительной влажности, предложенное в таблице 3 приложения 12.B, для тропосферы выше конвективного пограничного слоя. Кроме того, погрешности в радиозондовых измерениях относительной влажности увеличиваются по мере понижения температуры. При использовании некоторых типов датчиков при температуре ниже –40 °C погрешности могут превысить предельное значение, после которого данные измерений уже не имеют ценности в рамках поставленной задачи.

12.1.3.7 Геопотенциальные высоты

Погрешности в значениях геопотенциальной высоты, определяемой с помощью радиозондовых наблюдений, различаются в зависимости от того, указывается ли высота для конкретной изобарической поверхности или для высоты заданной особой точки профиля температуры или относительной влажности, такой как тропопауза.

Погрешность $\varepsilon_z(t_1)$ в значении геопотенциальной высоты в заданный момент времени при полете определяется по следующей формуле:

$$\varepsilon_z\left(t_1\right) = \frac{R}{g}\int_{p_0}^{p_1}[\varepsilon_T(p) - \frac{\delta T}{\delta p}\varepsilon_p(p)]\frac{dp}{p} + \frac{R}{g}\int_{p_1}^{p_1+\varepsilon_p(p_1)} \qquad (12.1)$$

$$[T_v(p) + \varepsilon_T(p) - \frac{\delta T}{\delta p}\varepsilon_p(p)]\frac{dp}{p}$$

Где ρ_0 – давление у поверхности; p_1 – истинное давление в момент времени t_1; $p_1 + \varepsilon_p(p_1)$ – измеренное давление, указываемое датчиком радиозонда в момент времени t_1; $\varepsilon_T(p)$ и $\varepsilon_p(p)$ – погрешности радиозондовых измерений соответственно температуры и давления как функции давления; $T_v(p)$ – виртуальная температура при давлении p; R – газовая постоянная; g – ускорение свободного падения

Для указанной стандартной изобарической поверхности ps давление верхнего предела интегрирования при расчете высоты задано и не подвержено влиянию погрешности данных о давлении, полученных при помощи радиозонда. Следовательно, выражение для погрешности значения геопотенциальной высоты на стандартной изобарической поверхности сокращается и приобретает следующий вид:

$$\varepsilon_z(p_s) = \frac{R}{g}\int_{p_0}^{p_s}[\varepsilon_T(p) - \frac{\delta T}{\delta p}\varepsilon_p(p)]\frac{dp}{p} \qquad (12.2)$$

В таблице 12.1 представлены для типичных атмосферных условий погрешности определения геопотенциальной высоты, которые возникают из-за погрешностей датчиков радиозонда. Из таблицы видно, что значения геопотенциала на заданной изобарической поверхности могут быть измерены достаточно хорошо, что подходит для синоптического и численного анализа изобарических поверхностей. Значительные ошибки, однако, могут возникнуть при определении высоты значимых уровней, таких как тропопауза и другие особые точки, а также для других уровней которые могут быть рассчитаны между стандартными изобарическими уровнями.

Значительные погрешности определения высоты в стратосфере, возникающие в результате погрешностей датчика давления в 2 или 3 гПа, имеют, по всей вероятности, наибольшее значение для оперативных измерений в тропиках, где вертикальные градиенты температуры достаточно велики во всей стратосфере. Содержание озона в стратосфере также имеет четко выраженные градиенты по вертикали, и погрешности определения высоты могут вносить значительные ошибки в сообщения, поступающие с озонозондов, на всех широтах.

Требования к оптимальной точности для высот изобарических поверхностей на синоптической сети, как указано в таблице 4 приложения 12.В, заставляют предъявлять чрезвычайно строгие требования к

ТАБЛИЦА 12.1. Погрешности в определении геопотенциальной высоты (м)

(Типичные погрешности на стандартных и особых уровнях при заданных погрешностях температуры и давления на определенном уровне или вблизи него. Погрешности одинаковы в северных и южных широтах.)

	300 гПа	*100 гПа*	*30 гПа*	*10 гПа*
Temperature error ε_T = 0,25 K, погрешность давления εp = 0 гПа				
Стандартные и значимые уровни	9	17	26	34
Погрешность температуры ε_T =0 K, погрешность давления εp = – 1 гПа				
25° с.ш.				
Стандартный уровень	3	12	–2	–24
Значимый уровень	27	72	211	650
50° с.ш. лето				
Стандартный уровень	3	5	1	–20
Значимый уровень	26	72	223	680
50° с.ш. зима				
Стандартный уровень	3	5	6	–4
Значимый уровеньl	26	70	213	625

точности радиозондовых измерений. Например, можно считать, что наилучшие современные радиозонды работают хорошо, если погрешности определения значений высоты всего лишь в 5 раз больше, чем оптимальные погрешности измерения высоты в тропосфере, и на порядок величины больше, чем оптимальные погрешности в стратосфере.

12.1.4 Методы измерения

В настоящем разделе приводятся общие сведения о методах радиозондовых измерений. Подробно работа приборов и процедуры обсуждаются в других разделах.

12.1.4.1 Ограничивающие факторы при проектировании радиозондов

При проектировании радиозондов необходимо находить определенные компромиссные решения. При измерениях температуры наиболее надежные результаты получают, когда датчики размещены над верхней поверхностью радиозонда и при этом не защищены, однако при таком размещении датчики подвергаются воздействию прямого солнечного излучения. В большинстве современных радиозондов применяется покрытие, позволяющее уменьшить нагревание датчиков температуры солнцем. В программном обеспечении для обработки данных предусмотрены поправки на остаточный разогрев солнцем. Почти для всех датчиков относительной влажности требуется некоторая защита от дождя. В то же время защитный экран или шахта уменьшают вентиляцию датчика и соответственно скорость реагирования всей системы датчиков в целом. Кроме того, защита или шахта становятся источником искажения показаний датчика после прохождения зонда через облака. Однако на практике требование о защите датчиков относительной влажности от дождя или льда является обычно более важным, чем требование о надлежащем воздействии окружающего воздуха. Поэтому для датчиков относительной влажности, как правило, используются защитный экран или шахта. Датчики давления обычно устанавливаются внутри зонда, чтобы свести к минимуму изменения температуры в датчике во время полета и обеспечить оптимальное размещение датчиков температуры и относительной влажности.

К другим важным факторам, которые необходимо учитывать при проектировании радиозондов, можно отнести их надежность, прочность, легкий вес и небольшие размеры. Учитывая доступность современных электронных средств мультиплексирования, важно также обеспечить, чтобы датчики радиозонда производили измерения с высокой скоростью. По мере возможности, замер должен осуществляться приблизительно один раз в секунду, что соответствует замеру, как минимум, примерно через каждые 5 м по вертикали. Поскольку радиозонды обычно используются только один раз или не более чем несколько раз, они должны быть достаточно дешевыми при массовом производстве. Простота и стабильность калибровки являются очень важным показателем, поскольку радиозонды приходится часто хранить в течение продолжительных периодов времени (более года), прежде чем они будут использованы. (Многие из наиболее важных станций Глобальной системы наблюдения за климатом, например в Антарктике, являются такими пунктами, куда радиозонды могут доставляться только раз в год.)

Радиозонд должен передавать устойчивый сигнал на наземный приемник при наклонной дальности по меньшей мере 200 км. Напряжение батареи радиозонда меняется как с ходом времени, так и при изменении температуры. Поэтому радиозонд должен быть сконструирован таким образом, чтобы изменение напряжения батареи не приводило к уменьшению точности измерений или к неприемлемому смещению частоты радиопередачи.

12.1.4.2 Радиочастоты, используемые для передач с радиозондов

Полосы радиочастот, используемых в настоящее время для большинства передач с радиозондов, приведены в таблице 12.2. Эти полосы соответствуют распределению частот для метеорологических нужд, зафиксированному в Регламенте радиосвязи Международного союза электросвязи (МСЭ).

ТАБЛИЦА 12.2. Первичные частоты, используемые радиозондами в радиочастотных полосах для вспомогательных метеорологических служб

Радиочастотный диапазон (МГц)	*Статус*	*Регионы МСЭ*
400,15 – 406	Основной	Все
1 668,4 – 1 700	Основной	Все

ПРИМЕЧАНИЕ: Большинство вторичных радиолокационных систем, производимых и эксплуатируемых в Российской Федерации, действуют в диапазоне радиочастот с центром на 1 780 МГц.

Радиочастота, которая в действительности выбирается для эксплуатации радиозонда в той или иной географической точке, зависит от различных факторов. В тех местах, для которых характерны сильные ветры на высотах, наклонная дальность до радиозондов обычно большая и низкие углы места изменяются часто очень медленно. При таких

обстоятельствах, как правило, выбирается полоса в 400 МГц, поскольку хорошей связи между радиозондом и наземной системой гораздо легче добиться на частоте 400 МГц, чем на частоте 1 680 МГц. Там, где ветры на высотах не столь сильны, выбор частоты в среднем определяется выбором метода, который используется для измерения ветра на высотах (см. часть I, главу 13). Так, при выборе для измерения ветра навигационной системы используется обычно частота 400 МГц, и частота 1 680 МГц должна выбираться для измерения ветра радиотеодолитами или антеннами слежения, используемыми с радиозондовыми системами.

Радиочастоты, указанные в таблице 12.2, выделяются на основе разделения частот с другими службами. В некоторых странах национальные органы, ответственные за радиосвязь, выделяют часть полос радиочастот другим пользователям, и поэтому вся полоса полностью не может использоваться для передач с радиозондов. В других странах, в которых большое число радиозондовых систем образует плотную сеть, разработаны строгие спецификации в отношении смещения радиочастот и ширины полос, на которых должны работать отдельные радиозонды.

Любая организация, планирующая запуск радиозондов, должна удостовериться в том, что для их эксплуатации можно воспользоваться подходящими радиочастотами, а также что они не помешают работе радиозондов национальной метеорологической службы.

В настоящее время существует насущная необходимость в повышении эффективности использования радиочастот, что находит свое отражение в деятельности правительственных учреждений по радиосвязи. Следовательно, в будущем при эксплуатации радиозондов необходимо будет делить радиочастоты с большим числом пользователей. Вероятно, что во многих странах станет практически невозможным использование широкополосных радиозондовых систем, занимающих большую часть имеющегося спектра полос, выделенного для метеорологических целей. В связи с этим планирование будущих работ в большинстве стран должно быть основано на принципе, согласно которому, во избежание ненужных помех радиозондовые передатчики и приемники должны работать в полосах, ширина которых гораздо меньше 1 МГц. Устойчивость передатчика, вероятно, должна быть лучше ± 5 кГц в странах с плотной сетью радиозондов и не хуже примерно ± 200 кГц в большинстве остальных стран.

Национальным метеорологическим службам необходимо поддерживать контакт с национальными органами по радиосвязи для того, чтобы сохранять выделенные им надлежащие радиочастоты и обеспечивать своим оперативным действиям защиту от помех. При эксплуатации радиозондов необходимо также не создавать помех и избегать помех со стороны платформ сбора данных, передающих информацию на метеорологические спутники в диапазоне частот 401 – 403 МГц, с линий связи, идущих вниз с метеорологических спутников в диапазоне 1 690 – 1 700 МГц, и от сигналов для передачи команд и сбора данных для метеорологических спутников в ограниченном ряде географических точек в диапазоне 1 670 – 1 690 МГц.

12.2 РАДИОЗОНДОВЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА

12.2.1 Общие характеристики

Базовая конструкция радиозонда состоит, как правило, из трех основных элементов:

(a) датчики плюс образцовый прибор;
(b) электронный преобразователь, преобразующий выходные сигналы с датчиков и образцовых приборов в электрические сигналы;
(c) радиопередатчик.

В системах радиоветровых зондов (см. часть I, главу 13) имеются также электронные средства, необходимые для приема и передачи радионавигационных сигналов, или электронные средства системы приемо-передатчика для использования со вторичными радиолокаторами.

Радиозонды, как правило, должны обеспечивать измерение более одной метеорологической переменной величины. Для компенсации нестабильности при преобразовании выходных сигналов датчика в передаваемые сигналы используются образцовые сигналы. Таким образом, следует производить переключение различных датчиков и образцовых устройств в соответствии с заранее определенным циклом. В большинстве современных радиозондов используются электронные переключатели, работающие с высокой скоростью при типичном цикле одного измерения, продолжающемся от одной до двух секунд. Такая скорость отсчетов позволяет измерять метеорологические параметры с интервалом по высоте от 5 до 10 м при нормальной скорости подъема радиозонда.

12.2.2 Источники питания для радиозондов

Емкость батарей радиозондов должна быть достаточной для того, чтобы обеспечивать питание радиозонда на протяжении всего времени его полета при

любых условиях состояния атмосферы. Для подъема радиозонда на высоту 5 гПа емкость батарей радиозондов должна быть достаточной для снабжения требуемыми токами в течение до трех часов, с учетом того, что подъемы часто могут затянуться и время полета может растянуться до двух часов. Три часа работы батареи могли бы потребоваться в том случае, когда должны использоваться данные, поступающие во время снижения радиозонда. Батареи должны быть как можно более легкими и иметь длительный срок хранения. Кроме того, использованные батареи не должны представлять опасность для окружающей среды. Многие современные радиозонды могут в ходе полета выдерживать значительные изменения выходного напряжения. Обычно в радиозондах используют батареи двух типов: батареи с сухими элементами и водоналивные батареи.

Преимущество сухих батарей заключается в том, что они легкодоступны по очень низкой цене, поскольку в большом количестве производятся по всему миру. Однако к их недостаткам относится ограниченный срок годности. К тому же при разрядке выходное напряжение сухой батареи подвержено большим изменениям по сравнению с водоналивными батареями.

В водоналивных батареях обычно используют хлорид меди и серное вещество. Эти батареи имеют длительный срок хранения. Благодаря химическим реакциям, происходящим в водоналивных батареях, в них вырабатывается внутреннее тепло, что уменьшает потребность в тепловой изоляции и помогает стабилизировать температуру электронных средств радиозонда во время полета. Эти батареи не производятся в широких масштабах для других пользователей. Поэтому, как правило, их производят непосредственные изготовители радиозондов.

Необходимо позаботиться о том, чтобы батареи не представляли опасность для окружающей среды после того, как радиозонд упадет на землю в результате разрыва оболочки воздушного шара.

12.2.3 Методы передачи данных

12.2.3.1 Радиопередатчик

В радиозондах используются передатчики самых разных конструкций. При частотах вплоть до 400 МГц используется, главным образом, полупроводниковые схемы, а при частоте 1 680 МГц могут применяться ламповые (резонаторные) генераторы. В современных конструкциях передатчика обычно используется кварцевая стабилизация частоты для того, чтобы обеспечить хорошую стабильность частоты во время зондирования. Хорошая устойчивость частоты во время подготовки зонда на земле перед запуском и в ходе полета, является очень важным фактором. При частоте 400 МГц предполагается широкое использование радиозондов с передатчиками, выходная мощность которых составляет менее 250 мВт. При частоте 1 680 МГц наиболее часто используются радиозонды с передатчиками мощностью примерно 330 мВт. Модуляция передатчика у разных типов радиозондов различается (см. ниже). Желательно, чтобы в будущем производители радиозондов стандартизировали передачу данных с радиозондов на наземную станцию. В любом случае органы, регулирующие правила радиосвязи, во многих регионах мира будут требовать в будущем соответствия передатчиков радиозондов определенным спецификациям, чтобы минимизировать занятый радиочастотный спектр и дать возможность другим пользователям использовать выделенный для метеорологических средств радиочастотный диапазон (см. раздел 12.1.4.2).

12.3 ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРЫ

12.3.1 Основные требования

Лучшие современные датчики температуры должны обладать такой инерцией на изменения температуры, при которой систематическое отклонение от тепловой инерции в ходе подъема радиозонда составляло бы менее 0,1 К при прохождении через любой слой толщиной 1 км. При типичной скорости подъема радиозонда это достигается в большинстве районов наблюдений в случае, когда величина постоянной времени датчика составляет менее 1 с на ранней стадии подъема. Кроме того, датчики температуры должны быть сконструированы таким образом, чтобы по мере возможности избежать погрешностей, возникающих при воздействии прямой или отраженной солнечной радиации или в результате теплообмена в инфракрасной части спектра. Погрешности, связанные с инфракрасным излучением, можно исключить путем использования покрытий для датчиков с низкой излучающей способностью в инфракрасной области спектра. Широко использовавшиеся в прошлом белые покрытия для датчиков обладали высокой излучающей способностью в инфракрасной области спектра. Измерения, проводившиеся этими датчиками, были подвержены значительным погрешностям вследствие теплообмена в инфракрасной области спектра (см. раздел 12.8.3.3).

Датчики температуры должны быть также достаточно прочными для того, чтобы выдерживать резкие

встряхивания во время запуска радиозонда, и достаточно стабильными для того, чтобы сохранять точную калибровку в течение нескольких лет. В идеале калибровка датчиков температуры должна достаточно легко воспроизводиться, чтобы можно было избежать индивидуальной калибровки датчиков. В качестве основных типов датчиков температуры, используемых на регулярной основе, можно назвать термисторы (керамические сопротивления-полупроводники), емкостные датчики, биметаллические датчики и термопары.

Скорость реакции датчика обычно измеряется величиной постоянной времени г. Она определяется (как и в разделе 1.6.3 в части I, глава 1) по формуле:

$$dT_e/dt = 1/\tau \cdot (T_e - T) \qquad (12.3)$$

где T_e – температура датчика и T – действительная температура воздуха.

Таким образом, постоянная времени определяется как время, необходимое для реагирования на какое-либо внезапное изменение температуры на величину 63 процента. Постоянная времени датчика температуры прямо пропорциональна теплоемкости и обратно пропорциональна скорости передачи тепла путем конвекции от этого датчика. Теплоемкость зависит от объема и материала датчика, в то время как передача тепла от датчика зависит от площади его поверхности и коэффициента теплопередачи, а также от скорости воздушного потока над датчиком. Коэффициент теплопередачи незначительно зависит от диаметра датчика. Таким образом, величина постоянной времени датчиков температуры, изготовленных из какого-либо заданного материала, приблизительно пропорциональны отношению объема датчика к площади его поверхности. Следовательно, наиболее эффективными для достижения быстрой реакции являются тонкие датчики с большой площадью поверхности. Изменение постоянной времени ответной реакции в зависимости от скорости воздушного потока может быть выражено следующим образом:

$$\tau = \tau_0 \cdot (\rho \cdot v)^{-n} \qquad (12.4)$$

где ρ – плотность воздуха, V – скорость воздушного потока над датчиком и n – константа.

ПРИМЕЧАНИЕ: Для датчика, размещенного над корпусом радиозонда на кронштейне, значение V будет соответствовать скорости подъема. Однако скорость воздушного потока над датчиком может быть ниже, чем скорость подъема, если этот датчик смонтирован внутри корпуса радиозонда.

Значение п изменяется от 0,4 до 0,8 в зависимости от формы датчика и от характера воздушного потока (ламинарный или турбулентный). Репрезентативные значения величины постоянной времени устаревших типов датчиков температуры при показателях давления 1 000, 100 и 10 гПа и скорости подъема 5 м/с представлены в таблице 12.3. Эти значения получены путем объединения результатов лабораторных проверок и результатов сравнений с малоинерционными датчиками при подъеме в ходе испытательных сравнений радиозондов. Как отмечалось выше, современные емкостные датчики и термисторы-бусинки имеют постоянную времени ответной реакции быстрее 1 с на 1 000 гПа.

Таблица 12.3. Типичные постоянные времени *r* радиозондовых датчиков температуры при различных значениях атмосферного давления *P*, гПА

Датчик температуры	*P, гПа*		
	1 000	*100*	*10*
Стержневой термистор, диаметр 1,3 мм	3	8	21
Современный термистор-бусинка, общие значения	< 1	< 3	< 7
Миниатюрный термоконденсатор, диаметр 1,2 мм	2,5	6	15
Проволочный конденсатор, диаметр 0,1 мм	0,4	1	2,5
Биметаллический датчик	5 – 8	12 – 20	нет данных

12.3.2 **Термисторы**

Термисторы обычно изготавливают из керамического материала, сопротивление которого изменяется при изменении температуры. Датчики обладают высоким сопротивлением, которое понижается с абсолютной температурой. Соотношение между сопротивлением R и температурой T может быть выражено приблизительно следующей формулой:

$$R = A \cdot exp\ (B/T) \qquad (12.5)$$

где A и B – постоянные величины. Хотя чувствительность к изменениям температуры очень высокая, ответная реакция на изменение температуры далека от линейной, поскольку чувствительность понижается в зависимости от квадрата абсолютной температуры. Поскольку сопротивление термистора является очень высоким и составляет обычно десятки тысяч ом, самонагревание от напряжения, подаваемого на датчик, пренебрежимо мало. Можно изготавливать очень маленькие термисторы и благодаря этому достигать малой инерционности. Зависимость нагрева лучистым потоком Солнца применяемых в радиозондах современных термисторов от атмосферного давления (высоты подъема) характеризуется коэффициентом 0,1 °С/гПа.

12.3.3 Термоконденсаторы

Термоконденсаторы обычно изготавливаются из керамического материала, диэлектрическая проводимость которого изменяется при изменении температуры. В качестве керамического материала обычно используется бариево-стронциевый титанат. Температурный коэффициент диэлектрической проницаемости этого ферроэлектрического материала составляет порядка 10^{-2} 1/°C. Температурный коэффициент положителен при температурах ниже точки Кюри и отрицателен при температурах выше точки Кюри. Датчики теперь могут иметь диаметр примерно 0,1 мм. Они измеряют изменения емкости между двумя тонкими платиновыми проволоками, разделенными стеклокерамикой (см. Turtiainen, Tammella and Stuns, 1995). Такой датчик обладает малой инерционностью и погрешностью, обусловленной нагреванием за счет солнечной радиации при уменьшении атмосферного давления, не превышает 0,1 °C/гПа.

12.3.4 Термопары

В одном из национальных радиозондов используется также датчик температуры с термопарой из меди и константана (WMO, 1989*a*). Для внешнего соединения термопары используется проволока диаметром 0,05 мм, которая обеспечивают датчику возможность очень быстрого реагирования. Соотношение между термоЭДС и разностью температур между датчиком и его эталоном является установленным физическим соотношением. Опорная термопара устанавливается внутри корпуса радиозонда в относительно стабильной температурной среде. Медный резистор используется для измерения этой эталонной температуры. Для получения точных значений температуры необходимо компенсировать паразитную ЭДС, возникающую на дополнительных соединениях между датчиком и находящимися внутри радиозонда опорными термопарами.

12.3.5 Размещение датчиков

Датчики температуры в радиозонде лучше всего размещать над корпусом радиозонда (под корпусом сбрасываемого зонда). Таким образом, воздух, нагреваемый или охлаждаемый при контакте с корпусом радиозонда или держателем датчика, не проходит впоследствии над датчиком. Для долгосрочной стабильности работы это местоположение датчика необходимо точно воспроизводить, и оно не должно изменяться от полета к полету. Этого, как правило, можно достичь путем установки датчика на кронштейне, который поддерживает датчик в необходимом положении в течение всего полета. Для обеспечения хорошего обдува датчиков при низком давлении держатели датчиков и подходящие к ним токоподводы должны быть настолько тонкими, чтобы погрешностями, связанными с нагреванием или охлаждением при прохождении тепла через токоподводы, можно было пренебречь.

При таком методе размещения радиозондовые датчики температуры подвергаются непосредственному воздействию солнечного и инфракрасного излучения в атмосфере. Датчики поглощают солнечную радиацию при зондировании в дневное время и обмениваются длинноволновым излучением с Землей и атмосферой в любое время суток. Величина погрешностей, связанных с излучением, лишь в незначительной степени зависит от размера и формы датчиков, поскольку размер датчика очень слабо влияет на коэффициент конвективной теплоотдачи. Таким образом, при малых размерах датчика погрешности, обусловленные излучением, будут малы лишь в том случае, когда покрытие датчика выбрано таким образом, чтобы обеспечить низкое поглощение как коротковолновой радиации, так и длинноволнового излучения. Необходимое покрытие можно получить путем нанесения надлежащего тонкого слоя металла. Для многих белых красок характерно высокое поглощение в инфракрасной области спектра, и они не являются идеальным покрытием для радиозондового датчика.

Еще одним следствием размещения датчика температуры над корпусом радиозонда является то, что при подъеме зонда сквозь атмосферные осадки или облако датчик может покрываться водой или льдом. Чрезвычайно важно, чтобы конструкция датчика предусматривала эффективный отвод воды или льда. Во-первых, испарение воды или льда с датчика при его попадании из облака в более сухие слои будет приводить к охлаждению датчика до температуры, которая ниже фактической температуры окружающей среды. Во-вторых, поглощающая способность датчика температуры в инфракрасной области спектра в случае, когда датчик остается покрытым льдом в ходе полета, отличается от обычной. Таким образом, в данных измерений, полученных от покрытого льдом датчика, будет присутствовать аномальная систематическая погрешность в результате теплообмена в инфракрасной части спектра, особенно при низких давлениях.

Биметаллические датчики и их держатели поглощают слишком много излучения в дневное время, если установлены над радиозондами без надлежащей защиты. Поэтому датчики этого типа должны защищаться от излучения специальным экраном. Этот экран не должен пропускать к датчику как прямое, так и многократно отраженное излучение. На внутренних

поверхностях защитного экрана температура должна оставаться близкой к действительной температуре атмосферы, и эти поверхности не должны влиять на температуру воздуха, попадающего на датчик. Защитный экран ни в малейшей степени не должен уменьшать вентиляцию датчика температуры и не должен захватывать воду или лед при подъеме радиозонда сквозь облака и атмосферные осадки.

В то время как при высоком давлении можно достичь приемлемой защиты от излучения, при низком давлении выполнить все эти требования становится все труднее. Для хорошего поглощения приходящего излучения необходимо зачернить внутреннюю поверхность экрана, что, однако, приводит к сильному взаимодействию этих поверхностей с внешними полями солнечного и инфракрасного излучения. При низком давлении это ведет к значительному нагреванию или охлаждению внутренних поверхностей защитных экранов по сравнению с окружающей атмосферой. В связи с этим при очень низком давлении становится практически невозможно проводить надежные измерения температуры при использовании защищающих от излучения экранов. Компромиссная конструкция защитного экрана может представлять собой два отполированных тонких алюминиевых цилиндра, установленных коаксиально с промежутком в один или два сантиметра.

12.4 ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЯ

12.4.1 Общие аспекты

Радиозондовые датчики давления должны сохранять точность измерений в очень широком диапазоне – от 3 до 1 000 гПа с разрешением в 0,1 гПа на большей части диапазона и с разрешением в 0,01 гПа для давления менее 100 гПа. Изменения давления определяются, как правило, по небольшому электрическому или механическому изменению. Например, типичная максимальная деформация анероидной коробки составляет примерно 5 мм, так что преобразователь, используемый вместе с датчиком, должен обеспечивать разрешение смещения примерно в 0,5 мкм. Изменения калибровки, происходящие в результате изменений температуры датчика при подъеме радиозонда, также должны компенсироваться. Эти изменения температуры могут достигать нескольких десятков градусов, если только датчик давления не смонтирован в стабилизируемой среде.

В связи с этим датчики давления устанавливаются, как правило, внутри корпуса радиозонда с целью сведения к минимуму происходящих изменений температуры. В некоторых случаях датчик с целью уменьшения охлаждения окружают фольгированными пакетиками с водой. В тех случаях, когда используются водоналивные батареи, тепло, выделяемое такими батареями в результате химической реакции, используется для компенсации внутреннего охлаждения радиозонда. Однако даже при этом конструкция радиозонда должна обеспечить отсутствие градиентов температуры вокруг датчика и связанных с ним электрических компонентов. В случае когда для датчика давления создается среда с активно контролируемой температурой, вся конструкция датчика должна быть смонтирована в таком положении на радиозонде, при котором тепловое искажение показаний датчика вследствие конструкции датчика давления не могло бы влиять на измерения температуры или относительной влажности.

Датчик давления и связанный с ним преобразователь конструируются, как правило, таким образом, что чувствительность увеличивается по мере падения давления. Величина постоянной времени радиозондовых датчиков давления обычно очень мала, и погрешности, обусловленные инерцией датчика, незначительны.

12.4.2 Анероидные коробки

Анероидные коробки используются в качестве датчика давления в большинстве радиозондов. В радиозондах более старых конструкций диаметр этих коробок, как правило, составлял приблизительно 50 – 60 мм. Датчики изготавливаются из металла, коэффициент упругости которого не зависит от температуры. Измерение деформации анероидной коробки может проводиться либо при помощи внешнего устройства, требующего механической связи между коробкой и радиозондовым преобразователем, либо при помощи внутреннего устройства (см. раздел 12.4.3).

Чувствительность анероида зависит, главным образом, от активной площади поверхности коробки и от ее упругости. Коробки могут быть сконструированы таким образом, чтобы их деформация была линейно пропорциональна давлению или следовала бы какому-то другому закону, например приближалась к логарифмической зависимости от давления. Долгосрочную устойчивость калибровки коробки можно, как правило, повысить путем выдерживания коробок. Этого можно достичь, многократно подвергая коробки изменениям давления и температуры по всему рабочему диапазону.

При использовании анероида с механической связью с преобразователем датчик обычно

подвержен эффекту гистерезиса, равного примерно 1—2 гПа. Этот гистерезис необходимо принимать во внимание при калибровке датчика. Изменение давления в ходе калибровки должно быть такого же знака, как и изменение, происходящее в реальных условиях зондирования. Механическая связь с радиозондовым преобразователем часто представляет собой систему, усиливающую движение коробки с передачей на стрелку, приводящую в действие контакты переключателя или контакты, содержащие активные сопротивления. Для того чтобы действие было успешным, трение должно быть сведено к минимуму, чтобы избежать как прерывистости в движениях стрелки, так и гистерезиса в системе датчика.

12.4.3 Анероидные коробки (емкостные)

Во многих современных конструкциях радиозондов используются анероидные коробки меньшего диаметра (30 мм или даже меньше), причем деформация коробки измеряется непосредственно внутренним конденсатором. Используемый для этой цели электрический конденсатор состоит из двух параллельных пластин, каждая из которых закрепляется непосредственно на одной из сторон коробки. Емкость конденсатора C определяется по формуле:

$$C = \in \cdot S/e \qquad (12.6)$$

где S – площадь поверхности каждой пластины, e – расстояние между пластинами и $\in$ – диэлектрическая постоянная вещества между пластинами. Поскольку e – прямая функция деформации коробки, емкость C – прямая электрическая мера этой деформации. Во многих радиозондовых датчиках каждая из пластин конденсатора зафиксирована на одной из противоположных сторон коробки при помощи креплений, проходящих через отверстия в другой пластине. При такой конфигурации e уменьшается при понижении давления. Чувствительность емкостного датчика определяется по формуле:

$$-\in \cdot S/e^2 \cdot de/dp \qquad (12.7)$$

Чувствительность будет самой высокой, когда e мало, а давление наименьшее. Описанный емкостный датчик более сложен в изготовлении, однако наилучшим образом подходит для измерений на высотах, поскольку его чувствительность может быть в 10 раз выше на уровне 10 гПа, чем на уровне 1000 гПа. Значение емкости, как правило, близко к 6 пФ.

Емкостные анероидные коробки обычно соединены с электронным RC-генератором с соответствующими опорными конденсаторами. Такая конструкция необходима для измерения очень малых колебаний емкости (например, 0,1 % при максимуме в 6 пФ) без каких-либо значительных нарушений в работе генератора за счет изменений температуры, подводимого питания или в результате старения. Такой высокой устойчивости работы генератора трудно достичь при низкой цене. Однако одно из решений может заключаться в переключении входных сигналов, поступающих в генератор от датчика давления и от двух опорных конденсаторов. Опорный конденсатор C_1 подсоединяется к генератору самостоятельно, затем параллельно с конденсатором датчика давления C_p и затем параллельно со вторым опорным конденсатором C_2 для того, чтобы обеспечить полномасштабный образцовый прибор.

Калибровка анероидного емкостного датчика будет, как правило, в значительной степени зависеть от температуры. Это может быть компенсировано либо путем сличения с внешним конденсатором, обладающим аналогичным температурным коэффициентом, либо путем использования во время обработки данных в наземных системах калибровочных коэффициентов, установленных при калибровке на предприятии – изготовителе. Поправка, применяемая при обработке данных, будет зависеть от внутренней температуры, измеряемой близко к месту нахождения датчика давления. На практике для достижения необходимой точности, возможно, следует использовать оба метода компенсации.

12.4.4 Кремниевые датчики

Успехи в области использования кремния позволили в настоящее время изготавливать надежные датчики давления с использованием этого материала. В толстом слое полупроводника формируется небольшая полость. Эта полость покрывается очень тонким слоем кремния, и в ней сохраняется очень низкое давление. Эта полость затем выполняет функцию датчика давления. Чувствительным элементом служит тонкое кремниевое покрытие, которое прогибается в той или иной степени в зависимости от атмосферного давления.

Метод определения прогиба кремниевого покрытия заключается в использовании емкостного датчика. В этом случае тонкий слой кремния над полостью покрывается тонким слоем металла, а второй слой металла используется в качестве эталонной пластины. Прогиб кремниевого покрытия определяется по изменению емкости между этими двумя слоями. Датчики этого типа в гораздо меньшей степени зависят от температуры, чем датчики деформации, и сейчас широко используются. Поскольку датчик имеет очень маленький размер, это позволяет избежать погрешностей в калибровке, присущих более крупным емкостным анероидным датчикам и возникающих при

полете радиозонда в результате изменений градиента температуры в анероидном датчике и в связанной с ним электронике.

12.4.5 Использование геометрической высоты вместо данных датчика давления

12.4.5.1 Общие сведения

Радиозонды с GPS, которые декодируют спутниковые сигналы глобальной системы позиционирования, могут предоставлять данные о геометрической высоте в отличие от первых радиозондов с GPS, которые не декодировали эти сигналы. Эти измерения геометрической высоты достаточно точны (их погрешность заключена в интервале от 10 до 20 м) для того, чтобы использоваться для расчета давления в заданное время полета зонда на основе данных наблюдений у поверхности за давлением, температурой и относительной влажностью. Рассчитанное значение давления будет более точным, чем измерения в стратосфере с помощью самых лучших радиозондовых датчиков давления.

При определении ветра с помощью радиолокатора радиолокационные измерения высоты могут представлять собой альтернативный вариант измерениям с использованием радиозондового датчика давления, но эти высоты будут не столь же точны как те, что получены с помощью GPS радиозондов. Погрешности в данных о высотах, полученных с помощью радиолокатора, зависят от установки и калибровки каждого конкретного радиолокатора. Таким образом, значительно труднее добиться совместимости данных измерений геопотенциальной высоты и давления от станции к станции в рамках национальной сети аэрологических станций, которая зависит от радиолокационных измерений высоты, по сравнению с национальной сетью станций, где используется определение высоты с помощью GPS или датчиков давления. Исключение из GPS радиозондов датчика давления должно обеспечить значительное снижение стоимости радиозондов, однако необходимо учитывать потребности пользователей в данных для применяемых все чаще негидростатических моделей численных прогнозов погоды, поскольку непосредственное измерение в тропосфере давления и геопотенциальной высоты может давать некоторое преимущество в тех случаях, когда предположение о гидростатическом равновесии не соответствует атмосферным условиям.

12.4.5.2 Метод расчета

Алгоритмы для расчета геометрической высоты по данным радиолокационных наблюдений за ветром с учетом наклонной дальности и угла места с последующим преобразованием геометрической высоты в геопотенциальную высоту включены в публикацию ВМО (1986). Оперативный алгоритм, используемый во вторичных радиолокационных системах в Российской Федерации, приведен в другой публикации ВМО (1991). В случае когда вместо данных наблюдений с помощью датчика давления используются данные радиолокационных наблюдений за высотой, необходимо перед расчетом значений давления откорректировать эти высоты с учетом влияния кривизны земного шара и рефракции радиоволн. Поправка на рефракцию может быть введена с использованием сезонных средних профилей атмосферы, однако для достижения оптимальной точности значений давления может понадобиться коррекция высоты с учетом условий, характерных для каждого индивидуального полета радиозонда.

12.4.5.3 Источники погрешностей при радиолокационных наблюдениях за высотой

Влияние погрешностей радиолокационных наблюдений на результаты измерения ветра рассматриваются в части I главы 13. Однако при радиолокационном определении высоты ошибки в угле места (случайные и систематические) являются гораздо более значительными, чем при определении ветра. Систематическое смещение наклонной дальности также более существенно при измерениях высоты, чем при измерениях ветра. Таким образом, радиолокаторы, обеспечивающие удовлетворительные наблюдения за ветром, часто имеют такие погрешности в угле места и наклонной дальности, которые препятствуют получению высококачественных данных измерения высоты (и, следовательно, давления).

Небольшие, но значимые систематические погрешности в угле места могут быть обусловлены следующими различными факторами:

(a) перекос осей вращения по азимуту и углу места радиолокатора в процессе его изготовления. Для того чтобы избежать этого, следует в спецификации на поставку оборудования четко указать, какая требуется точность;

(b) ошибки в горизонтировании радиолокатора при его установке и в установлении нулевого отсчета для угла места в горизонтальной плоскости;

(c) расхождения между электрическими и механическими осями следящих антенн, которые, возможно, возникают при ремонте или замене электрических компонентов радиолокатора.

Погрешности могут возникать вследствие погрешностей системы преобразователя, измеряющей угол места радиолокатора по механическому положению следящей антенны.

Систематические погрешности в наклонной дальности могут быть вызваны следующими причинами:

(a) задержкой во включении цепи измерения времени и расстояния или неправильной компенсацией задержки сигнала в радиолокационных электронных средствах сопровождения;

(b) погрешностью измерения частоты калибратора расстояния.

Таким образом, радиозондовые системы, работающие без датчиков давления и рассчитанные единственно на радиолокационные измерения высоты, требуют частых проверок и регулировок радиолокаторов в процессе обычной эксплуатации станции. Эти системы непригодны для использования в странах, в которых возможности технического обслуживания ограничены.

12.5 ДАТЧИКИ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ВЛАЖНОСТИ

12.5.1 Общие аспекты

Успешное функционирование радиозондового датчика относительной влажности зависит от скорости обмена молекулами воды между этим датчиком и атмосферой. В случае когда датчик относительной влажности должен обеспечивать получение надежных данных при прохождении радиозонда сквозь тропосферу, он должен обеспечивать разрешение до одного процента для давления насыщенного водяного пара от 46 гПа при 30 °C до минимум 0,06 гПа при –50 °C. Для измерений при температуре ниже 0 °C датчики относительной влажности должны быть откалиброваны таким образом, чтобы сообщать значение относительной влажности по отношению к поверхности воды.

Датчики относительной влажности нового поколения обеспечивают довольно хорошие результаты при температуре выше примерно –70 °C и дают сопоставимые профили относительной влажности. Добиться удовлетворительной работы датчика относительной влажности при низких значениях температуры и давления зачастую чрезвычайно трудно. Если свободный обмен молекулами воды между датчиком и атмосферой затруднен при понижении температуры во время подъема радиозонда, то искажение показаний датчика, вызванное высокой концентрацией водяного пара на более ранних стадиях подъема, может привести к значительному систематическому отклонению в данных измерений при наиболее низких значениях температуры.

Инерционность датчика относительной влажности во время подъема радиозонда возрастает гораздо быстрее, чем инерционность датчика температуры. В таблице 12.4 представлены приблизительные значения величины постоянной времени для трех основных типов датчика в диапазоне относительной влажности от 70 до 30 процентов. Инерционность датчиков с животной пленкой при заданной температуре значительно возрастает при очень высокой или очень низкой относительной влажности.

Угольные гигристоры устанавливаются обычно в радиозонде в шахте, а датчики с тонкой пленкой на кронштейне радиозонда; последние защищаются колпачками от воздействия атмосферных осадков. Проведенные недавно сравнения радиозондов не выявили какой-либо значительной разницы в инерционности большинства широко используемых тонкопленочных емкостных датчиков при температуре выше –70 °C.

При температуре ниже –40 °C инерционность тонкопленочных емкостных датчиков обычно гораздо меньше, чем инерционность угольных гигристоров, и они становятся самыми используемыми датчиками относительной влажности почти во всех современных радиозондах. Емкостные датчики с тонкой пленкой могут иметь инерционность две минуты при температуре –60 °C.

Калибровка большинства датчиков относительной влажности зависит от температуры. Для того чтобы точность, заявленная для данного датчика при комнатной температуре в лаборатории, сохранялась и при полете радиозонда через большую часть

Таблица 12.4 Инерционность датчика относительной влажности $\tau(c)$ при различных значениях температурах *T*, °C

Датчик	*T*, °C				
	20	*0*	*–20*	*–30*	*60 C*
Животная (золотобитная) пленка	6	20	100	200	не используется
Угольный гигристор	0,3	1,5	9	20	не используется
Тонкопленочный ёмкостный датчик	0,3	1,5	9	20	60 – 200[a]

a см. результаты Милошевича и др. (2004)

тропосферы, необходимо проводить коррекцию этой зависимости при обработке данных наземной системой.

Для большинства датчиков относительной влажности необходима защита от загрязнения атмосферными осадками на ранней стадии подъема радиозонда. Испарение осадков с защитных покрытий, внутренних поверхностей шахты или держателей датчика в начале полета также может привести к возникновению погрешностей в результатах наблюдений за относительной влажностью.

Ни один из датчиков относительной влажности, устанавливаемых на действующих радиозондах, не является достаточно надежным для обеспечения высококачественных измерений относительной влажности при низких значениях температуры и давления в стратосфере.

12.5.2 Емкостные тонкопленочные датчики

Емкостные тонкопленочные датчики используются в настоящее время в большинстве конструкций современных радиозондов. Принцип действия первого широко используемого датчика основан на зависимости диэлектрической проницаемости полимерной пленки от давления водяного пара в окружающей среде. Нижний электрод конденсатора формируется путем протравливания покрытой металлом стеклянной пластинки (площадь ее обычно составляет 4 мм, а толщина – 0,2 мм), которая затем покрывается слоем активного полимера толщиной приблизительно 1 мкм. Верхний электрод из золота напыляется вакуумным методом на поверхности этого полимера и является проницаемым для водяного пара. Зависимость емкости датчика от относительной влажности представляет собой почти линейную функцию; зависимость калибровки от температуры незначительна. Лабораторные испытания работы этого датчика показали, что гистерезис относительно невелик (менее 3 процентов относительной влажности), если на электроды датчика не попадают атмосферные осадки. После нескольких лет оперативного использования на верхний электрод было добавлено тонкое покрытие для того, чтобы повысить устойчивость его работы при подъеме радиозонда во влажных условиях. Калибровка датчика A-Humicap, используемого в радиозонде Vaisala RS80, занижает показания при очень низких температурах, поскольку нелинейность полученной калибровочной характеристики становится значительной при этих температурах. Коррекции этого эффекта были предложены в работах Милошевича и др. (2001) и Лейтерера и др. (2005).

В более современных датчиках (H-Humicap) используется другой полимер, который более устойчив во влажных условиях. Этот датчик требует полиномиальной калибровочной характеристики более высокого порядка, чем предыдущие конструкции датчика, однако это может быть урегулировано с помощью оперативных наземных систем радиозондирования, которые в большинстве своем полностью автоматизированы. Хотя этот датчик обладает повышенной устойчивостью во влажных условиях, он все же испытывает на себе отрицательное воздействие искажения показаний датчика после прохождения через мощные облака на низких высотах.

В большинстве последних типов датчиков относительной влажности компании Вайсала искажение показаний датчика от попадания на него облачных микрочастиц устраняется путем периодического нагревания датчика относительной влажности во время полета (Paukkunen, 1995). Для обеспечения оптимального функционирования тонкопленочных датчиков необходимо проводить их тщательную калибровку на заводе-изготовителе по всему диапазону температуры, который может наблюдаться в тропосфере, где будут проводиться измерения. Некоторые подробности в различиях инерционности этих датчиков были опубликованы в работах Милошевича и др. (2004). Различия наиболее явно проявляются при очень низких температурах вблизи тропопаузы.

С 1995 года пользователи осознали, что два основных используемых емкостных датчика (Вайсала A-Humicap и Вайсала H-Humicap) могут существенно занижать показания из-за химического загрязнения датчиков, например смотрите работу Wang и др. (2002). Радиозонды, использованные вскоре после их доставки с завода-производителя, будут иметь корректную калибровку, но если они хранятся в течение года, они будут часто при работе показывать большую отрицательную систематическую погрешность. Эта погрешность могла понижать показания на 11 процентов при высокой относительной влажности. Химическое загрязнение происходило от стирольного газа, испускаемого корпусом радиозонда. Мониторинг показал, что уровень загрязнения менялся время от времени в радиозондах, используемых для запусков. Это химическое загрязнение продолжало наблюдаться в разной степени даже после того, как Вайсала переделала конструкцию упаковки радиозонда RS80. С появлением новых датчиков Вайсала, которые могут подвергаться импульсному нагреву, любое химическое загрязнение устраняется путем нагрева датчика во время процедуры его проверки перед запуском радиозонда.

12.5.3 Угольные гигристоры

Угольные гигристоры изготавливаются путем внедрения тонко измельченных частиц угля в гигроскопическую пленку. Современный вариант этого датчика представляет собой полистироловую ленту (примерно 1 мм толщиной, 60 мм длиной и 18 мм шириной), покрытую тонкой гигроскопической пленкой, содержащей частицы угля. Вдоль каждой стороны этого датчика размещены электроды. Изменение относительной влажности окружающей среды приводит к изменению размеров гигроскопической пленки, при этом по мере увеличения влажности возрастает сопротивление. Сопротивление при относительной влажности 90 % примерно в 100 раз больше, чем при относительной влажности 30 %. При обработке данных может проводиться коррекция с учетом температурной зависимости. Датчики обычно устанавливаются в шахте внутри радиозонда с целью сведения к минимуму влияния атмосферных осадков и предотвращения прямого нагревания датчика солнцем.

При качественном производстве этот тип датчиков имеет воспроизводимые калибровочные характеристики, поэтому зависимость датчиков от температуры не нужно определять на индивидуальной основе. Гигристоры следует подвергать, как правило, на месте их изготовления, воздействию многих сезонных циклов при разных значениях относительной влажности и комнатной температуре, с тем чтобы впоследствии уменьшить гистерезис в этом датчике при подъеме радиозонда. Сопротивление датчика во время его изготовления может быть отрегулировано до стандартного значения путем удаления части угольного покрытия с пленки. В этом случае значению измеряемой величины могут соответствовать определенные стандартные значения сопротивления для конкретных условий, и датчики в радиозондах станут взаимозаменяемыми без необходимости дальнейшей калибровки. Этот датчик должен храниться в опечатанном виде вплоть до момента его использования, а во время установки этого датчика в радиозонде нельзя прикасаться к гигроскопической поверхности пленки. Трудно изготовить датчики, имеющие стабильную калибровку при высокой влажности, и воспроизводимость результатов измерений этими датчиками часто плохая при низкой влажности.

12.5.4 Датчики из животной пленки

Датчики из животной пленки (пленка из брюшины быка) все еще используются в больших сетях. При изменении влажности от 0 до 100 % длина элемента из животной пленки изменяется на 5 – 7 %. Хорошие результаты могут быть получены при температуре выше –20 °C, однако при более низкой температуре скорость ответной реакции датчиков становится чрезвычайно низкой (см. таблицу 12.4). При низкой влажности датчики из животной пленки также испытывают отрицательные последствия значительного гистерезиса.

Животная пленка, используемая в датчиках влажности, должна быть однослойной и нелакированной, толщиной примерно 0,03 мм. Эта пленка должна быть закреплена с натяжением примерно в 20 г/см (на сантиметр ее ширины) и в таком натянутом состоянии должна быть выдержана в течение нескольких часов в насыщенной атмосфере. Для сведения к минимуму гистерезиса рекомендуется помещать датчик в насыщенную атмосферу на 20 минут как перед калибровкой, так и перед использованием. Калибровка должна проводиться в ходе цикла изменений относительной влажности при переходе от влажных условий к сухим. Во время полета радиозонда датчик должен быть защищен от воздействия дождя.

Инерционность этого датчика гораздо больше значений, указанных в таблице 12.4 при очень высоких и очень низких показателях влажности (Mcllveen и Ludlam, 1969). Таким образом, трудно избежать систематической погрешности в данных измерений датчиками из животной пленки во время подъема радиозонда (занижение при высокой влажности, завышение – при низкой влажности) даже в нижней тропосфере.

12.5.5 Размещение датчиков

При подъеме радиозонда обычным является быстрое изменение относительной влажности с амплитудой более 25 процентов. Для точных измерений необходимо, чтобы датчики влажности хорошо вентилировались, а кроме того, были по возможности защищены от оседания на их поверхности или на их держателях воды или льда, а также от нагревания солнцем.

Таким образом, датчики относительной влажности небольшого размера, такие как емкостные тонкопленочные датчики, устанавливаются на внешнем кронштейне. Датчик может накрываться небольшим защитным колпачком или датчик может периодически подвергаться нагреву для уменьшения искажения показаний датчика от воздействия воды или льда из облака или тумана. Конструкция защитного колпачка может иметь очень большое значение, ведь необходимо, чтобы колпачок не мешал датчику влажности хорошо вентилироваться воздухом во время подъема радиозонда.

Более крупные датчики устанавливаются обычно во внутренней шахте или в большой защитной шахте сверху или на боковой стороне корпуса радиозонда. Следует проверить, позволяет ли конструкция шахты обеспечивать приток воздуха в шахту, достаточный для надлежащей вентиляции датчика во время подъема радиозонда. В конструкции шахты должно предусматриваться как можно более быстрое удаление воды и льда при прохождении радиозонда через облака или сильные атмосферные осадки. Шахта должна защищать датчик от приходящего солнечного излучения и в значительной степени от рассеянного солнечного излучения. Конструкция шахты должна быть особенно тщательно продумана, если крайне важно избежать загрязнения в облаках верхнего яруса.

Защитные оболочки или покрытия шахты не должны изготавливаться из гигроскопических материалов.

12.6 ОБОРУДОВАНИЕ НАЗЕМНОЙ СТАНЦИИ

12.6.1 Общие характеристики

Детали конструкции наземного оборудования радиозондовой станции зависят от того, какой тип радиозондов используется. Тем не менее, в оборудование наземной станции всегда входят следующие элементы:

(a) антенна и радиоприемник для приема сигналов с радиозонда;

(b) оборудование для декодирования модуляции радиозондовых сигналов и для преобразования этих сигналов в метеорологические величины;

(c) оборудование для представления данных метеорологических измерений оператору таким образом, чтобы можно было передавать пользователям необходимые сообщения в соответствии с требованиями.

При необходимости для наблюдений за ветром может дополнительно использоваться и другое оборудование (например, устройство сопряжения с радиолокатором, навигационные системы «Лоран-С», „Омега» или следящие устройства ГСП).

Сигналы, выходящие с декодера, должны, как правило, служить в качестве входных сигналов для компьютера для архивации и дальнейшей обработки и коррекции данных.

Современные системы наземных станций могут быть либо приобретены в виде комплексной системы у какого-либо производителя, либо созданы из отдельных модулей, поставленных из различных источников. В случае когда ремонт и обслуживание будут обеспечиваться в основном самим производителем или его представителями, а не операторами, предпочтительнее выбирать комплексную систему. Систему, состоящую из отдельных модулей, можно гораздо легче адаптировать к различным типам радиозондов. Этого можно достичь, добавляя соответствующие декодеры, без дополнительных затрат на приобретение основных частей комплексной наземной системы, предлагаемых каждым производителем. Модульный тип системы может быть предпочтительным вариантом для операторов, способных самостоятельно обслуживать техническую часть и программное обеспечение, независимо от производителя радиозондов. В последние 10 лет системы из отдельных модулей сталкиваются с проблемами из-за сложности тестирования таких систем, а также проблемами, возникающими при необходимости адаптации программного обеспечения стандартных поправок производителя к нестандартному использованию с другой системой обработки данных.

ПРИМЕЧАНИЕ: При существующих темпах развития современных электронных средств для производителей трудно будет обеспечивать надлежащее обслуживание конкретных комплексных систем более 10 – 15 лет. Таким образом, при планировании долгосрочных расходов необходимо предусмотреть замену комплексных наземных систем примерно каждые 10 лет.

12.6.2 Программное обеспечение для обработки данных

Удовлетворительное программное обеспечение для радиозондовой наземной системы является гораздо более сложным, чем программное обеспечение, необходимое просто для оценки, например, геопотенциальных высот на стандартном уровне на основе точных данных. Данные измерений плохого качества должны отбрасываться; при этом специальные процедуры интерполяции позволяют справляться с работой при отсутствии небольшого количества данных. Существует серьезный риск того, что программист, который недостаточно изучил работу радиозондов, произведет на первый взгляд обоснованные упрощения, которые впоследствии, при определенных обстоятельствах, приведут к возникновению весьма значительных ошибок. Например, в том случае, когда прием данных с радиозонда плохой, опасно проводить в слишком больших масштабах интерполяцию данных с использованием математических методов, этот способ вполне надежен, когда качество данных в целом хорошее, но становится ненадежным, когда качество данных в целом плохое. Кроме того, некоторые проблемы с

приемом сигналов и погрешностями измерения давления сразу же после запуска часто компенсируются путем коррекции времени, связанного с получаемыми данными. Это не приведет к возникновению значительных ошибок в результатах измерений, однако может сделать почти невозможной проверку работы датчика радиозонда при сравнительных испытаниях радиозондов.

Таким образом, при разработке программного обеспечения в целях общего контроля чрезвычайно важно воспользоваться услугами специалиста или консультанта по радиозондам.[1] Для подготовки эффективного программного обеспечения необходимо, чтобы над ним работал высококвалифицированный профессиональный программист. Это программное обеспечение должно охватывать средства отображения и интерактивные средства для оператора, которые требуются для оперативного использования. Программное обеспечение обязательно должно быть устойчивым и не должно отказывать при работе неопытных операторов. В последнее десятилетие для разработки большей части программного обеспечения, предназначенного для коммерческих наземных радиозондовых систем, требовалось, по меньшей мере, два или три года. Программное обеспечение разрабатывалось в сотрудничестве с национальными метеорологическими службами, проводившими его тестирование. Это тестирование осуществлялась высококвалифицированными операторами и испытателями до тех пор, пока программное обеспечение не становилось абсолютно надежным в оперативной деятельности. После этого программное обеспечение для наземных систем могло использоваться операторами, не обладающими какими-либо особыми навыками работы с компьютерами.

Программное обеспечение для наземной системы должно быть хорошо задокументировано, и должно включать четкое описание используемых алгоритмов.[2] Вся система в целом должна быть разработана таким образом, чтобы обеспечить возможность для моделирования зондирования с целью проверки и сравнения. Было предложено использовать имеющиеся ряды данных о давлении, температуре и влажности для проверки надежности вновь разрабатываемого программного обеспечения. Именно ошибки, связанные с недостатками программного обеспечения, часто ограничивают точность данных, сообщаемых с радиозондов наилучших типов.

1 Рекомендовано Комиссией по приборам и методам наблюдений на двенадцатой сессии (1998) в соответствии с Рекомендацией 2 (КПМН-XII).

2 См. рекомендацию 2 (КПМН-XII).

12.7 ЭКСПЛУАТАЦИЯ РАДИОЗОНДОВ

12.7.1 Контрольное внесение поправки непосредственно перед использованием

Перед запуском радиозонда рекомендуется провести проверку точности радиозондовых измерений в контролируемой среде. Эти контрольные проверки должны проводиться в отношении уже готовых к полету радиозондов за несколько минут до их запуска. Задача при этом заключается в предотвращении запуска неисправных радиозондов. Следующая задача может заключаться в повышении точности калибровки путем коррекции небольших изменений в калибровке, которые могли произойти во время транспортировки радиозонда к месту запуска и во время хранения.

Эти контрольные проверки проводятся обычно в помещении. Они могут проводиться в вентилируемой камере с образцовыми датчиками температуры и относительной влажности, точность которых соответствует спецификациям пользователя. Затем может быть проведена проверка относительной влажности в условиях влажности окружающей среды и в случае необходимости при более низкой и более высокой влажности. При отсутствии образцового психрометра можно получить известные значения влажности с помощью насыщенных солевых растворов или силикагеля.

Расхождения между данными радиозондовых измерений и показаниями контрольных приборов могут быть использованы для коррекции характеристик калибровки датчиков до полета. Датчики, используемые для контроля радиозондов, должны регулярно проверяться, чтобы избежать долговременного дрейфа их калибровки. Надлежащая коррекция калибровки радиозондов при помощи программного обеспечения обычно позволяет в некоторой степени улучшить воспроизводимость результатов радиозондовых измерений в ходе полета. Тип необходимой коррекции будет зависеть от причин изменения калибровки после первоначальной калибровки, проводившейся при изготовлении радиозонда, и будет изменяться в зависимости от типа радиозонда.

При обнаружении больших расхождений с контрольными измерениями радиозонд может быть забракован как не отвечающий спецификации его изготовителя и возвращен для замены. Максимально допустимые расхождения при наземных проверках должны согласовываться с изготовителем радиозондов при их приобретении.

Представляется целесообразным осуществлять контроль за работой радиозонда после его доставки

на площадку для запуска. Сообщения с радиозонда должны быть проверены на совместимость с результатами приземных наблюдений на станции непосредственно перед запуском.

Учитывая важное значение этого этапа в работе радиозонда, Комиссия по приборам и методам наблюдений рекомендовала следующее:[3]

(a) функционирование радиозондовых датчиков давления, температуры и относительной влажности должно проверяться в контролируемой среде, такой как лабораторный шкаф для калибровки или устройство предполетной проверки, до запуска радиозонда;

(b) минимально необходимая проверка должна быть по мере возможности автоматизирована, чтобы устранить возможность ошибки оператора;

(c) данные наблюдений за температурой и относительной влажностью также должны быть проверены в сравнении со стандартными данными приземных наблюдений за температурой и относительной влажностью на станции непосредственно перед запуском радиозонда;

(d) точность контрольных датчиков должна быть, по крайней мере, такой же, как у датчиков радиозонда, при этом контрольные датчики должны проходить регулярную калибровку в соответствии с инструкциями производителя.

12.7.2 Методы запуска радиозондов

Радиозонды обычно запускаются с помощью газонаполненной оболочки, поднимающейся со скоростью от 5 до 8 м/с, в зависимости от спецификации и характеристик используемой оболочки (см. часть II, главу 10). Такая скорость подъема позволяет проводить измерения своевременно: радиозонду требуется примерно 40 минут, чтобы достичь высоты 16 км, и примерно 90 минут, чтобы достичь высоты более 30 км – таким образом, информация может быть быстро передана в центры прогнозирования. Конструкция и размещение датчиков температуры и относительной влажности на радиозонде предусматривают обычно надлежащую вентиляцию при скорости подъема, равной примерно 6 м/с. Поправки к данным о температуре, вводимые для устранения погрешностей, связанных с нагревом солнечной радиацией, действительны, как правило, лишь при указанной скорости подъема.

Информация с радиозонда поступает на наземную станцию, которая обычно располагается на постоянном месте. Однако современные технологии позволяют создавать полностью автоматизированные радиозондовые наземные системы очень маленького размера. Поэтому в настоящее время наземные системы легко разместить в качестве подвижных систем на морских судах или в небольших автофургонах или трейлерах на суше.

При сбрасывании радиозондов с исследовательских воздушных судов используются парашюты, которые позволяют замедлить их спуск. Датчики температуры монтируются внизу сбрасываемого радиозонда. Скорость спуска обычно составляет около 12 м/с, что позволяет завершить измерение сбрасываемым радиозондом примерно за четверть часа. Благодаря высокой скорости спуска одно воздушное судно имеет возможность сбросить достаточное число радиозондов на надлежащем расстоянии друг от друга по горизонтали (менее 50 км) для проведения мезомасштабных исследований. Сообщения, передаваемые со сбрасываемых радиозондов, могут приниматься и обрабатываться на воздушном судне. Разрабатываемые в настоящее время системы смогут принимать и передавать прямые показания, а также действовать в автоматическом режиме под контролем программы. Кроме того, разрабатываются системы, позволяющие использовать для сбрасывания радиозондов дистанционно пилотируемые воздушные транспортные средства.

12.7.3 Процедуры запуска радиозонда

После того как радиозонд подготовлен к запуску, следует провести проверку, сравнив данные метеорологических измерений с помощью радиозонда с данными приземных измерений либо внутри камеры для калибровки, либо снаружи, в вентилируемой метеорологической будке. Необходимость такой проверки обусловлена тем, что радиозонд мог быть поврежден во время его транспортировки с места изготовления или не был надлежащим образом изготовлен, или калибровка датчиков могла измениться во время хранения. Если погрешности измерения с помощью радиозонда превышают пределы, указанные в контракте на его приобретение, следует возвратить его изготовителю для замены.

Радиозонды обычно запускают вручную или с использованием вспомогательного устройства для запуска из какого-либо ангара или контейнера. Сложность устройства ангара и процедуры запуска зависят от того, какой газ используется для наполнения шара (см. часть II, главу 10), и от скорости и направления приземного ветра в месте запуска. В случае запуска при сильном ветре в качестве вспомогательного средства используется размотчик, который замедляет высвобождение идущего к

3 Рекомендовано Комиссией по приборам и методам наблюдений на одиннадцатой сессии (1994) в соответствии с Рекомендацией 9 (КПМН-XI).

радиозонду соединительного шнура во время запуска. При очень сильном приземном ветре требуются такие размотчики, которые высвобождают соединительный шнур со скоростью 0,5 – 1 м/с.

Автоматические системы для запуска радиозондов доступны на коммерческой основе. Эти системы могут оказаться экономически выгодными на тех радиозондовых станциях, на которых персонал используется исключительно для работы с радиозондами. Однако эти системы могут оказаться непригодными для работы в тех местах, где обычно наблюдается очень сильный приземный ветер.

В том случае, когда пользователям требуются точные данные о вертикальной структуре атмосферного пограничного слоя, данные приземных наблюдений, включенные в аэрологическое сообщение, следует получать из пункта, расположенного поблизости от места запуска радиозонда. Место запуска радиозонда также должно быть репрезентативным для условий в пограничном слое, соответствующих приземной синоптической сети в данном районе. Предпочтительно, чтобы оператор (или автоматизированная система) проводили приземные наблюдения сразу же после, а не до запуска шара-зонда. Оператору следует избегать ввода данных приземных наблюдений до запуска шара-зонда, поскольку метеорологические условия могут успеть измениться до запуска в случае, когда происходит значительная задержка запуска (например, из-за разрыва оболочки воздушного шара перед запуском или из-за полетов воздушных судов).

В целях получения в ходе измерений точных данных о вертикальной структуре атмосферного пограничного слоя необходимо хорошо провентилировать радиозонды перед запуском, поскольку датчики радиозондов надежно функционируют лишь после надлежащего вентилирования. Когда идет дождь, необходимо предусмотреть определенную защиту для датчиков радиозонда до его запуска. В этом случае полезной может оказаться вентилируемая метеорологическая будка, которая поможет подготовить радиозонд для запуска.

12.7.4 Подвеска радиозонда во время полета

Во время полета радиозонд не должен быть подвешен слишком близко к газонаполненной оболочке. Это условие необходимо соблюдать потому, что оболочка является источником искажений показаний датчика при измерениях температуры и относительной влажности. Во время подъема оболочки позади неё идет спутная струя, воздух в которой нагревается в контакте с поверхностью оболочки в дневное время и охлаждается в некоторой степени в ночное время. Воздух в тепловом следе за оболочкой может также быть загрязнен водяным паром с поверхности оболочки после того, как она прошла сквозь облака. Длина подвески, которая позволяет предотвратить воздействие значительного искажения показаний датчика от идущей за оболочкой спутной струи на радиозондовые измерения, зависит от максимальной высоты наблюдений. Это связано с тем, что воздух, остающийся за газонаполненной оболочкой, при очень низких давлениях нагревается или охлаждается сильнее. Для предотвращения значительных погрешностей измерений при подъеме радиозонда до 20 км достаточной является подвеска длиной 20 м. Однако если радиозонд поднимается на высоту 30 км или выше, то более приемлемой будет подвеска длиной примерно 40 м (см., например, публикацию ВМО, 1994*a*).

ПРИМЕЧАНИЕ: При исследовании влияния спутной струи за газонаполненной оболочкой на радиозондовые измерения чрезвычайно важно обеспечить правильное размещение используемых с этой целью датчиков на радиозонде. Датчики должны быть размещены таким образом, чтобы воздух, входящий в контакт с другими поверхностями на радиозонде, не мог бы попасть на датчики во время подъема. Возможными источниками загрязнения теплом или водяным паром на радиозонде являются внутренние поверхности защитных шахт, держателей датчиков или внешние поверхности корпуса радиозонда.

12.7.5 Безопасность населения

Конструкция радиозондов (размер, масса и плотность) должна соответствовать существующим правилам безопасности воздушного движения. Указанные параметры должны быть такими, чтобы радиозонд не мог причинить значительного ущерба при столкновении с воздушным судном или при всасывании его двигателем воздушного судна. Во многих странах национальные органы по управлению воздушным движением издают правила, регулирующие использование шаров-зондов, находящихся в свободном полете. Часто требуется официальная регистрация мест для запусков шаров-зондов в органах, контролирующих воздушное движение. В некоторых местах запуски шаров-зондов могут быть вообще запрещены или возможны лишь при получении специального разрешения у органов, контролирующих воздушное движение. Перед тем как организовывать новый пункт наблюдения, необходимо проверить возможность санкционирования там запусков радиозондов.

В некоторых странах правила безопасности требуют, чтобы к подвеске радиозонда были также прикреплены парашют или другие средства, уменьшающие скорость его спуска после разрыва шара. Это

необходимо для защиты населения от телесных повреждений. Парашют должен уменьшать скорость спуска около поверхности земли до 6 м/с и менее. Остатки газонаполненной оболочки после её разрыва уменьшают скорость спуска на более низких уровнях. Однако при определенных обстоятельствах большая часть оболочки после её разрыва отделяется от оснастки радиозонда, и если не использовать парашют, то скорость спуска в этом случае будет слишком высокой.

Важно также обеспечить безопасность радиозондов для окружающей среды после того, как они упадут на поверхность Земли или в океан, независимо от того, подберут ли их люди, животные или они будут просто разрушаться.

12.8 ПОГРЕШНОСТИ РАДИОЗОНДОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

12.8.1 Общие сведения

12.8.1.1 Типы погрешностей и возможные образцовые приборы

В настоящем разделе подробно рассматривается вопрос о погрешностях показаний радиозондовых датчиков. Связанные с ними погрешности в рассчитанных геопотенциальных высотах обсуждаются в разделе 12.1.3.7.

Погрешности радиозондовых измерений могут быть классифицированы по трем типам (ВМО, 1975):

(a) систематические погрешности, характерные для определенного типа радиозондов в целом;
(b) случайная составляющая систематической погрешности радиозонда, представляющая собой вариации погрешностей, которые характерны для конкретного типа радиозонда и повторяются из полета в полет при вертикальном подъеме в атмосфере;
(c) случайные погрешности отдельных наблюдений, приводящие к разбросу значений, накладываемых на погрешности радиозонда при заданном подъеме в атмосфере.

На сегодняшний день все еще трудно сравнивать радиозондовые данные с данными, полученными с помощью абсолютных образцовых приборов. Однако высокоточные измерения радиолокаторов сопровождения или измерения высоты с помощью ГСП позволяют выразить количественно систематические погрешности измерений геопотенциальной высоты. Полученные таким образом результаты можно затем использовать для определения систематических погрешностей измерений с помощью радиозондового датчика давления, если известно, что погрешности измерения температуры сравнительно невелики.

Большинство современных радиозондов измеряют температуру в ночное время с точностью ± 0,2 К на высоте 30 км (ВМО, 2005*a*). Таким образом, в ночное время можно определить систематические погрешности, которые вызывают отклонение результатов радиозондовых измерений от фактических значений. Проведение сравнений данных о температуре в дневное время с той же степенью достоверности пока еще неосуществимо. Например, средние температуры в этих же сравнениях расходились в пределах ± 0,5 К на высоте 30 км. Однако разработка Национальным управлением по воздухоплаванию и исследованию космического пространства (НАСА) метода точного измерения температуры с помощью трехтермисторного датчика позволяет продвинуться и в области контрольных измерений в дневное время (Шмидлин, Санг Ли и Ранганайякамма, 1995).

Данные измерений относительной влажности могут быть проверены при высоких значениях влажности, когда радиозонды проходят через облака при температуре выше 0 °C. Вертикальный профиль относительной влажности, полученный с помощью радиозондов, включая наличие очень сухих слоев, можно проверить путем сравнения с данными измерений, проводимых лидаром Рамана.

В ходе большинства сравнений радиозондов результаты, полученные с радиозондов одной конструкции, сравниваются с результатами, полученными с радиозондов другой конструкции, чтобы получить оценку их систематических расхождений. Погрешности радиозонда и случайные погрешности могут, как правило, быть оценены с помощью соответствующего метода расчета среднеквадратического отклонения расхождений между результатами измерений радиозондов двух разных типов. Наиболее масштабными сериями сравнений радиозондов после 1984 г. были Международные сравнения радиозондов ВМО (ВМО, 1987; 1991; 1996*a*) и сравнения, проведенные в Бразилии (2001) и Маврикии (2005). В соответствующих разделах ниже приводятся результаты, полученные в ходе этих и других сравнений с одними и теми же образцовыми приборами, проводившихся в Соединенном Королевстве, Соединенных Штатах Америки и Швейцарии.

12.8.1.2 Источники ошибок, не связанных с конструкцией, калибровкой и размещением датчиков

Чрезвычайно важно перед запуском радиозонда проводить его тщательную проверку, поскольку

ошибки в измерении значений контрольных данных, используемых для коррекции калибровки, могут привести к появлению значительных погрешностей измерений во время полета радиозонда. Следует также избегать ошибок в данных приземных наблюдений, полученных в стандартной метеорологической будке, и дальнейшего их попадания в результаты измерений. Ошибка в данных о приземном давлении повлияет впоследствии на все расчетные значения геопотенциальной высоты. По этой же причине важно, чтобы данные наблюдений за приземным давлением были приведены к уровню высоты станции.

Случайные погрешности в современных радиозондовых измерениях, как правило, невелики. Это результат применения в радиозондах усовершенствованной электроники и мультиплексирования, более надежной связи с наземной станцией для передачи информации и повышения эффективности автоматизированной обработки данных на наземной станции. Соответственно случайные погрешности обычно менее значительны, чем систематические погрешности радиозонда и происходящие от полета к полету изменения в точности измерений и калибровке датчиков (погрешность радиозонда). Однако случайные погрешности могут стать значительными, когда происходит частичный отказ в работе радиозонда, когда возникают помехи от другого радиозонда, передатчик которого работает на той же частоте, или когда радиозонд находится на большом наклонном расстоянии и малой высоте, которые несовместимы с характеристиками приемников и антенн наземной системы.

Таким образом, погрешности радиозондовых измерений могут возникать не только из-за конструкции датчиков радиозонда и проблем с калибровкой на заводе во время их изготовления, но также и из-за проблем приема сигналов с радиозондов на земле, которые отражаются на последующей обработке данных. При плохом приеме сигнала программное обеспечение для обработки данных часто определяет значения просто путем интерполяции случайных измерений, которые считаются допустимыми. В этом случае очень важно, чтобы оператор был осведомлен о количестве интерполированных данных. Качество данных может быть настолько плохим, что следует прекратить наблюдение за радиозондом и запустить вместо него другой радиозонд.

В автоматизированных системах при особых обстоятельствах часто возникают сбои в программном обеспечении, которые трудно определить без проведения масштабных проверок. Обычно ошибки обусловлены непреднамеренным пропуском обычного действия, необходимого для того, чтобы справиться с какой-то особой ситуацией или сочетанием явлений, с которыми опытный оператор обычно работает не задумываясь.

12.8.2 Погрешности измерения давления

Систематические погрешности и погрешность радиозонда (изменение от полета к полету при двух среднеквадратических отклонениях) были определены по данным сравнения радиозондов ВМО для выбранных типов радиозондов, а также по данным соответствующих испытаний, при которых для проверки работы датчиков давления использовались радиолокаторы. Полученные результаты представлены в таблице 12.5. Диапазон значений систематической погрешности обычно представляет

Таблица 12.5. Оценки систематической ошибки и ошибки радиозонда (от полета к полету) в данных о давлении, полученных для ряда радиозондовых систем в ходе проводившихся под эгидой ВМО международных сравнений радиозондов и соответствующих испытаний

Тип радиозонда	*Систематическая ошибка (гПа) на уровне 850 гПа*	*Систематическая ошибка (гПа) на уровне 100 гПа*	*Систематическая ошибка (гПа) на уровне 10 гПа*	*Ошибка радиозонда (гПа) на уровне 850 гПа*	*Ошибка радиозонда (гПа) на уровне 100 гПа*	*Ошибка радиозонда (гПа) на уровне 10 гПа*
Vaisala RS80	1,0…0,5	–1…–0,5	–0,5…0	1	0,6	0,4
Vaisala RS92	< 0,5	< 0,3	< 0,2	0,8	0,4	0,2
VIZ MKII	0…1	0,7…1,1	0,3…0,7	1,6	0,6	0,4
Meisei RS2-91	0,2…1	–0,1…0,5	–0,2…0,2	1	0,6	0,6
Graw DFM-97	<± 1	< 0,3	< 0,2	2	0,8	0,4
VIZ 1392	–0,1…0,5	–0,5…0,1	–0,5…–0,2	3,6	1,6	1
SMG, Китай	–3,3…–1,8	–2,5…–0,8	–1,3…0,5	5	3	2,.6
MRZ, Россия	–1,5…–0.5	–1,2…–0,8	0…0,2	7	3,5	0,5
Высота ГСОМ	–2…0	–0,4…0	–0,2…0	1…2	0,4…1	0,1…0,3

разброс результатов нескольких испытаний. Однако в тех случаях, когда испытание для перекрестной проверки функционирования датчика давления проводилось без использования радиолокатора, это может свидетельствовать о неопределенности в оценке погрешности.

Анероидные коробки подвержены изменению калибровки, если только они перед использованием не были надлежащим образом выдержаны в течение многих циклов изменения давления в их рабочем диапазоне. Коррекция с помощью программного обеспечения, проводимая во время обработки данных, но основанная на показаниях, полученных при наземном контроле перед запуском, позволяет несколько уменьшить эти погрешности. Однако поправки на основе проверок перед запуском радиозонда вводятся по фиксированной схеме коррекции погрешностей по всему рабочему диапазону. На практике изменение в калибровке датчика давления было более изменчивым по всему рабочему диапазону. Это было обнаружено в случае с одной широко используемой системой, в которой коррекция с помощью программного обеспечения устраняет лишь примерно половину того изменения, которое было обнаружено при наземных контрольных проверках перед полетом.

Погрешности, обусловленные гистерезисом, во время подъема радиозонда должны в значительной степени устраняться благодаря калибровке, однако они становятся значительными, если используются данные наблюдений во время спуска зонда. В этом случае следует применять соответствующие поправки. Необходимо по мере возможности сводить к минимуму погрешности, обусловленные люфтом в механических соединениях. Систематические погрешности будут возникать также при введении поправок на температуру, если датчик давления не находится в условиях с предполагаемой температурой.

В таблице 12.5 представлены характеристики следующих основных типов анероидов: VIZ 1392 (барометрический переключатель), представленный для справки, и китайский SMG (механическое соединение с радиозондом, передающим закодированные сигналы). Систематические отклонения в данных всех анероидных датчиков далеко не всегда были небольшими, и это объясняется рядом причин, включая плохую калибровку на заводе-изготовителе, трудности при наземной проверке радиозондов определенных типов и недостаточную компенсацию температуры во время подъема радиозонда. Погрешности измерения давления радиозондом обычно находились в пределах от 1 до 4 гПа. Результаты сравнений с данными о высотах, полученными с помощью радиолокаторов, позволяют предположить, что у ранее выпускавшихся радиозондов с аналогичными типами датчиков погрешности были более значительными, чем те, что приведены в таблице 12.5.

Радиозонды Vaisala RS80, VIZ MKII, Graw DFM-97 и Meisei RS2-91 все имеют емкостные анероидные датчики, но различной конструкции. Погрешности радиозонда при использовании емкостных анероидов значительно меньше, чем при использовании анероидов других типов, и составляют обычно менее 1 гПа почти при любом давлении. Однако для емкостных анероидных коробок характерны значительные систематические погрешности, особенно при изменениях внутренней температуры радиозонда и температурных градиентов по всему датчику и связанной с ним электроникой. Возникающая в результате систематическая погрешность может быть больше, чем изменение в работе датчика от полета к полету. Систематическая погрешность емкостных анероидов обычно не превышает ±1,5 гПа при высоком давлении и ± 1,0 гПа при очень низком давлении. Однако погрешности могут быть более значительными, если датчики давления испытывают очень большой термический удар при запуске радиозонда. Это может происходить в полярных районах, когда радиозонд перед запуском не прошел надлежащей акклиматизации к внешним условиям.

Радиозонд Vaisala RS92 имеет кремниевый микроэлектронный датчик и не подвержен воздействию термического удара, поэтому у него незначительная систематическая погрешность.

Значения погрешностей системы MP3 представлены в таблице 12.5 для данных о давлении, рассчитанных на основе вспомогательных высот, полученных с помощью вторичных радиолокаторов, а не для прямых измерений датчиком давления. Участвовавшие в сравнении российские радиолокаторы находились в оптимально исправном состоянии. Качество измерения давления по данным о высоте, получаемым радиозондами GPS, было показано во время международных сравнений радиозондов ВМО на Маврикии благодаря способности радиозондов GPS измерять высоту с помощью сигналов GPS. Совершенно очевидно преимущество радиозондов GPS в измерении давления по сравнению с данными, рассчитанными на основе высот, полученных с помощью вторичных радиолокаторов.

О последствиях погрешностей в измерении давления, представленных в таблице 12.5, для сообщаемых данных о температуре можно судить по тому факту, что погрешность измерения давления в 1 гПа приводит к ошибке в данных о температуре, равной в среднем –0,1 К на уровне 900 гПа, –0,3 К в верхней

тропосфере (на уровне 200 гПа в тропиках), ±0,5 К на уровне 30 гПа (с изменением зависимости от летних или зимних условий примерно на 55° с. ш.) и до, по меньшей мере, 1 К для большинства ситуаций на уровне 10 гПа.

12.8.3 Погрешности измерения температуры

12.8.3.1 Калибровка

В таблице 12.6 в обобщенном виде представлена сравнительная точность датчиков для измерения температуры при измерениях в ночное время в ходе проводившихся международных сравнений радиозондов ВМО и соответствующих испытаний. Представленные результаты соответствуют типичным характеристикам, усредненным минимум по 15 испытательным полетам. В качестве образцового прибора использовался трехтермисторный датчик NASA-ATM с использованием цилиндрических термисторов, откалиброванных фирмой VIZ Inc. Абсолютная неопределенность этого образцового прибора составляет, вероятно, примерно 0,2 К. В тех случаях, когда тип датчика характеризуется диапазоном систематических погрешностей, этот диапазон представляет собой разброс в систематических расхождениях, наблюдавшихся в ряде испытаний.

Таблица 12.6. Оценки систематической ошибки и ошибки радиозонда (доверительный интервал из двух среднеквадратических отклонений) для выбранных датчиков температуры в ночное время, полученные в ходе проводившихся под эгидой ВМО международных сравнений радиозондов и соответствующих испытаний (с использованием характеристик трехтермисторного датчика NASA-ATM в качестве произвольного эталона для оценок систематической ошибки)

Датчик температуры	*Систематическая ошибка (К) на уровне 300 гПа*	*Систематическая ошибка (К) на уровне 100 гПа*	*Систематическая ошибка (К) на уровне 30 гПа*	*Систематическая ошибка (К) на уровне 10 гПа*	*Ошибка радиозонда (К) на уровне 30 гПа*	*Ошибка радиозонда (К) на уровне 10 гПа*
Термоконденсатор, алюминированный Vaisala RS80	0,2…0,5[a] 0,2…0,5[b] 0,9…1,2[c]	0,2…0,5[a] 0,2…0,5[b] 1,0…1,3[c]	0,2…0,5[a] 0,5…0,8[b] 1,0…1,3[c]	0,3…0,8[a] 0,7…1,2[b] 1…1,5[c]	0,2	0,4
Проволочный термоконденсатор, алюминированный Vaisala RS92	< 0,2	< 0,3	< 0,2	< 0,3	0,2	0,2
Стержневой термистор, окрашенный в белый цвет, VIZ	–0,3…0,2	–0,4…0,3	–0,7…0,3	–2,2…–0,6	0,4	0,6
Трехтермисторный датчик NASA-ATM, калиброванный VIZ	Эталон (условный)	Эталон (условный)	Эталон (условный)	Эталон (условный)	0,2	0,2
Термистор с интегральной схемой, алюминированный Sippican MKII	< 0,2	< 0,3	< 0,2	< 0,3	0,2	0,4
Небольшой стержневой термистор, алюминированный, Meisei RS2-91	–0,3…0	±0,2	±0,2	–0,4…0	0,2	0,4
Стержневой термистор, окрашенный в белый цвет MRZ (Российская Федерация)	0,2	0,2	–0,3	–0,8	1	1
Небольшой бусинковый термистор, окрашенный в белый цвет, MODEM (тропики)	–0,4… 0	±0,2	–0,5…–0,8	–1,6…–1,8	0,5	0,9
Биметаллическая спираль плюс защита от излучения, SMG, Китай	0,2	0,2	–0,3	–1,8	0,8	2

a Данные о температуре RS80, не измененные во время обработки данных, как в схеме корректировки V93.

b Данные о температуре RS80, измененные во время обработки данных с использованием схемы корректировки V86.

c Данные о температуре RS80, измененные во время обработки данных с использованием схемы корректировки V80.

Погрешности калибровки датчика температуры во время подъема радиозонда могут быть вызваны погрешностями калибровки на заводе-изготовителе. Могут также возникать небольшие изменения в датчиках или в электрических контактах датчика, а также нестабильность в работе системы преобразователя радиозонда и в опорных резисторах во время хранения или подъема радиозонда. Смещение показаний датчика или электронного преобразователя в ходе хранения может быть, как правило, частично откорректировано во время обработки данных с использованием поправок, основанных на предполетных проверках. Представленные в таблице 12.6 различия между показаниями алюминированных датчиков (т. е. Vailasaa RS80 без корректировки при помощи программного обеспечения, Meisei RS2-91, Sippican MKII) и образцовым прибором предположительно являются просто результатом ошибок калибровки или некоторой нестабильности работы электрических подводов к датчикам.

Погрешности радиозонда в таблице 12.6 приведены только для значений давления на уровнях 30 гПа и 10 гПа, поскольку при использовании большинства современных датчиков температуры погрешности радиозонда незначительно изменяются между поверхностью Земли и уровнем 30 гПа.

12.8.3.2 Тепловая инерция

Инерционность большинства современных радиозондовых датчиков температуры (за исключением тонкопроволочных сопротивлений, термопар и очень маленьких элементов термисторов или термоконденсаторов) достаточно велика, чтобы проводить корректировку для получения необходимой оптимальной точности. Погрешности, обусловленные тепловой инерцией $\in_{\tau}$, для скорости подъема радиозонда V, при условии постоянного градиента температуры dT/dz для датчика с инерционностью r описываются следующей формулой:

$$\in_{\tau} = -\tau \cdot V \cdot dT/dz \qquad (12.8)$$

В нижней тропосфере $V \cdot (dT/dz)$ часто составляет приблизительно –0,03 К/с, т. е. инерционность, равная 3 с, приведет к динамической погрешности, равной приблизительно 0,1 К. В верхней тропосфере $V \cdot (dT/dz)$ часто составляет примерно –0,05 К/с, т. е. инерционность, равная 5 с, приведет к динамической погрешности, равной примерно 0,25 К. При значительно более низком давлении, примерно 10 гПа, V · (dT/dz) в слое толщиной 1 км может составлять около 0,015 К/с, т. е. инерционность, равная 18 с для датчика температуры, приведет к динамической погрешности в данных о средней температуре слоя, равной примерно –0,3 К. При значительных инверсиях температуры градиент температуры может превышать 4 К на 100 м.

Таким образом, в короткие периоды во время подъема погрешности измерений температуры могут быть гораздо больше, чем значения, приведенные выше для слоев толщиной 1 км.

Величины постоянной времени, использованные в приведенных выше примерах, являются типичными для широко распространенных датчиков радиозондов. Постоянные времени ответной реакции биметаллических датчиков и термисторов, использовавшихся Российской Федерацией в проводившихся сравнениях радиозондов ВМО, могут быть как минимум в два раза больше, чем приведенные выше значения.

12.8.3.3 Теплообмен в инфракрасной области спектра

Многие белые краски, используемые для радиозондовых датчиков, обладают сравнительно высокой эмиссионной способностью в инфракрасной области спектра (>0,8 мкм). Поэтому теплообмен с фоновым инфракрасным излучением может приводить к возникновению значительных погрешностей в значениях температуры. Восходящий поток инфракрасного излучения, попадающий на датчик, состоит из излучения поверхности Земли и атмосферных слоев, находящихся под радиозондом. Нисходящий поток инфракрасного излучения обычно гораздо меньше по величине и состоит из атмосферного излучения слоев, находящихся над радиозондом. Потоки инфракрасного излучения изменяются по мере подъема радиозонда. Для некоторой заданной вертикальной структуры поля температуры потоки инфракрасного излучения также будут существенно различаться от полета к полету, в зависимости от наличия облачности в районе подъема радиозонда.

В случае когда инфракрасное излучение датчика уравновешивается поглощаемым им инфракрасным излучением окружающей атмосферы, датчик находится в радиационном равновесии и, следовательно, обеспечивает правильные измерения. Температура равновесия в ситуациях, когда количество облаков невелико, уменьшается по мере подъема радиозонда. В стратосфере температура радиационного равновесия обычно приближается к –60 °C в условиях небольшой облачности верхнего и среднего яруса, хотя точные значения изменяются в зависимости от температуры поверхности, состояния поверхности и влажности в тропосфере. Таким образом, когда температура в стратосфере приближается к –60 °C, погрешности, обусловленные инфракрасным излучением, обычно незначительны.

Погрешности, возникающие под влиянием инфракрасного излучения, характерны для наблюдений как в дневное, так и в ночное время, хотя рассматриваемые здесь примеры будут ограничены только наблюдениями в ночное время, чтобы облегчить определение погрешностей. Систематические ошибки в климатологических средних, полученных по данным радиозондов с термисторами, покрытыми белой краской, будут зависеть от средней температуры воздуха и, следовательно, для крупных национальных аэрологических сетей будут изменяться в зависимости от широты, долготы и величины среднего покрытия облаками. О влиянии погрешностей, возникающих в результате теплообмена в инфракрасной области спектра в ночное время, можно судить по данным измерений, проводившихся с помощью VIZ, MODEM и российских термисторов, которые представлены в таблице 12.6. При высоком давлении значения температуры, полученные с помощью этих датчиков, близки к образцовым. Однако при низком давлении измеренные значения температуры гораздо ниже, чем образцовые. По данным рассматриваемых испытаний при давлении ниже 30 гПа температура радиационного равновесия в ночное время была обычно значительно ниже фактической температуры атмосферы. Следовательно, инфракрасное излучение датчика температуры превышало инфракрасное излучение, поглощавшееся датчиком из окружающей атмосферы, и этот датчик охлаждался до температуры ниже фактической.

При очень низкой температуре атмосферы температура радиационного равновесия в ночное время может быть выше температуры атмосферы. В этом случае датчик температуры излучает меньше инфракрасной радиации, чем поглощает из окружающей атмосферы, и полученные с помощью датчика значения будут превышать фактическую температуру. В тропиках можно ожидать возникновения положительной погрешности, равной по меньшей мере 0,5 К, в случаях когда температура в слоях около тропопаузы понижается до –80 °C и менее, особенно при небольшом количестве облаков верхнего яруса. При испытаниях на Британских островах положительные значения погрешности температуры, превышающие 0,5 К, отмечались при давлении ниже 30 гПа при полетах, когда температура воздуха составляла менее –75 °C. При температуре –40 °C на уровне 10 гПа погрешности аналогичных датчиков составляли примерно –1,7 К.

Из таблицы 12.6 видно, что для окрашенных в белый цвет цилиндрических термисторов и MODEM термисторов характерны более значительные колебания в систематических погрешностях в ночное время и более значительные погрешности радиозонда, чем для датчиков Vaisala RS92, RS80 и Sippican MKII. Это можно объяснить, главным образом, изменчивостью погрешностей, возникающих в результате теплообмена инфракрасным излучением, от одного испытания к другому, а не более значительной изменчивостью калибровки на заводе-изготовителе. Во время испытания в Соединенном Королевстве изменчивость погрешности окрашенного в белый цвет цилиндрического термистора составляла до 0,5 К за счет изменчивости количества облаков верхнего яруса, тогда как структура распределения температуры в атмосфере незначительно изменялась во времени (ВМО, 1994*b*). Инфракрасное излучение настолько сильно изменяется от полета к полету в зависимости от облачного покрова и температуры поверхности Земли, что очень трудно корректировать погрешности каждого отдельного полета без применения моделей полного радиационного переноса.

Теплообмен в инфракрасной области спектра также оказывает влияние на результаты измерений датчиками, установленными в шахтах или под радиационной защитой, когда внутренние поверхности шахт окрашены в черный цвет. Черные поверхности шахт охлаждаются или нагреваются под воздействием инфракрасного излучения таким же образом, как и описанные выше датчики, окрашенные в белый цвет. Температура воздуха, проходящего через шахту, меняется при соприкосновении с черными поверхностями. Затем часть этого воздуха обтекает датчик температуры. Возникающая в результате погрешность измерения температуры представляется аналогичной по знаку и величине погрешностям окрашенных в белый цвет цилиндрических термисторов (см., например, данные о погрешностях биметаллического датчика в радиозонде SMG, Китай, в таблице 12.6).

12.8.3.4 **Разогрев солнечной радиацией**

Для всех радиозондовых датчиков температуры характерны погрешности, связанные с разогревом при полетах в дневное время под воздействием солнечной радиации. На практике до сих пор не удалось создать устройство и отражающие покрытия, обеспечивающие полную защиту от излучения. Поэтому нельзя не учитывать систематические ошибки, возникающие в результате разогрева солнечной радиацией, попадающей на датчик либо непосредственно, либо после многократных отражений внутри радиационной защиты. При обработке данных в целях компенсации этого разогрева для большинства современных систем применяется коррекция с помощью специального программного обеспечения. Эти корректирующие схемы обычно разрабатываются на основе специальных

исследований расхождения дневных и ночных температур (с учетом реального суточного колебания температуры, вызываемого атмосферными приливами), в сочетании с данными моделей солнечного разогрева. Затем соответствующая поправка выражается как функция высоты солнца во время подъема радиозонда. При коррекции можно также учитывать действительную скорость подъема радиозонда, поскольку погрешности, вызванные вентиляцией и разогревом, изменяются, если скорость подъема радиозонда отличается от стандартных условий испытания. При малой высоте солнца (менее 10°) погрешности, обусловленные разогревом, очень чувствительны к ее изменениям. Поэтому в случае, когда корректирующее программное обеспечение не предусматривает обновления данных о высоте солнца во время полета радиозонда, возникают значительные погрешности при коррекции данных, полученных при полетах во время восхода или захода солнца.

Простая схема поправок будет эффективно работать только для определенных условий облачности и состояния поверхности и не сможет обеспечить надлежащей коррекции для всех условий полетов, которые могут возникнуть: например, при запуске радиозондов из прибрежных пунктов они нередко оказываются над морем. При ясном небе низкое альбедо поверхности моря приводит к уменьшению отраженной солнечной радиации в два-три раза по сравнению с усредненными атмосферными условиями во время полета. При таких обстоятельствах поправки, предусмотренные в программном обеспечении и основанные на усредненных условиях, будут завышены минимум на 20 %. С другой стороны, при подъеме радиозондов сквозь мощные слои облаков верхнего яруса с очень высоким альбедо обратное рассеяние может быть гораздо больше, чем обычно, и поправки, предусмотренные программным обеспечением, будут недостаточны.

Таблица 12.7. Расхождения между дневной и ночной температурами для выбранных типов радиозондовых датчиков и оценки ошибок зондирования температуры в дневное время (доверительный интервал в 2 среднеквадратических отклонения) при углах возвышения солнца более 20°

Датчик температуры	*Расхождения (К) между дневной и ночной температурами на уровне 300 гПа*	*Расхождения (К) между дневной и ночной температурами на уровне 100 гПа*	*Расхождения (К) между дневной и ночной температурами на уровне 30 гПа*	*Расхождения (К) между дневной и ночной температурами на уровне 10 гПа*	*Ошибка (К) радиозонда в дневное время на уровне 30 гПа*	*Ошибка (К) радиозонда в дневное время на уровне 10 гПа*
Термоконденсатор, алюминированный Vaisala RS92	0,15	0,3	0,4	0,6	0,3	0,6
Термоконденсатор, алюминированный Vaisala RS80	0,9	1,3	2,2	2,8[b]	0,6	1
Термистор с интегральной схемой, алюминированный Sippican	0,5	0,7	1,1	1,3	0,3	0,6
Стержневой термистор, окрашенный в белый цвет VIZ[a]	0,4	1	1,6	2,5	0,8	1,2
Небольшой стержневой термистор, алюминированный Meisei RS2-91	0,6[b]	1,3[b]	2,0[b]	2,5[b]	0,9	1,3
Стержневой термистор, окрашенный в белый цвет, MRZ, Российская Федерация	1[b]	1,8[b]	3,3	5,1	1,2	1,4
Биметаллическая спираль с защищающим от излучения экраном, SMG, Китай	0,8[b]	1,3[b]	3,4[b]	9,9[b]	1,4	3

a Данные измерений, как правило, не корректируются при помощи программного обеспечения перед рассылкой пользователям (начиная с мая 1996 г.).

b Значения, использованные в схеме поправок в программном обеспечении во время проведения под эгидой ВМО международных сравнений радиозондов; прочие значения определены при прямых сравнениях с данными измерений трехтермисторным датчиком NASA-ATM.

В таблице 12.7 в обобщенном виде представлены погрешности измерений в дневное и ночное время, присущие большинству наиболее часто используемых типов радиозондов. Это либо значения, используемые в корректирующих схемах в программном обеспечении, либо экспериментальные оценки, полученные при проведении сравнений радиозондов, включая сравнения с данными измерений трехтермисторным датчиком NASA-ATM. Фактические значения, соотнесенные с данными измерений NASA, представлены с точностью 0,2 К при высоком давлении и 0,3 К при наиболее низком давлении.

Стандартизированные схемы поправок, применяемые в программном обеспечении, как указано выше, обладают предполагаемой неопределенностью 20 процентов. Это является результатом возможного изменения величины отраженной радиации в связи с изменением альбедо облаков и поверхности Земли. Соответствующая неопределенность систематических ошибок температуры, скорректированных с учетом нагревания солнцем, составит как минимум 0,2 К на уровне 100 гПа и 0,5 К на уровне 10 гПа для большинства датчиков, представленных в таблице 12.7. Нагревание солнцем датчиков Vaisala RS92 и чиповых термисторов Sippican в два-четыре раза меньше, чем у самых лучших устаревших датчиков, представленных в таблице 12.7. Это стало возможным благодаря производству датчиков меньшего размера, имеющих более быструю ответную реакцию при одновременном сохранении низкой поглощательной способности в видимой части спектра, присущей современным датчикам.

Поправки, которые необходимо вводить при низком давлении, для российской и китайской систем гораздо больше, чем поправки для других систем. Характеристики погрешностей многих типов радиозондов, которые начали использоваться еще до 1980 г., аналогичны характеристикам погрешностей китайского датчика. Более значительные погрешности, вызываемые разогревом, в радиозондах более старых типов связаны с более высокой поглощающей способностью в видимой части спектра использовавшихся датчиков и их держателей по сравнению с поглощающей способностью большинства современных датчиков. Поэтому для датчиков более старых типов требовалась радиационная защита. Во время подъема радиозонды вращаются и раскачиваются, как маятник, подвешенный к газонаполненной оболочке, и поэтому воздух, нагревающийся при соприкосновении либо с держателями датчика, либо с внутренними поверхностями радиационной защиты, либо с корпусом радиозонда, время от времени обтекает датчики, смонтированные под радиационной защитой. Этот непрямой разогрев быстро возрастает по мере уменьшения давления в стратосфере.

Разогрев большинства датчиков солнцем также в значительной степени изменяется в зависимости от положения датчика по отношению к солнцу. Для всех радиозондов изменение от полета к полету как положения датчиков относительно солнца, так и отраженной радиации приводили к возникновению случайной составляющей систематической погрешности радиозонда, значения которой были больше в дневное время, чем в ночное. Кроме того, многие производители не устанавливают температурные датчики над его держателем. В этом случае при перемещении радиозонда в полете в некоторых положениях воздух проходит над держателем и только затем попадает на датчик, что приводит к появлению положительных всплесков в показаниях температуры, передаваемых радиозондом. Такие всплески могут достигать 1° С на уровне 10 гПа. Эти всплески, вызванные разогревом, могут быть легко выявлены в ходе полета радиозонда на подвесках, используемых в международных сравнениях радиозондов ВМО, поскольку радиозонды вращаются во время полета определенным закономерным образом. В этой ситуации применение соответствующих методов фильтрации полученных значений температуры может устранить до некоторой степени такие положительные всплески.

12.8.3.5 Осаждение льда или воды на датчике

Еще одним источником возникновения погрешностей при измерении температуры является осаждение воды или льда на датчике температуры. Это явление ведет к психрометрическому охлаждению (эффект смоченного термометра) датчика температуры, как только относительная влажность атмосферы при подъеме радиозонда становится ниже 100 процентов. Если датчик устроен так, что вода или лед скапливаются на нем, вместо того чтобы быстро удаляться, то значительная часть данных измерений температуры во время подъема может оказаться искаженной. В ночное время наличие слоя льда на датчике приводит к тому, что алюминированный датчик начинает вести себя как окрашенный в черный цвет датчик в инфракрасной области спектра, что при низком давлении приводит к значительному охлаждению в обычно наблюдающихся условиях.

Более того, в случае когда вода, накопившаяся на датчике, замерзает по мере попадания датчика в более холодные слои воздуха, выделение скрытой теплоты приводит к повышению температуры до 0 °С. Если датчик сначала покрывается льдом, а затем перемещается в более теплые слои воздуха, температура не поднимется выше 0 °С до тех пор,

пока лед не растает. Таким образом, к результатам измерений близким к 0 °C во влажных условиях в изотермических слоях следует относиться с некоторой осторожностью.

12.8.4 Погрешности измерений относительной влажности

12.8.4.1 Калибровка

Погрешности в данных измерений относительной влажности могут возникать из-за изменений калибровки при хранении датчиков. Такая проблема более характерна для датчиков относительной влажности, чем для датчиков температуры или давления. Обязательно следует тщательно выполнять инструкции изготовителя в отношении хранения датчиков и их подготовки к использованию.

В ходе изготовления калибровка индивидуальных датчиков часто осуществляется лишь при нескольких (менее трех) заранее установленных значениях относительной влажности и, возможно, лишь при одном значении температуры (см., например, работу Wade, 1995). Во многих случаях температурная зависимость калибровки датчика не проверяется для отдельных датчиков или партий датчиков, а считается соответствующей характеристике, определенной в ходе ограниченного числа испытаний. Калибровка датчиков относительной влажности из различных партий часто различается на несколько процентов, как это можно видеть из данных измерений в облаках нижнего яруса (Nash, Elms and Oakley, 1995). Это может быть результатом неправильной процедуры калибровки во время изготовления датчиков. Например, характеристики реального датчика в какой-либо выбранной партии могут отличаться от стандартных характеристик калибровки, соответствующих предварительно установленным в ходе испытаний значениям влажности. С другой стороны, это может быть результатом различий в стабильности датчиков из разных партий во время хранения.

В таблице 12.8 в обобщенном виде представлены данные о систематических расхождениях между наиболее широко используемыми датчиками, которые испытывались во время проводившихся Международных сравнений радиозондов ВМО. С более подробными результатами проводившихся ранее тестов можно ознакомиться в работе Nash, E1ms and Oakley, (1995). В сравнениях, проводившихся до 2000 года, использованные данные ограничиваются только теми полетами, при которых радиозонды не проходят слой облаков нижнего яруса. Следовательно, эти датчики не увлажняются и не испытывают искажений в показаниях под воздействием атмосферных осадков. В более поздних сравнениях полученные результаты для большинства условий в атмосфере могут быть объединены, поскольку большинство датчиков демонстрировали улучшение стабильности показаний и защиты от искажения показаний в облаке. Представленные здесь результаты ограничиваются также только ночными полетами с целью избежания последствий, вызываемых разогревом солнцем.

Данные сравнений, представленные в таблице 12.8, ограничены значениями температуры выше –20 °C. В данном случае инерционность тонкопленочного емкостного датчика и угольного гигристора аналогичны друг другу и достаточно малы для того, чтобы избежать значительной систематической погрешности в результате медленного реагирования датчика. Датчик с животной пленкой может достаточно быстро реагировать на резкие изменения относительной влажности в этом диапазоне температур. Тем не менее, очень медленное реагирование датчика при высокой и низкой влажности вносит свой вклад в систематические расхождения, приведенные в таблице 12.8.

Характеристики датчика Vaisa1a RS80 A-Humicap использовались в качестве образцового прибора, связывающего между собой данные ранее проведенных испытаний, представленных в таблице 12.8, с данными недавних испытаний в Бразилии и на Маврикии, где также использовался в качестве рабочего образца конденсационный гигрометр Meteolabor «Snow White». Погрешность датчика RS80-A определялась из показаний, полученных во время лабораторных испытаний ограниченного числа датчиков, и определении качества оперативных измерений в облаках нижнего яруса. Было бы неразумно считать, что предполагаемая средняя характеристика условного образцового прибора приближается более чем на ± 3 % относительной влажности к действительным абсолютным погрешностям измерений радиозондов.

Угольный гигристор VIZ MKII меньше по размеру, чем используемый в радиозонде VIZ 1392 угольный гигристор. По информации производителя, эти два датчика используют разные алгоритмы представления калибровочных характеристик.

Результаты, представленные в таблице 12.8, указывают на то, что для нескольких широко используемых датчиков необходимо пересмотреть применяемые в течение многих лет типичные функции преобразования, особенно для высоких и низких значений влажности (см. также Garand и др., 1992). Многие алгоритмы, используемые для описания работы датчика, могли бы быть пересмотрены (см.,

например Wade, 1994), поскольку автоматизированная обработка данных дает возможность использовать более сложные алгоритмы для представления калибровки датчика. В случае с датчиком Sippican, сейчас разрабатывается емкостной датчик, который придет на смену гигристору с угольным покрытием, и это было апробировано во время сравнений радиозондов ВМО на Маврикии.

Что касается тонкопленочного емкостного датчика Meisei, то после проведения сравнений радиозондов ВМО в Японии были внесены изменения в его конструкцию, чтобы устранить небольшое занижение показаний при высокой относительной влажности, и новый датчик был введен в эксплуатацию в 1999 г. на Маврикии. Алюминиевый защитный колпачок мог быть причиной небольшого занижения показаний из-за его высокой теплопроводности и препятствования вентиляции вокруг датчика. В апреле 2006 г. алюминиевый колпачок был заменен на пластиковый с низкой теплопроводностью для того, чтобы не допустить внутрь проникновение тепла, и внутренний диаметр колпачка был увеличен для улучшения вентиляции датчика.

Точность калибровки при высокой влажности чрезвычайно важна для пользователей, которые хотят вводить информацию, получаемую с радиозондов, в модели численного прогноза погоды. Точность калибровки при низкой относительной влажности очень важна для климатологии и научных исследований.

Для того чтобы получить данные оперативных измерений хорошего качества, операторы должны тщательно проверить оперативные характеристики датчиков относительной влажности во время подготовки радиозонда к запуску. Для тонкопленочных емкостных датчиков важно удалить химическое загрязнение перед их использованием, за исключением случаев, когда предполагается, что датчики сохранились незагрязненными за время хранения радиозондов после их получения от производителя. Операторы должны также регистрировать данные измерений относительной влажности, сообщаемые с радиозондов во время прохождения ими слоя облаков нижнего яруса. Эту информацию необходимо отсылать обратно поставщикам приборов, чтобы они могли осуществить коррекцию в случае, если калибровка датчика окажется явно неверной при высокой влажности.

Погрешности радиозондовых измерений влажности часто не являются постоянными по всему диапазону относительной влажности. Калибровку датчика Vaisala, используемую во время полета радиозонда, корректируют путем наземной проверки при очень низкой влажности непосредственно перед запуском. Таким образом, измерения с помощью датчиков Vaisala более воспроизводимы от полета к полету при малых значениях относительной влажности. С другой стороны, процедура калибровки угольных гигристоров обеспечивает оптимальную точность при значениях относительной влажности, близких к 30 процентам. Погрешности радиозонда для VIZ угольных гигристоров обычно более значительны при очень низкой относительной влажности, чем при средней и высокой. Погрешности измерений с помощью радиозондовых датчиков с животной пленкой более значительны, чем погрешности измерений с помощью других датчиков, что частично объясняется большим значением постоянной времени и погрешностями, обусловленными гистерезисом, которые рассматриваются в следующей главе.

12.8. 4.2 Инерционность и гистерезис датчика

Из таблицы 12.4 видно, что инерционность почти всех чувствительных к влажности материалов больше оптимальной при низкой температуре в верхней тропосфере. При более высокой температуре в тропосфере инерционность датчиков, таких как датчик с животной пленкой и хлористо-литиевый датчик, также слишком велика, чтобы избежать систематических погрешностей в слоях с низкой или высокой влажностью. Однако при использовании тонкопленочных емкостных датчиков и угольных гигристоров большая инерционность приводит к значительным систематическим погрешностям измерений только при температуре ниже примерно –20 °C. Инерционность угольных гигристоров становится чрезвычайно высокой при температурах ниже –40 °C.

Тонкопленочные емкостные датчики могут сохранять способность проводить правильные измерения при температуре ниже –70 °C, даже несмотря на то, что при самых низких значениях температуры надежность калибровки в некоторой степени ухудшается. Например, при значениях относительной влажности от 30 до 70 процентов и температуре –60 °C значения относительной влажности, полученные с помощью тонкопленочных емкостных датчиков типа Vaisala RS92, на 14 процентов выше, чем значения, полученные с использованием тонкопленочных емкостных датчиков Vaisala типа A, что было продемонстрировано во время сравнения радиозондов ВМО в Бразилии. При более высокой температуре различия показаний тех же датчиков не превышают нескольких процентов (см. таблицу 12.8). Среднеквадратическое отклонение расхождений данных измерений указанных датчиков при температуре –60 °C для рассматриваемого диапазона относительной влажности составило примерно 4 процента. Поправки на погрешность калибровки датчика A-Humicap были предложены в работах Милошевича и др. (2001) и Лейтерера (2005).

В связи с тем, что во время подъема радиозонда относительная влажность может несколько раз то повышаться значительно, то сильно понижаться, гистерезис датчика относительной влажности является более серьезной проблемой, чем датчиков давления или температуры. Для многих датчиков погрешности измерения относительной влажности, обусловленные гистерезисом, ограничены несколькими процентами, однако эти погрешности могут быть и более значительными, например, для датчика с животной пленкой. Погрешности, обусловленные гистерезисом, могут быть лишь частично уменьшены в результате тщательного выдерживания датчиков при их изготовлении.

12.8.4.3 Расхождения между температурой, полученной с помощью датчика, и фактической температурой атмосферы

Значение точки росы, передаваемое в радиозондовых сообщениях TEMP, рассчитывается по значению давления водяного пара в определенный момент времени полета радиозонда. Эти значения давления водяного пара обычно получают путем умножения давления насыщенного пара, рассчитанного по радиозондовому значению температуры, на измеренное с помощью радиозонда значение относительной влажности. Если температура датчика относительной влажности не соответствует температуре, полученной с радиозонда, то значение точки росы будет ошибочным. Это происходит как в дневное, так и в ночное время, если тепловая инерция датчика относительной влажности значительно больше, чем тепловая инерция датчика температуры. В случае когда в результате тепловой инерции датчика его температура отличается от действительной температуры атмосферы на 0,5 К при температуре, близкой к 20 °C, значение относительной влажности, сообщаемое датчиком, составит примерно 97 процентов действительного значения относительной влажности. В результате погрешность будет равна –1,5 процента при относительной влажности 50 процентов. По мере понижения температуры до –10 °C и затем до –30 °C такая же тепловая инерция датчика приведет к уменьшению сообщаемого значения относительной влажности соответственно до 96 процентов и затем до 95 процентов ее действительного значения.

Во время полетов в дневное время воздействие прямой солнечной радиации также может привести к значительному разогреву датчика относительной влажности. Кроме того, этот датчик может нагреваться косвенным образом, поглощая тепло из воздуха, который перед этим соприкасался с радиационной защитой или стенками шахты, нагретыми прямой солнечной радиацией. Brousaides и Morrissey (1974) количественно определили погрешности, которые могут возникать в результатах измерений с помощью радиозондов VIZ. Cole и Miller (1995) исследовали погрешности, которые могут возникать в тех случаях, когда радиозонды Vaisala RS80 запускаются в тропиках из плохо вентилируемых укрытий.

Наблюдавшиеся в дневное время расхождения между показаниями гигристора с угольным покрытием и тонкопленочного емкостного датчика в ходе проводившегося сравнения радиозондов ВМО на ранних этапах были очень близки к значениям, полученным в ночное время. Таким образом, поскольку для обоих типов датчиков неизбежны некоторые отрицательные погрешности датчика относительной влажности, вызываемые прямым или косвенным нагреванием от солнечной радиации, и величина этих погрешностей обоих типов датчиков примерно одинаковая.

Недавно проведенные сравнения с проводимыми в районе выпуска радиозонда наблюдениями методом дистанционного зондирования (микроволновыми радиометрами или измерениями водяного пара с помощью GPS) подтвердили, что существуют расхождения в измерениях относительной влажности современными радиозондами в дневное и ночное время, например, см. работы Тернера и др. (2003) и ВМО (2005b). Разница между измерениями в дневное и ночное время может также быть определена по данным недавних сравнений с помощью гигрометра Snow White, поскольку данные измерений этим гигрометром днем и ночью относительно хорошо согласуются между собой при температуре выше –50 °C. В тропиках разница между измерениями относительной влажности днем и ночью с помощью датчиков Vaisala RS80-A и RS90 в условиях высокой влажности сразу после запуска радиозонда составляла около 5 процентов значения относительной влажности (Сравнения радиозондов ВМО в Бразилии, 2002). Во время Международных сравнений радиозондовых систем повышенной точности ВМО на Маврикии (2005a) усовершенствовали покрытие поверхностей вокруг датчика Vaisala RS92 для уменьшения нагрева от воздействия солнечной радиации, в результате погрешность из-за солнечного нагрева составляла всего 2 – 3 процента вблизи поверхности земли и около 5 процентов на высоте 6 км. На высоте 11 км при температуре –40 °C разница между измерениями в дневное и ночное время датчиком Vaisala по сравнению с гигрометром Snow White увеличилась почти до 9 процентов.

12.8.4.4 Увлажнение или обледенение при прохождении через облака

Сравнение характеристик работы датчиков относительной влажности более старых типов после прохождения радиозонда сквозь облака нижнего

яруса или туман (когда внешние датчики температуры явно становятся влажными) показало, что систематические расхождения данных измерений датчиками при таких условиях отличаются от данных, представленных в таблице 12.8. В частности, систематические расхождения данных тонкопленочного емкостного датчика Vaisala и VIZ гигристора с угольным покрытием при относительной влажности от 0 до 70 процентов приводят к увеличению значения относительной влажности в среднем минимум на 10 % (Nash, Elms and Oakley, 1995). Для датчиков этих двух типов характерна возможность возникновения дополнительных погрешностей в условиях повышенной влажности, хотя механизмы возникновения этих погрешностей существенно различаются.

Тонкопленочные емкостные датчики Vaisala вместе с защитным колпачком, как правило, загрязняются до некоторой степени в облаках нижнего яруса. На выходе из облака в условиях сильного обледенения, датчики могут сообщить значение относительной влажности, которое выше действительного почти на 30 процентов. Положительные погрешности при загрязнении этого датчика обычно составляют от 1 до 20 процентов значения относительной влажности. В некоторых случаях процесс загрязнения может быть кратковременным и продолжаться всего лишь несколько минут, однако в других случаях это загрязнение может быть таким, что скажется на данных измерений даже в верхней стратосфере. Разогрев датчиков во время подъема быстрее устраняет такое загрязнение на датчике Vaisala RS92, несмотря на то, что версии датчика RS92 с нагреванием только до температуры –40 °C становятся загрязненными в облаках верхнего яруса, а версии с нагревом до –60 °C не испытывают такого сильного загрязнения. При температурах ниже –70 °C давление насыщенного водяного пара очень низкое, и для получения надежных данных измерений требуется выполнить большую работу для проверки необходимости устранения загрязнения датчиков при таких низких температурах.

Калибровка VIZ гигристоров с угольным покрытием не очень стабильна при выдерживании датчиков в лаборатории в условиях очень высокой относительной влажности в течение продолжительных периодов времени. Если эти датчики становятся влажными во время подъема радиозонда или если они подвергаются воздействию очень высокой влажности, получается, что после их выхода из облака их калибровка часто изменяется. Это изменение приводит к тому,

Таблица 12.8. Систематические расхождения и ошибки радиозонда (два среднеквадратических отклонения) различных датчиков относительной влажности в ночное время (за исключением подъемов через облака нижнего яруса) при температурах выше -20 C, полученные в ходе проводившегося под эгидой ВМО международного сравнения радиозондов и других соответствующих испытаний

Датчик влажности	*Систематические расхождения (80-90 % ОВ) (% ОВ)*	*Систематические расхождения (40-60 % ОВ) (% ОВ)*	*Систематические расхождения (10-20 % ОВ) (% ОВ)*	*Ошибка радиозонда (80-90 % ОВ) (% ОВ)*	*Ошибка радиозонда (40-60 % ОВ) (% ОВ)*	*Ошибка радиозонда (10-20 % ОВ) (% ОВ)*
Тонкопленочный емкостный датчик, Vaisala RS80, A-Hamicap (сухие условия)	–2 (предположительно)	–1 (предположительно)	2 (предположительно)	6	6	4
Тонкопленочный емкостный датчик, Vaisala RS80, H-Hamicap (сухие условия)	–1	0	0	6	6	4
Тонкопленочный емкостный датчик, Vaisala RS92, импульсный нагрев (все условия)	от 0 до -2	0	0	от 2 до 4	от 2 до 6	3
Тонкопленочный емкостный датчик, Meisei RS2-91 (все условия)	от–9 до 2	от–2 до 5	–2	6	от 6 до 8	6
Гигристор с угольным покрытием, VIZ MKII (все условия)	от 4 до 10	от–4 до 4	от–20 до 10	10	от 4 до 16	от 6 до 20
Тонкопленочный емкостный датчик, MODEM (все условия)	от 0 до 8	от 0 до 7	от 0 до 5	от 4 до 8	от 3 до 8	от 4 до 6
Гигристор с угольным покрытием, VIZ 1392 (сухие условия)	4	–3	12	8	8	12
Датчик с позолоченной пленкой, Российская Федерация + СК (сухие условия)	–8	–1	9	12	18	16

что значения относительной влажности, сообщаемые в оставшееся время полета, уменьшаются в среднем на 1 – 15 процентов по сравнению с показаниями в условиях низкой влажности.

Следовательно, к данным измерений относительной влажности в верхней тропосфере после того, как радиозонд прошел через слои облаков в нижней тропосфере, нужно относиться с большей осторожностью, чем к данным измерений, проведенных в условиях безоблачной атмосферы.

12.8.5 Ошибки программного обеспечения

При использовании программного обеспечения для обработки данных наземными радиозондовыми системами возникает большое число ошибок или недосмотров. Прежде чем ввести какое-либо программное обеспечение в действие или внести изменения, необходимо провести его тщательное тестирование.[4]

Операторы, работающие на станциях приема данных с радиозондов, должны иметь представление о том, что именно указывает на неправильные результаты. Некоторые ошибки возникают лишь при определенных метеорологических условиях. Так, может оказаться необходимым сбор данных о большом числе подъемов радиозондов, прежде чем станет ясен характер ошибок и пропусков. Для того чтобы эффективно определять ошибки, необходимо, чтобы операторы имели в своем распоряжении дисплейные устройства для доступа к комплексным интерактивным данным и к исчерпывающим архивным данным, полученным с радиозондов.

12.9 СРАВНЕНИЕ, КАЛИБРОВКА И ОБСЛУЖИВАНИЕ

12.9.1 Сравнения

Общее качество данных оперативных радиозондовых измерений геопотенциальной высоты (и, следовательно, данных измерений температуры, осредненной для слоя большой вертикальной протяженности) контролируется в определенных прогностических центрах путем сравнения со значениями геопотенциальных высот на стандартных изобарических поверхностях по данным краткосрочных (6 ч) прогнозов, полученных на основе глобальных моделей численного прогнозирования погоды для той же географической точки. Статистические характеристики обобщаются в виде ежемесячных осредненных данных, которые используются для определения как неудовлетворительного качества измерений, так и значительных систематических изменений в характеристиках радиозонда. Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды в Рединге (Соединенное королевство) является ведущим центром, назначенным в настоящее время Комиссией по основным системам ВМО для выполнения этой работы, однако аналогичные статистические данные подготавливают также и другие национальные прогностические центры.

Случайные погрешности в данных измерений геопотенциальной высоты (и, следовательно, температуры) также могут определяться на отдельных станциях на основе анализа изменений временных рядов данных измерений геопотенциальной высоты на уровне 100 гПа или при более низких значениях давления там, где межсуточная изменчивость атмосферы обычно незначительна. Сопоставимость результатов, полученных при использовании этого метода, и результатов, полученных при сравнении с полями краткосрочных прогнозов, приводится в публикации ВМО (WMO, 1989*b*).

Рабочие характеристики радиозонда или датчиков радиозонда могут быть исследованы в лаборатории, где имеются оборудованные надлежащим образом испытательные камеры, в которых температура и давление могут регулироваться для имитации условий полета радиозонда.

Подробное изучение рабочих характеристик датчиков температуры, давления и относительной влажности в полете лучше всего проводить при сравнении радиозондов, когда несколько типов радиозондов запускается вместе на одной газонаполненной оболочке. В дополнении 12.C приведены рекомендации по организации сравнений радиозондов и учреждению центров проведения испытаний. При испытаниях новых разработок радиозондов рекомендуется иметь как минимум два других типа радиозонда, с которыми можно было бы сравнить новую разработку радиозонда. Характеристики погрешностей этих других радиозондов должны быть уже установлены в ходе проведенных ранее испытаний. Идеальным для проведения сравнительных испытаний радиозондов мог бы стать полигон, где имеется возможность независимым методом измерять высоту, на которой находится радиозонд во время полета. Такие измерения можно проводить при помощи высокоточного радиолокатора (или ГСП приемника и процессора, позволяющих точно измерять высоту в полете вместе с радиозондами). Надежные измерения высоты дают возможность надежно оценить и систематическое отклонение в показаниях датчика давления. Это является

4 См. Рекомендацию 4 (КПМН-XII) двенадцатой сессии Комиссии по приборам и методам наблюдений, состоявшейся в 1998 г.

преимуществом, поскольку систематические погрешности многих широко используемых датчиков давления изменяются в определенной степени в зависимости от условий во время подъема радиозонда и срока хранения датчиков.

12.9.1.1 Оценка качества с использованием краткосрочных прогнозов

В лучших глобальных моделях численного прогноза погоды случайная ошибка в краткосрочных (6 ч) прогнозах геопотенциальных высот уровня 100 гПа составляет для большинства районов мира от 10 до 20 м. Эти ошибки соответствуют погрешности измерения средней температуры слоя от поверхности до уровня 100 гПа, равной 0,15 – 0,3 К. Таким образом, сопоставление с полями прогноза обеспечивает хорошую чувствительность при обнаружении ошибок измерения температуры в данных радиозондирования, если ошибки превышают примерно 0,3 К. При таком сравнении в качестве эталона используются прогностические поля вместо полей анализа. Прогностические поля в качестве эталона в меньшей степени подвержены влиянию со стороны систематических погрешностей в значениях геопотенциальной высоты радиозондовых измерений в заданном районе, чем поля метеорологического анализа. Однако для прогностических полей на срок шесть часов характерны небольшие систематические ошибки, и они не могут рассматриваться в качестве абсолютного эталона. Неопределенность систематической ошибки прогностического поля составляет не менее 10 м на уровне 100 гПа. Систематические различия прогностических данных разных прогностических центров от данных измерений для конкретной аэрологической станции колеблются, как минимум, в этих пределах. Кроме того, систематические ошибки прогностических полей по мере совершенствования прогностических моделей и методов усвоения данных со временем могут изменяться в тех же пределах. Как бы то ни было, сравнения с прогностическими полями в ведущих центрах оперативного мониторинга позволяют четко определить те аэрологические станции и те типы радиозондов, для которых характерны значительные систематические ошибки в радиозондовых сводках. В публикации ВМО (WMO, 2003*b*) приведен самый последний обзор радиозондовых погрешностей в глобальной сети для высот до 30 гПа.

12.9.1.2 Оценка качества с использованием временных рядов данных об атмосфере

Случайные погрешности радиозондовых измерений могут быть оценены на основе использования временных рядов данных измерений геопотенциальных высот в близко расположенных точках на таких изобарических поверхностях, где геопотенциальные высоты со временем изменяются медленно. Подходящими изобарическими поверхностями являются уровни 100, 50 или 30 гПа. Для данных радиозондовых наблюдений, проводимых с интервалами в 12 ч, это достигается путем расчета разности между данными наблюдений в +12 ч и значениями, полученными в результате линейной интерполяции по времени между данными наблюдений в 0 и +24 ч. Далее последовательно рассчитываются расхождения путем приращения с шагом 24 ч через весь временной ряд наблюдений. Найдя среднеквадратическое отклонение этих расхождений, можно получить оценку случайных погрешностей радиозондовых измерений. В течение большей части года для этой процедуры характерна высокая чувствительность к сравнению, проводимому с полями прогнозов. В качестве одного исключения можно назвать зимние условия в средних и высоких широтах, когда геопотенциальные высоты на уровне 100 гПа иногда изменяются очень быстро в течение короткого промежутка времени.

Средние значения расхождений, полученных из временных рядов, могут обеспечить информацию о расхождении дневных и ночных данных радиозондовых измерений температуры. Толкование расхождений данных день – ночь учитывает фактическую суточную изменчивость геопотенциальной высоты, вызываемую суточными и полусуточными приливами. Фактические значения таких расхождений между данными наблюдений в 1 800 ч и 0600 ч по местному времени в средних широтах для геопотенциальных высот на уровне 100 гПа могут достигать 30 м (Nash, 1984), в то время как фактические значения расхождений между данными наблюдений в 1 200 ч и 0000 ч местного времени составляют, как правило, примерно 0 ± 10 м.

Представляется полезным, чтобы каждая станция радиозондирования вела регистрацию изменений во временных рядах данных измерений геопотенциальной высоты на уровне 100 гПа и приращения геопотенциальной высоты (100 – 30) гПа. Это позволяет операторам проводить проверку на наличие крупных аномалий в данных измерений, получаемых по мере подъема радиозонда.

12.9.1.3 Сравнения радиозондов

Сравнения радиозондов позволяют провести независимое сравнение точности датчиков давления, температуры и относительной влажности на радиозонде в зависимости от времени.

Лабораторные испытания следует проводить с помощью средств, которые аналогичны средствам,

необходимым для проведения тщательной калибровки радиозондов изготовителем. Эти испытания можно использовать для проверки адекватности калибровки радиозондов, например зависимости калибровки от температуры датчика. Однако в лаборатории трудно воспроизводить реальные атмосферные условия для определения значений погрешностей, обусловленных излучением и увлажнением или обледенением датчиков. Такие погрешности лучше всего изучать при проведении сравнений во время реальных подъемов радиозондов.

Для сравнения данных измерений в процессе подъема радиозондов необходимо, чтобы получение данных от различных систем было как можно более точно синхронизировано, в идеальном варианте до ±1 с. В последние годы были разработаны пакеты программного обеспечения для проведения сравнений радиозондов под эгидой ВМО (WMO, 1996*b*). Они позволяют хранить все радиозондовые измерения в базе данных сравнений, и это дает возможность ученым, осуществляющим проект, сравнивать полученные данные сразу после проведения испытательного полета. Важно, чтобы данные изучались очень быстро во время испытания. Тогда можно быстро обнаруживать любую проблему, возникающую из-за процедуры испытания (например, создание радиозондами взаимных помех), или ошибок в работе самих радиозондов, и инициировать проведение надлежащих дополнительных исследований. Программное обеспечение также позволяет подготовить окончательные статистические данные о сравнении радиозондов в такой форме, которая подходит для публикации.

Начальный этап испытаний радиозондов новой конструкции не требует большого числа сравнительных полетов, поскольку основные недостатки могут быть обнаружены и при небольшом их числе. Однако по мере того как системы получают все более полное развитие, может оказаться обоснованным проведение более крупномасштабных исследований. Так как воспроизводимость результатов измерений большинства современных радиозондов улучшилась, стало возможным получить полезные данные о систематической погрешности измерений температуры и давления примерно за 10 – 15 полетов для одного параметра полета (например, в одно и то же время суток). Поскольку неправильно было бы предполагать, что в измерениях в дневное время при любой высоте солнца будут одинаковые систематические погрешности, желательно испытания проводить, по меньшей мере, в ходе 10 – 15 сравнительных полетов при одной и той же высоте солнца. Точность измерений датчика температуры лучше всего оценивать на основании результатов других испытаний путем сравнений, проводимых в ночное время. Эта оценка должна быть основана на результатах измерений с помощью радиозондов с проволочными или алюминированными датчиками, а не с датчиками, для которых характерны значительные погрешности в результате теплообмена в инфракрасном диапазоне. Если можно обеспечить проведение серии сравнительных полетов (чередующихся в дневное и ночное время), то можно использовать метод временных рядов данных об атмосфере для оценки величины расхождений в измерениях температуры в дневное и ночное время.

Как отмечалось ранее, самой масштабной серией сравнений, проведенных в последние годы, являются международные сравнения радиозондов ВМО. Первичные результаты были представлены в публикациях ВМО (WMO, 1987; 1991; 1996*a*; 2003*c*; 2005*a*). Результаты этих испытаний легли в основу информации, представленной в таблицах 12.5 – 12.8.

Первое международное сравнение радиозондов было проведено в Пайерне, Швейцария, в 1950 г. Средние систематические расхождения в данных измерения давления и температуры составляли 4 гПа и 0,7 К при случайных погрешностях (доверительный интервал в два среднеквадратических отклонения) 14 гПа и 2 К. Эти значения следует сравнить с результатами, полученными с помощью современных систем радиозондирования, которые представлены в таблицах 12.5 – 12.7. Результаты, полученные в ходе второго сравнения на том же полигоне в 1956 г., показали, что необходимо повышать точность за счет применения к показаниям температуры радиационной поправки. Погрешности измерения давления и температуры на уровне 50 гПа были довольно значительными для большинства радиозондов и быстро возрастали на более высоких уровнях, особенно в дневное время. В 1973 г. в Трапе, Франция, было проведено региональное сравнение. Это сравнение позволило выявить значительные погрешности калибровки некоторых радиозондов, причем погрешность измерения температуры одним биметаллическим датчиком в результате воздействия излучения достигала 10 К.

12.9.2 **Калибровка**

Прежде чем приобретать радиозонды в большом количестве, следует выяснить, какие методы калибровки применялись изготовителями. Кроме того, следует проверить адекватность процедур контроля качества, которые обеспечивают сохранение точности измерений при массовом производстве. Покупателям следует иметь в виду, что некоторые указанные уровни погрешностей и неполадки в работе могут быть неизбежны, если они хотят, чтобы цена на радиозонды оставалась приемлемой. Тем не менее, надежные изготовители должны гарантировать, что

показатель отказов в работе радиозондов во время полета не будет превышать 1 или 2 процента.

Если радиозондовые датчики не могут производиться крупными партиями с обеспечением необходимых для пользователей воспроизводимости и точности результатов, следует проводить калибровку приборов и датчиков на индивидуальной основе. Даже если датчики могут производиться крупными партиями, отвечая при этом требованиям принятой стандартной проверки точности измерений, необходимо проводить более тщательную проверку случайно выбранных репрезентативных образцов. В процессе калибровки следует по мере возможности воспроизводить условия полета в отношении давления и температуры. Калибровка должна, как правило, проводиться при падении давления и понижении температуры. Относительная влажность будет, вероятно, проверяться на отдельном устройстве. Образцовые датчики, используемые во время калибровки, должны сверяться с национальными контрольными приборами и проверяться через надлежащие интервалы времени в поверочных лабораториях. Образцовые приборы должны эффективно работать во всем диапазоне температур, характерных для радиозондовых измерений.

Конструкция устройства для калибровки зависит в значительной степени от того, должен ли радиозонд проходить калибровку в полной сборке как самостоятельная единица или же должны проверяться лишь блок датчиков или отдельные датчики отдельно от передатчика радиозонда. В последнем случае для калибровки можно использовать гораздо меньшее по размеру устройство. Средства для калибровки должны адекватным образом охватывать тот диапазон значений давления и температуры, с которым вероятнее всего придется столкнуться при проведении реального зондирования. В камере для калибровки должны поддерживаться условия, остающиеся стабильными при любом желаемом значении с точностью выше ±0,2 гПа/мин для давления, ±0,25 К/мин для температуры и 1 процент относительной влажности в минуту. Условия в камере для калибровки должны измеряться с систематическими погрешностями менее ±0,2 гПа для давления, ±0,1 К для температуры и ±1 процент относительной влажности. Для определения диапазона изменения температуры в пространстве, в котором находятся подвергаемые калибровке датчики, в камеру для калибровки следует помещать образцовые термометры. Диапазон изменения температуры не должен превышать 0,5 К. Необходимо проводить достаточное число измерений, чтобы калибровочные характеристики представляли функции преобразования датчиков с той точностью, которая необходима пользователям. Датчики давления, в которых изменения температуры компенсируются не в полной мере, должны проходить калибровку при нескольких значениях температуры. Таким образом, можно считать преимуществом возможность использования одной камеры как для калибровки температуры, так и для оценки датчиков давления.

Калибровка датчиков влажности проводится, как правило, в отдельном устройстве. Она может проводиться в камере, в которой вентилятор быстро прогоняет воздух мимо вентилируемого психрометра или гигрометра для измерения точки росы, а затем через один из четырех сосудов, содержащих соответственно теплую воду, насыщенные растворы нитрата натрия и хлорида кальция и силикагель. Любой из этих сосудов может подсоединяться к системе циркуляции при помощи комбинированного распределителя так, чтобы в камере легко можно было установить относительную влажность, равную 100, 70, 40 и 10 процентам. Среднеквадратическое отклонение изменения относительной влажности в пространстве, в котором датчики проходят калибровку, не должно превышать 1 процента.

Альтернативный вариант калибровки датчиков влажности предусматривает использование шахты или камеры, продуваемой смесью воздуха из двух сосудов, в одном из которых воздух увлажняется насыщенным водяным паром, а в другом осушается силикагелем, при этом относительная влажность смеси контролируется вручную при помощи клапана, регулирующего соотношение порций воздуха, поступающего в шахту.

Учитывая важность калибровки типа или партии радиозондов, Комиссия по приборам и методам наблюдений настоятельно призывает страны-члены проводить на национальном или региональном уровнях проверки отобранных образцов радиозондов в лабораторных условиях, для того чтобы убедиться в правильности калибровки, проведенной изготовителем.[5]

12.9.3 Техническое обслуживание и ремонт

Частота отказов в работе приемных станций, основанных на современной электронике, должна быть низкой при условии обеспечения надежной защиты от ударов молний вблизи антенн. Изготовитель должен

5 См. рекомендацию 9 (КПМН-XI), принятую Комиссией по приборам и методам наблюдений на её одиннадцатой сессии в 1994 г.

предоставить информацию о подходящем комплекте запасных частей для своей системы. Если в наземной системе выходит из строя какой-то модуль, он обычно заменяется запасным модулем, а неисправный возвращается производителю для ремонта.

Требования к техническому обслуживанию и ремонту радиозондовых систем, основанных на радиолокационных измерениях высоты вместо радиозондовых измерений давления, совершенно иные. В этом случае всегда должно обеспечиваться местное обслуживание на всей сети станций с помощью персонала, имеющего хорошую техническую подготовку (в области как механики, так и электрики). Такое обслуживание совершенно необходимо для обеспечения возможностей точно отслеживать радиозонд и во избежание долгосрочного дрейфа систематических погрешностей измерения высоты.

12.10 ВЫЧИСЛЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Никаких предписанных стандартных процедур для вычислений на основе данных радиозондовых наблюдений не существует. Основная проблема заключается в выборе уровней для точного и эффективного воспроизведения профилей температуры и влажности относительно геопотенциала на основе данных радиозондирования. Руководящие указания на этот счет приведены в публикации ВМО (1986) и в процедурах кодирования, принятых ВМО (1995) (код FM 35-X Ext. TEMP).

12.10.1 Процедуры вычислений и представления результатов радиозондовых измерений

Обычно данные аэрологических измерений вводятся в численные прогнозы погоды в виде ряда усредненных значений для слоев, при этом толщина слоя зависит от масштабов прогнозируемых атмосферных процессов. Середины слоев не обязательно соответствуют изобарическим поверхностям или стандартным высотам, но часто приводятся к уровням, которые изменяются по мере изменения приземного давления. Таким образом, изменение температуры и относительной влажности между стандартными уровнями в аэрологических сводках должно сообщаться с достаточной точностью для того, чтобы точность расчетов средних значений слоев, используемых в численных прогнозах, не снижалась в результате применения процедур для представления результатов радиозондовых измерений.

До 1980 г. большая часть данных радиозондовых измерений обрабатывалась операторами вручную с использованием различных вспомогательных средств. Эти методы были основаны на выборе для представления данных радиозондовых измерений ограниченного числа особых уровней, возможно, примерно 30 особых уровней для полета до высоты 30 км. В кодах ВМО отражены трудности, связанные с необходимостью сжатия большого количества информации о вертикальной структуре в короткое сообщение вручную. Правила кодирования допускали, чтобы данные о высоте, полученные путем линейной интерполяции между особыми уровнями, отличались от первоначальных данных измерений на величину до ±1 К для температуры и ±15 процентов для относительной влажности в тропосфере и до ±2 К для температуры в стратосфере. Предполагалось, что операторы не допустят значительных ошибок в интерполяции в слоях большой вертикальной протяженности.

Использование в современных наземных радиозондовых системах недорогих, но мощных вычислительных систем означает, что для архивации и обработки данных радиозондовых измерений можно использовать более частые измерения, чем при вычислениях вручную. Обработка данных радиозондовых измерений вручную почти всегда ведет к появлению дополнительных ошибок при расчетах аэрологических параметров, поэтому от ручной обработки данных следует отказаться как можно скорее.

Однако автоматизация процедуры выбора особых уровней для сообщений TEMP является неоднозначной задачей. Для существующих алгоритмов автоматизированной обработки аэрологических сводок часто характерны значительные недостатки. Так, например, когда имеется незначительное число явных отклонений в вертикальном профиле относительной влажности, использование автоматизированных систем часто приводит к тому, что ошибки, полученные при интерполяции температуры, распространяются на несколько километров по вертикали. Кроме того, алгоритмы часто допускают наличие существенных систематических расхождений между результатами измерений относительной влажности и фактическими данными измерений в слоях толщиной до 500 м. Это является неприемлемым для пользователей, особенно в отношении пограничного слоя атмосферы и в тех случаях, когда радиозонд проходит через облака. Данные, полученные в результате интерполяции между значениями, соответствующими уровням, на которых располагаются слои облаков, должны быть близки к максимальному значению относительной влажности, наблюдавшемуся в облаках.

Таким образом, операторам необходимо проверять сводки, поступающие от автоматизированных систем, чтобы установить, не вносят ли процедуры кодирования значительные систематические расхождения между данными аэрологических сводок и фактическими данными радиозондовых измерений. Для устранения систематических расхождений оператор может вводить дополнительные значимые уровни. Сообщения TEMP с приемлемыми систематическими ошибками часто получают путем внедрения в практику национальных сетей менее строгих, чем это принято в ВМО, ограничений для температуры, доходящих до половины значения. С другой стороны, развитие средств связи в метеорологии должно обеспечить сокращение применения методов округления при представлении данных аэрологических наблюдений в результате использования надлежащего сообщения в коде BUFR.

12.10.2 Внесение поправок

Из вышеизложенного должно быть ясно, что изменение характеристик датчика радиозонда, обусловленное большим диапазоном характеристик внешних условий при подъеме радиозонда, является слишком значительным, чтобы быть представленным простой калибровкой, проведенной при какой-либо заданной температуре. Современная обработка данных позволяет использовать для калибровки более сложные алгоритмы. Это обеспечивает измерения с большей точностью, чем при использовании систем обработки данных вручную. Очень важно, чтобы эти алгоритмы были надлежащим образом задокументированы. Пользователей следует всегда информировать о значительных улучшениях или изменениях алгоритмов. В архивных регистрационных записях, хранящихся на станциях радиозондирования, должны содержаться сведения об используемых радиозондах и основных алгоритмах, примененных при обработке данных.

Всем данным радиозондовых измерений температуры присущи ошибки, связанные с влиянием солнечной радиации. В большинстве случаев они не могут быть полностью компенсированы, поскольку зависят от распределения облачности, состояния поверхности, ориентации радиозонда во время подъема и высоты солнца относительно горизонта. Большинство пользователей вне метеорологических служб не знают о характерных погрешностях датчиков, используемых на национальных радиозондах. Поэтому рекомендуется при обработке данных всегда применять поправку на воздействие радиации (основанную на ожидаемой точности измерений датчика при обычных условиях). Подробные сведения об этой радиационной поправке следует регистрировать и хранить в архиве станции наряду с архивными записями соответствующих первоначальных полученных данных радиозондовых наблюдений, если этого требует национальная практика.

Особую проблему при внесении поправок представляют ошибки, связанные с теплообменом в инфракрасном диапазоне, поскольку эти ошибки зависят от температуры атмосферы. Ошибки, связанные с нагреванием солнцем, для металлических (например, алюминированных) датчиков и датчиков, окрашенных в белый цвет, аналогичны (см. таблицу 12.7). Таким образом, предпочтительно как можно скорее отказаться от использования белой краски с высокой излучательной способностью в инфракрасной части спектра в качестве покрытия датчиков вместо того, чтобы разрабатывать очень сложные схемы корректировки погрешностей на теплообмен в инфракрасном диапазоне.

Аналогичным образом нецелесообразно пытаться откорректировать необычайно большие ошибки, связанные с нагреванием под воздействием солнечной радиации, при помощи программного обеспечения, вместо того чтобы устранить дополнительные источники нагревания путем правильного размещения датчика по отношению к его опорам, соединительным проводам и корпусу радиозонда.

Учитывая важность способов внесения поправок, Комиссия по приборам и методам наблюдений[6] настоятельно призывает страны-члены:

(a) вносить поправки и предоставлять откорректированные аэрологические данные с различных аэрологических станций Глобальной сети наблюдений;
(b) извещать пользователей данных об изменениях в методологии, которая используется для внесения поправок в сводки, с тем чтобы они могли быть по желанию откорректированы;
(c) сохранять в архивах как откорректированные, так и неоткорректированные данные аэрологических наблюдений, и вести записи поправок, вводимых для климатологических применений; используемый метод должен быть определен на национальном уровне;
(d) информировать ВМО о применяемых методах внесения поправок.

6 См. рекомендацию 8 (КПМН-XI), принятую Комиссией по приборам и методам наблюдений на её одиннадцатой сессии в 1994г.

ПРИЛОЖЕНИЕ 12.А

ТРЕБОВАНИЯ К ТОЧНОСТИ (СТАНДАРТНАЯ ПОГРЕШНОСТЬ) АЭРОЛОГИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ СИНОПТИЧЕСКОЙ МЕТЕОРОЛОГИИ, ИНТЕРПРЕТИРОВАННЫЕ ДЛЯ ОПЕРАТИВНЫХ АЭРОЛОГИЧЕСКИХ И ВЕТРОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Переменная величина	*Диапазон*	*Требования к точности*
Давление	От поверхности до 100 гПа От 100 до 10 гПа	от 1 до 2 гПа на уровне 100 гПа 2 процента
Температура	От поверхности до 100 гПа От 100 до 10 гПа	0,5 K 1 K
Относительная влажность	Тропосфера	5 процентов
Направление ветра	От поверхности до 100 гПа	5° для скорости менее 15 м/с 2,5° при более высокой скорости
	От 100 до 10 гПа	5°
Скорость ветра	От поверхности до 100 гПа	1 м/с
	От 100 до 10 гПа	2 м/с
Геопотенциальная высота на уровне особых точек	От поверхности до 100 гПа	1 процент у поверхности, уменьшение до 0,5 процентов на уровне 100 гПа

ПРИЛОЖЕНИЕ 12.B

ПРЕДЕЛЫ ДОПУСТИМЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ ВЕТРА НА ВЫСОТАХ И РАДИОЗОНДОВЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ ТЕМПЕРАТУРЫ, ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ВЛАЖНОСТИ И ГЕОПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ВЫСОТЫ

ТАБЛИЦА 1. Перечень предельных значений погрешностей при работе оборудования для ветрового зондирования

Для изучения мезомасштабных систем на всех уровнях и в любой местности нижний предел (a), равный 0,5 м/с, считается приемлемым

Район	*Изобарическая поверхность, (гПа)*	*Высота изобарической поверхности (км)*	*Использование локальное*		*Использование в синоптических целях*		*Использование в климатических целях*		*Скорость ветра, при которой зондирующее оборудование должно функционировать*		*Примечания*
			(a)	*(b)*	*(a)*	*(b)*	*(a)*	*(b)*	*(a)*	*(b)*	
Внетропическая тропосфера			0,8 увеличение до 1,5 около тропопаузы	6 10a	1 увеличение до 2 около тропопаузы	4 7[b]	1 увеличение до 2 около тропопаузы	5[c] 10[c]	40[d] увеличение до 80[d] около тропопаузы	18[d] 37[d]	В отдельных районах могут потребоваться измерения при скорости ветра 50 м/с в нижней тропосфере и 150 м/с около тропопаузы
Экваториальная тропосферае			0,8 увеличение до 1,5[e] около тропопаузы	4 7[f]	1 увеличение до 2 около тропопаузы	3 6[g]	1 увеличение до 2 около тропопаузы	5[h] 5[h]	20 увеличение до 60 около тропопаузы	10 40	Требования о зондировании при тропических циклонах игнорируются
Внетропическая стратосфера	50 30 10 5 0,7	20 24 31 36 50	0,7 0,7 1 1,2 (1,5)	3[i] 2 3 3 4	0,7 0,7 1 1,2 (1,5)	5[j] 3,6 5,5 7 13	0,7 0,7 1 1,2 (1,5)	Очень изменчивое в зависимости от сезона,	75[k] 100[k] 200	Не определена	
Экваториальная стратосфера	50 31 11 5 0,7	20 24 31 36 50	0,7 0,7 1 1 1,5	5 5 2 10	7,7 0,7 1 1,2 1,5	5 5 10	0,7 0,7 1 1,2 1,5	5 5 10	40[l] 45[l] 100[l]	Не определена	Для исследовательских целей требуются профили ветра с высоким вертикальным разрешением при как можно меньших погрешностях наблюдений

[a] Наименее строгое предельное значение (b) равно 30 м/с (зима, Северная Атлантика).

[b] Наименее строгое предельное значение (b) равно 20 м/с (зима, Северная Атлантика).

[c] Эти предельные значения относятся к наименее строгим пределам (b) для систематической составляющей погрешности. Соответствующие значения для вектора среднеквадратического отклонения случайной погрешности составляет 10 м/с и возрастает до 15 м/с вблизи тропопаузы. Более строгие предельные значения (b) могут быть использованы во многих областях, для которых уже существуют большие массивы данных хорошего качества.

[d] Для средней скорости ветра в слое 0 – 40 000 футов (0 – 12 км) зимой; над южной Англией предел (a) равен 60 м/с, а предел (b) равен 27 м/с; над южной Японией, где отмечаются более суровые условия, предел (a) равен 80 м/с, а предел (b) равен 50 м/с.

[e] Возможно, небольшое увеличение или его отсутствие при увеличении высоты отмечается над значительным числом об-ластей, давая предел (a), равный 1 м/с в верхней тропосфере.

[f] Наименее строгое предельное значение (b) составляет 15 м/с (преимущественно зимой вблизи границы тропиков).

[g] Наименее строгое предельное значение (b) составляет 12 м/с (преимущественно зимой вблизи границы тропиков).

[h] Это наименее строгое предельное значение (b) для систематической погрешности. Соответствующее значение для вектора среднеквадратического отклонения случайной погрешности составляет 5 м/с и возрастает до 10 м/с в верхней тропосфере.

[i] Наименее строгие пределы (b) зимой равны 11 и 13 м/с на уровнях 50 и 30 гПа соответственно, от 20 до 25 м/с на уровнях от 10 до 5 гПа и даже большие значения на уровне 1 гПа. Эти значения относятся к короткому периоду осреднения (один месяц); большие значения относятся к осреднению за длительные периоды (например, периоды, включающие несколько зим), но распределение в таких выборках имеет тенденцию к мультимодальности.

[j] Наименее строгие пределы (b) зимой равны 6, 7, 10, 12 и 16 м/с на уровнях 50, 30, 10, 5 и 0,7 гПа соответственно.

[k] Для средней скорости ветра на высотах 0 – 100 000 футов (0 – 30 км) в худшие сезоны (зима) над южной Англией предел (a) равен 45 м/с, а предел (b) равен 26 м/с.

[l] Эти максимальные значения скорости ветра на отдельных уровнях не наблюдаются одновременно на всех уровнях. Эти значения представляют собой оценки самых сильных ветров, которые могут иметь место в периоды, когда 26-месячные и годовые колебания сочетаются, давая наиболее высокие средние значения скорости ветра. Средняя скорость ветра в слоях атмосферы существенно меньше, чем эти значения, из-за низкой корреляции между уровнями в атмосфере.

ПРИМЕЧАНИЯ:

Предел (a) – предельное значение погрешности, ниже которого не требуется усовершенствования процедуры измерения в рамках поставленной задачи.

Предел (b) – предельное значение погрешности, за рамками которого результатами измерений можно пренебречь для решения поставленной задачи.

(Значения существенно меняются в зависимости от сезона и местности; погрешности представлены вектором среднеквадратической погрешности с единицей измерения м с-1 за исключением случаев, где это оговорено иначе)

Если специально не оговорено иное, значения относятся к измерениям ветра, осредненным в слое толщиной 300 – 400 м в тропосфере и толщиной 600 – 800 м в стратосфере, середина которых совпадает с указанным в таблице уровнем.

ТАБЛИЦА 2. Перечень предельных значений погрешностей измерения температуры при аэрологическом зондировании

Район	*Изобарическая поверхность, (гПа)*	*Высота (км)*	*Использование*						*Диапазон значений температуры*	*Примечания*
			локальное		*в синоптических целях*		*в климатических целях*			
			(a)	(b)	(a)	(b)	(a)	(b)		
Внетропическая тропосфера			0,15	3,0[a] (2,0 на широте 30° – 40°)	0,15	2,0	0,15	2,0[b]	от –80 до +40	
Экваториальная тропосфера	Нижняя тропосфера		0,15	1,0	0,15	0,7	0,15	1,0[b]	от –100 до +40	
	Верхняя тропосфера		0,15	1,5	0,15	1,0	0,15	1,5[b]		
Внетропическая стратосфера	200		0,3	4[c]	0,3	3,8	0,3	1,5[f]	от –100 до +50	
	100		0,3	3	0,3	1,4	0,3	1,5		
	50		0,3	1,5	0,3	0,7	0,3	1,5		
	10		0,3	1,5	0,3	0,7	0,3	1,5		
	5		0,3	2[d]	0,3	0,9	0,3	2[c]		
	(5)	35	0,3	4[d]	0,3		0,3	4[c]		
		50	0,3	6[e]	0,3	2,0	0,3	6[d]		
Экваториальная стратосфера	100		0,3	2[g]	0,3	1	0,3	2[h]	от –100 до +20	26-месячный цикл температуры в средней стратосфере рассматривается как климатическая норма, а не как изменение климата
	50		0,3	2	0,3	1	0,3	2		
	10		0,3	3	0,3	1,5	0,3	3		
		35	0,3	3,5	0,3	1,5	0,3	3,5		
		50	0,3	4,5	0,3	2	0,3	4,5		

[a] Набольший предел (b) составляет 7°C (над континентом зимой).

[b] Эти значения относятся к систематической составляющей погрешности.

[c] Все значения в этой колонке относятся к зимнему увеличению.

[d] Необходимо заметить, что два предела (b), отмечены одинаково для одного и того же уровня по результатам двух различных серий наблюдений. Оба значения могут быть весьма большими из-за инструментальных погрешностей наблюдений на которых они снованы.

[e] Это значение для 50 км сравнивается со значением полученным на высоте 35 км. И снова отмеченное значение может показаться слишком большим. Значение между 4 и 5 °C вероятно наиболее реальное.

[f] Все значения в этом столбце относятся к среднеквадратическим отклонениям случайных погрешностей. Несколько большие погрешности в нижней стратосфере и существенно большие погрешности в верхней стратосфере привели бы получению сомнительной информации зимой. Значения для предела (b), относящиеся к систематической погрешности, очень изменчивы (см. раздел 5.4.6 публикации ВМО (1970)).

[g] Все значения в этом столбце основаны на измеренных данных об изменчивости атмосферы. Такая изменчивость включает в себя вклад тех инструментальных погрешностей наблюдений, которые случайным образом меняются от одного зондирования к другому. Этот вклад для рассмотренных здесь приборов может быть существенным (см. раздел 5.5.3 публикации ВМО (1970)).

[h] Все значения в этом столбце относятся к среднеквадратическим отклонениям случайных погрешностей. Систематическая погрешность измерения температуры для целей климатологии равна нулю.

ПРИМЕЧАНИЯ:

Предел (a) – значение среднеквадратической погрешности определения температуры, ниже которого не требуется усовершенствования процедуры измерения в рамках поставленной задачи.

Предел (b) – предельное значение погрешности, за рамками которого результатами измерений можно пренебречь для решения поставленной задачи.

(Большинство значений изменяется с изменением местоположения и сезона; погрешности представлены среднеквадратическими отклонениями в градусах Цельсия (°C), если не оговорено иное.)

Если специально не оговорено иное, значения относятся к измерениям температуры, осредненным в слое толщиной 30 – 40 м в стратосфере, середина которого совпадает с указанным в таблице уровнем.

ТАБЛИЦА 3. Перечень предельных значений погрешностей при измерении влажности аэрологическими приборами

Слой	*Использование*												*Примечания*
	локальное				*в синоптических целях*				*в климатических целях*				
	(a)		*(b)*		*(a)*		*(b)*		*(a)*		*(b)*		
	°C	(%)	°C	(%)	°C	(%)	°C	(%)	°C	(%)	°C	(%)	
Конвективный и турбулентный слой вблизи земной поверхности	0,5	3	5	30	0,5	3	5	30	0,5	3	1,5[a]	10[a]	Систематические погрешности единичного зондирования должны быть ниже 0,15 °C (1 %), если возможно, чтобы среднее влагосодержание столба воздуха могло быть определено с большей точностью, чем влагосодержание на определенном уровне
Тропосфера выше уровня конвекции	0,2[b]	1[b]	10	30	0,2[b]	1[b]	10	30	0,5	3	1,5[a]	10[a]	Дополнительное требование для измерения очень больших градиентов влажности при радиометеорологии
	при высокой влажности												
	2,5[c]	10[c]	10	30	2,5[c]	10[c]	10	30	0,5	3	1,5[a]	10[a]	
	при меньшей влажности				при меньшей влажности								

[a] Эти значения относятся к систематическим погрешностям, которые сохраняются постоянными от зондирования к зондированию на определенных уровнях.

[b] Прямое определение присутствия воды представляется более целесообразным.

[c] Систематические ошибки при единичном зондировании не должны превышать 1,5 °C (5 % относительной влажности).

ПРИМЕЧАНИЯ:

Предел (a) – предельное значение погрешности определения точки инея, точки росы или относительной влажности, ниже которого не требуется усовершенствование процедуры измерения в рамках поставленной задачи.

Предел (b) – предельное значение погрешности определения точки инея, точки росы или относительной влажности, за рамками которого результатами измерений можно пренебречь для решения поставленной задачи.

(Приведенные в таблице значения относительной влажности являются альтернативными оценками, а не точно преобразованными величинами.)

ТАБЛИЦА 4. Перечень требований к точности определения высоты изобарических поверхностей и особых точек

Район	*Изобарическая поверхность, гПа*	*Использование*						*Примечания*
		локальное		*в синоптических целях*		*в климатических целях*		
		(a)	*(b)*	*(a)*	*(b)*	*(a)*	*(b)*	
Средние и высокие широты	Нижняя тропосфера	5	45[a]	1,5[d]	25[e]	1,5[f]		Пределы для изобарических поверхностей в мезосфере детально не определялись (см. раздел 7.3.5 в публикации ВМО (1970))
	300	10	80[b]	1,5	70		Большое[g]	
	100	10	45[c]	1,5	35	1,5	Равное	
	50	10	30[c]	1,5	10			
	30	10	30[c]	1,5	20	1,5	Очень большое	
	10		30[c]	1,5	40	1,5		
	5		40[c]	1,5	60	1,5		Случайные погрешности в определении высоты со среднеквадратическим отклонением 85 м на каждой станции на любом уровне могут быть связаны со средними квадратическими отклонениями погрешностей
	1		50[c]	1,5	110	1,5		
Экваториальный пояс	Нижняя тропосфера	5	20	1,5	12[i]	1,5[f]	20[j]	
	700	5	10	1,5	12	1,5	20	
	300	10	25	1,5	12	1,5	20	
	100	10	50[h]	1,5	12	1,5	20	
	10		50[h]	1,5	12	1,5	20	
	1		50[h]	1,5	12	1,5		
Все широты				Высота уровней особых точек				
				15	600			

[a] Наименьшее значение (b) в низких широтах (20°) летом составляет около 15 м.

[b] Наибольшее значение (b) равно 240 м (зима, Северная Атлантика). Наименьшее значение (b) составляет около 25 м (широта 20°, лето).

[c] Эти значения гораздо больше зимой; порядка 100 м на уровне 50 гПа, возрастая до 500 м на уровне 5 гПа идо 650 м на уровне 1 гПа.

[d] Значения в этом столбце, вероятно, изменяются с изменением широты от примерно 1,5 м в низких широтах до 3 м в высоких широтах.

[e] Значения в этом столбце являются типичными для расстояния между станциями 300 км в средних широтах в направлении нормали по отношению к направлению ветра. Они изменяются с широтой, как показано в таблице XXVIII в публикации ВМО (1970). Значения в стратосфере приведены для летних условий; они возрастают весьма значительно зимой, например до 50 м на уровне 50 гПа (см. раздел 7.3.5 в публикации ВМО (1970)). Пределы, подходящие к среднеквадратическому отклонению случайных погрешностей на одной станции, есть табулированные значения, поделенные на $\sqrt{2}$, если среднеквадратические отклонения на станциях равны.

f Значения в этом столбце относятся к систематическим погрешностям или среднеквадратическим погрешностям средних значений большого числа зондирований.

g При обеспечении достаточно больших выборок предел (b) зависит от факторов, отличных от инструментальных погрешностей наблюдений, влияющих на определение уровня геопотенциальной поверхности (см. раздел 7.3.6 публикации ВМО (1970)).

h Эти значения изменяются в зависимости от условий; в разное время они могут уменьшаться или увеличиваться в несколько (вплоть до трех) раз.

i Случайные погрешности со среднеквадратическими отклонениями 25 м на любом уровне имеют некоторую ценность, но существенно понижают эффективную плотность измерительной сети.

j Значения в этом столбце относятся к среднеквадратической погрешности средних значений за короткий период (например, за месяц). Соответствующие значения для среднеквадратического отклонения инструментальных погрешностей, которые случайно изменяются от зондирования к зондированию, равны $20\sqrt{n}$ m, где n — число наблюдений, пригодных для формирования средних значений.

ПРИМЕЧАНИЯ:

Предел (a) – предельное значение погрешности, ниже которого уже не требуется усовершенствование процедуры измерения в рамках поставленной задачи.

Предел (b) – предельное значение погрешности, за рамками которого результатами измерений можно пренебречь для решения поставленной задачи.

(Приведенные выше значения – среднеквадратические отклонения случайной погрешности, если не оговорено иное; единица измерения – геопотенциальные метры.)

ПРИЛОЖЕНИЕ 12.C

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОРГАНИЗАЦИИ СРАВНЕНИЙ РАДИОЗОНДОВ И УЧРЕЖДЕНИЮ ЦЕНТРОВ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ[7]

ЧАСТЬ I – РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОРГАНИЗАЦИИ СРАВНЕНИЙ РАДИОЗОНДОВ

1. Введение

1.1 Настоящие рекомендации исходят из того, что процедуры, которые применяются различными центрами испытаний, соответствуют процедурам, принятым другими национальными и международными организациями. При этом также предполагается, что Организационный комитет будет сформирован из участников (стран-членов), заинтересованных в проведении сравнений радиозондов, и что, по крайней мере, один из членов комитета не будет представлять ни одного из участников испытаний для того, чтобы обеспечивать руководство проведением сравнений радиозондов. Привлечение такого независимого от участия в испытаниях члена комитета является важным для того, чтобы избежать предвзятости при планировании сравнений. Необходимо также обязательно предусмотреть либо активное участие в сравнениях сотрудников производителей радиозондов, либо проведение подготовки и запуска таких радиозондов независимым оперативным персоналом организации, принимающей у себя в стране сравнения радиозондов.

1.2 Все сравнения различаются между собой до определенной степени, поэтому настоящие рекомендации должны толковаться только в качестве обобщенного перечня задач, которые необходимо выполнить. Если потребуется, Организационному комитету следует вносить изменения, но не в ущерб достоверности результатов и научной оценки испытаний.

1.3 Итоговые отчеты проводившихся ранее сравнений и отчеты организационных совещаний других организационных комитетов могут быть использованы в качестве примера методов проведения сравнений. Секретариат ВМО должен сохранять эти предыдущие отчеты и обеспечивать доступ к ним.

2. Цели сравнений

2.1 Цели сравнений должны быть ясно сформулированы, содержать перечень ожидаемых результатов сравнений и определять, каким образом будут распространяться полученные результаты. Перед Организационным комитетом стоит задача рассмотреть ожидаемые результаты сравнений радиозондов, заранее выявить и предугадать любые потенциальные проблемы. Роль Организационного комитета заключается в обеспечении руководства, но он также обязан вырабатывать ясные и подробные формулировки основных целей, а также критерии для оценки полученных результатов. Организационный комитет должен также определять, как наилучшим образом обеспечить успешное проведение сравнений путем использования имеющихся фундаментальных знаний и накопленного опыта проведения сравнений.

3. Место, время и продолжительность проведения сравнений

3.1 Принимающая организация должна предоставить Организационному комитету и участникам описание предложенного места и условий (местоположение и др.) проведения сравнений, характеристик окружающей среды, климатологических параметров и рельефа местности. Принимающая организация должна также сообщить имя Руководителя или Администратора проекта, который будет отвечать за оперативную деятельность во время проведения сравнений и выступать в роли контактного лица для оказания необходимого содействия.

3.2 Организационный комитет должен посетить предложенный центр проведения сравнений, чтобы выяснить, соответствуют ли задачам его технические возможности и, если это необходимо, предложить внести изменения. После того как Организационный комитет признает адекватность предложенного центра и его возможностей, Руководитель проекта должен подготовить описание места и окружающей его среды для распространения среди участников сравнений. Руководитель проекта, знакомый с графиком работы принимающей организации, должен определить дату начала сравнений и их продолжительность. Копия этого графика должна быть предоставлена Организационному комитету.

3.3 Помимо даты начала сравнений Руководитель проекта должен предложить дату,

7 Сокращенный окончательный отчет с резолюциями и рекомендациями двенадцатой сессии Комиссии по приборам и методам наблюдений (ВМО-№ 881), дополнение II.

когда его полигон проведения испытаний будет предоставлен для установки оборудования участников, и организовать подключение к системе сбора данных. Необходимо предусмотреть выделение времени всем участникам для проверки и тестирования оборудования до начала сравнений, а также предоставить им дополнительное время для того, чтобы операторы ознакомились с действующим порядком выполнения работ на полигоне.

4. Участие в сравнениях

4.1 В соответствии с требованиями Руководитель проекта и/или Организационный комитет должны пригласить через Генерального секретаря ВМО страны-члены принять участие в сравнениях. Однако как только участники определены, Руководитель проекта должен взять на себя все последующие шаги по взаимодействию с участниками.

4.2 Руководитель проекта должен составить подробный вопросник, который рассылается Генеральным секретарем ВМО всем участникам с целью получения информации о каждом типе приборов, предложенных для сравнений. Предполагается, что участники предоставят информацию о необходимых размерах помещения для оборудования, средствах связи, особых требованиях к подключению аппаратуры и характеристиках программного обеспечения. Они также должны предоставить соответствующую документацию с описанием своего наземного и подвешенного к газонаполненной оболочке контрольно-измерительного оборудования.

4.3 Важно чтобы участники предоставили информацию о методике калибровки своих радиозондов, отвечающей стандартам образцовых средств измерений. Хотя и ожидается, что в сравнениях будут участвовать оперативные радиозонды, это не всегда обязательно; новые или исследовательские типы радиозондов могут быть допущены к участию в испытаниях по согласованию со всеми участниками сравнений, Руководителем проекта и Организационным комитетом.

5. Обязательства

5.1 Участники

5.1.1 Участники отвечают за перевозку своего оборудования и расходы, связанные с такой перевозкой.

5.1.2 Участники устанавливают и демонтируют своё собственное оборудование по согласованию с Руководителем проекта. Принимающая организация в случае необходимости оказывает помощь в распаковке и упаковке оборудования.

5.1.3 Участники обеспечивают свои системы всем необходимым вспомогательным оборудованием, крепежными приспособлениями для наземного оборудования, сигнальными и силовыми кабелями, запасными частями и расходными материалами. Участники обеспечивают доступ (если возникает необходимость в оказании помощи со стороны принимающей организации) к подробным инструкциям и руководствам, необходимым для установки, эксплуатации и обслуживания оборудования, а также, в случае необходимости, калибровки.

5.2 Организация, принимающая у себя сравнения

5.2.1 Принимающая организация при необходимости оказывает помощь участникам в распаковке и установке оборудования и предоставляет возможности для хранения необходимого имущества, такого как расходные материалы, запасные части и техническая документация.

5.2.2 Принимающая организация при необходимости предоставляет вспомогательное оборудование, если такое имеется у неё.

5.2.3 Принимающая организация при необходимости оказывает помощь участникам в подключении к оборудованию принимающей организации для сбора данных.

5.2.4 Принимающая сторона гарантирует надлежащее соблюдение всех правовых обязательств, связанных с проведением аэрологических измерений (например, авиационные правила и правила использования радиочастот страны проведения сравнений).

5.2.5 Принимающая организация может предоставлять информацию по таким вопросам, как размещение участников, местный транспорт и повседневная логистическая поддержка, но она не обязана финансировать покрытие расходов, связанных с размещением персонала.

6. Регламент проведения сравнений

6.1. Руководитель проекта осуществляет контроль за всеми испытаниями и ведет регистрацию каждой связки радиозондов наряду со всей соответствующей информацией о радиозондах, находящихся в полете, а также метеорологических условий.

6.2 Замены оборудования или программного обеспечения разрешаются по согласованию с Руководителем проекта. Необходимо уведомить об этом других участников. Руководитель проекта заполняет журнал, содержащий записи обо всем оборудовании, задействованном в проведении сравнений, и обо всех произведенных заменах.

6.3 Разрешается проведение незначительных ремонтных работ (например, замена предохранителя и др.), не оказывающих влияние на точность измерений аппаратуры. Руководитель проекта должен быть осведомлен о таких незначительных ремонтных работах, о чем делается соответствующая запись в журнале.

6.4 Проверка настройки и обслуживание оборудования участниками испытаний, требующие привлечения специалистов или специального оборудования, разрешаются после уведомления об этом Руководителя проекта.

6.5 Любая проблема, которая ставит под угрозу полученные результаты сравнений или работу любого оборудования, должна быть рассмотрена Руководителем проекта.

7. Сбор данных

7.1 Организационный комитет должен согласовать соответствующие процедуры сбора данных, таких как частота проведения измерений, интервалы между измерениями, осреднение данных, предварительная обработка данных (может быть ограничена в силу функциональных возможностей отдельных участников), форматы данных, оперативный контроль качества, контроль качества полученных результатов и статистическая отчетность.

7.2 Все оборудование и программное обеспечение для сбора данных, предоставленные принимающей организацией, должны быть тщательно протестированы перед началом сравнений.

7.3 Задержка по времени между проведением наблюдений и предоставлением данных Руководителю проекта устанавливается Руководителем проекта по согласованию с участниками. Задержка в один час после окончания наблюдений (разрыв оболочки) считается приемлемой.

7.4 Ответственность за уточняющие данные перед проведением анализа, последующий контроль качества данных и за предоставление итоговых данных остается за Руководителем проекта.

7.5 Руководитель проекта принимает решение о выборе носителя информации для хранения данных, принимая во внимание возможности принимающей организации, но применяемые носители информации для предоставления участникам итоговых данных могут различаться в зависимости от компьютерных возможностей каждого участника испытаний. Руководитель проекта должен быть осведомлен о таких требованиях.

7.6 Руководитель проекта отвечает за предоставление итоговых данных всем участникам, поэтому принимающая организация должна быть в состоянии получить все индивидуальные файлы данных от каждого участника.

8. Обработка и анализ данных

8.1 Анализ данных

8.1.1 Основные принципы анализа данных должны быть рассмотрены и одобрены заблаговременно до начала проведения сравнений. Эти основные принципы следует включить в программу испытаний в качестве её составной части.

8.1.2 Между участниками должно быть достигнуто согласие в отношении метода преобразования данных, алгоритмов калибровки и внесения поправок, терминов и сокращенных наименований, постоянных величин и исчерпывающего описания предложенных методов статистического анализа.

8.1.3 Организационный комитет должен проверять пригодность применения выбранных процедур проведения анализа.

8.1.4 Результаты сравнений должны быть изучены Организационным комитетом, который рассматривает содержание окончательного отчета и приведенные в нем рекомендации.

8.2 Обработка данных и доступность базы данных

8.2.1 Все существенные метеорологические данные и данные об окружающей среде должны храниться в базе данных для дальнейшего использования и анализа участниками. Руководитель проекта осуществляет контроль за этими данными.

8.2.2 После окончания сравнений Руководитель проекта предоставляет каждому участнику полный комплект данных всех участников сравнений.

9. Окончательный отчет о проведении сравнений

9.1 Руководитель проекта готовит проект окончательного отчета, который предоставляется Организационному комитету и участникам сравнений для комментарий и дополнений. Необходимо оговорить временной период для получения ответа.

9.2 Комментарии и дополнения должны быть направлены Руководителю проекта и в копии в Организационный комитет.

9.3 После внесения дополнений в проект окончательного отчета он должен быть представлен на рассмотрение Организационного комитета, который может пожелать собраться для его обсуждения, если это необходимо, или может одобрить этот окончательный документ.

9.4 После утверждения Организационным комитетом окончательного документа для его публикации, он направляется в Секретариат для публикации и распространения ВМО.

10. Заключительные примечания

10.1 Организационный комитет может согласиться с тем, что промежуточные результаты могут быть предоставлены только Руководителем проекта, и что участники могут представлять ограниченные данные на технических конференциях, за исключением их собственных данных, полученных в ходе испытаний, которые могут быть использованы ими без ограничений. Как только Секретариат ВМО включит в график публикацию окончательного отчета, ВМО обеспечивает доступ к этим данным всем странам-членам, которые попросят об этом. После этого страны-члены имеют право анализировать эти данные и представлять результаты на совещаниях и в публикациях.

ЧАСТЬ II – РЕКОМЕНДАЦИИ ПО УЧРЕЖДЕНИЮ ЦЕНТРОВ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

1. Введение

1.1 Для поддержания долгосрочной стабильности глобальной системы аэрологических наблюдений важно сохранять возможность проведения количественных сравнений радиозондов. Существующие и новые оперативные системы радиозондирования должны на регулярной основе подвергаться проверке с использованием контрольных приборов во время полетов. Страны-члены должны обеспечивать сохранение минимального числа центров проведения испытаний с необходимой инфраструктурой для проведения сравнительных испытаний радиозондов.

1.2 Опыт проведения после 1984 г. серии сравнений радиозондов ВМО показывает, что необходимо иметь ряд центров для того, чтобы проводить сравнения радиозондов при разнообразных полетных условиях.

1.3 Работа датчика относительной влажности особенно зависит от условий во время испытаний, например, количества облачности и дождевых осадков во время подъема радиозонда, или от того, высокая или низкая влажность у поверхности.

1.4 Погрешности в измерении температуры в дневное время зависят от солнечного альбедо и тем самым от альбедо поверхности и облачного покрова. Таким образом, погрешности в определении температуры в прибрежных и континентальных районах могут значительно различаться. Погрешности, обусловленные влиянием инфракрасного излучения на датчик температуры, будут зависеть не только от состояния подстилающей поверхности и распределения облачности, но и от температуры атмосферы. Поэтому погрешности в определении температуры в результате влияния инфракрасного излучения в тропиках (например, вблизи тропопаузы) будут совершенно другими по сравнению с погрешностями в средних широтах.

1.5 Погрешности при наблюдениях за ветром на высотах с помощью многих аэрологических систем зависят от удаленности радиозонда от места его запуска (а также угла наклона траектории полета

радиозонда). Поэтому сравнения должны проводиться в условиях как слабого, так и сильного ветра на высотах.

2. Требования к материально-технической базе центра

2.1 Центр, подходящий для проведения испытаний, должен иметь достаточно зданий/помещений для обеспечения работы, как минимум, четырех различных систем.

2.2 Центр должен обеспечивать возможности для измерения с хорошим качеством приземной температуры, относительной влажности, давления и ветра вблизи площадок для запуска радиозондов. Возможность проведения дополнительных образцовых измерений температур, давления и относительной влажности давало бы преимущество такому центру.

2.3 Центр проведения испытаний должен иметь средства для обеспечения прямых измерений геопотенциальной высоты во время испытательных полетов (либо с использованием радиолокационной станции сопровождения или радиозонда с глобальной системой позиционирования (GPS), позволяющей определять высоту с высокой точностью).

2.4 Вспомогательные системы наблюдений, такие как лазерный высотомер для измерения нижней границы облачности, лидар для измерения аэрозолей, лидар для измерения относительной влажности, наземные радиометры и интерферометры, могут также оказаться полезными.

2.5 Центр проведения испытаний должен быть одобрен национальными органами по контролю за воздушным пространством для запусков больших газонаполненных оболочек (вес оболочки 3 000 гр) с полезной грузоподъемностью до 5 кг. Ангары для наполнения оболочек должно позволять запускать такие большие оболочки.

3. Предлагаемые географические регионы для испытаний

3.1 Для того чтобы способствовать проведению испытаний основными производителями радиозондов целесообразно сохранять или создать центры для испытаний в средних широтах в Северной Америке, Европе и Азии. В идеале каждый из этих регионов должен иметь минимум два центра, один с прибрежными (морскими) условиями и другой внутри континента.

3.2 Кроме того, целесообразно определить минимум два центра в тропиках, особенно для испытаний датчиков относительной влажности.

3.3 Если упомянутые выше главные центры проведения испытаний не обеспечивают адекватные экстремальные условия для испытания датчиков относительной влажности (например, условия с очень низкой влажностью на малых высотах), может возникнуть необходимость выбрать дополнительные центры проведения испытаний в засушливых районах или там, где приземные температуры воздуха очень низкие (ниже –30 °C зимой)

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Brousaides, F.J. and J.F. Morrissey, 1974: Residual temperature-induced humidity errors in the National Weather Service radiosonde. *Final Report AFCRL-TR-74-0111*, Instrument Paper No. 215.

Cole, H. L. and E. Miller, 1995: A correction for low-level radiosonde temperature and relative humidity Measurements. *Ninth AMS Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation*, Charlotte, North Carolina, pp. 32–36.

Garand, L., C. Grassotti, J. Hallé and G.L. Klein, 1992: On differences in radiosonde humidity- reporting practices and their implications for numerical weather prediction and remote sensing. *Bulletin of the American Meteorological Society,* Volume 73, pp. 1417–1423.

Kursinski, E.R., G.A. Hajj, J.T. Schofield, R.P. Linfield and K.R. Hardy, 1997: Observing Earth's atmosphere with radio occultation measurements using the Global Positioning System. *Journal of Geophysical Research*, Volume 102, pp. 23429–23466.

Leiterer, U., H. Dier, D. Nagel, T. Naebert, D. Althausen, K. Franke, A. Kats and F. Wagner, 2005: Correction method for RS80-A Humicap humidity profiles and their validation by Lidar backscattering profiles in tropical cirrus clouds. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Volume 22, pp. 18–29.

McIlveen, J.F.R. and F.H. Ludlam, 1969: The lag of the humidity sensor in the British radiosonde. *Meteorological Magazine*, Volume 98, pp. 233–246.

Miloshevich, L.M., H. Vömel, A. Paukkunen, A.J. Heymsfield and S.J. Oltmans, 2001: Characterization and correction of relative humidity measurements from Vaisala RS80-A radiosondes at cold temperatures. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Volume 18, pp. 135–156.

Miloshevich, L.M. A. Paukkunen, H. Vomel and S.J. Oltmans, 2004: Development and validation of a time-lag correction for Vaisala radiosonde humidity measurements. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Volume 21, pp. 1305–1327.

Nash, J., 1984: *Compatibility of Radiosonde Measurements in the Upper Troposphere and Lower Stratosphere for the Period 1 November 1981 to 31 October 1982*. Meteorological Office, Bracknell, O.S.M. No. 24.

Nash, J., J.B. Elms and T.J. Oakley, 1995: *Relative humidity sensor performance observed in recent international radiosonde comparisons. Ninth AMS Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation*, Charlotte, North Carolina, pp. 43–48.

Paukkunen, A., 1995: *Sensor heating to enhance reliability of radiosonde humidity measurement. Ninth AMS Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation*, Charlotte, North Carolina, pp. 65–69.

Richner, H., J. Joss and P. Ruppert, 1996: A water hypsometer utilizing high-precision thermocouples. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Volume 13, pp. 175–182.

Schmidlin, F.J., H. Sang Lee and B. Ranganayakamma, 1995: *Deriving the accuracy of different radiosonde types using the three-thermistor radiosonde technique. Ninth AMS Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation*, Charlotte, North Carolina, pp. 27–31.

Turner, D.D., B.M. Lesht, S.A. Clough, J.C. Liljegren, H.E. Revercomb and D.C. Tobon, 2003: Dry bias and variability in Vaisala RS80-H radiosondes: The ARM experience. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Volume 20, pp. 117–132.

Turtiainen, H., S. Tammela and I. Stuns, 1995: *A new radiosonde temperature sensor with fast response time and small radiation error. Ninth AMS Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation*, Charlotte, North Carolina, pp. 60–64.

Wade, C.G., 1994: An evaluation of problems affecting the measurement of low relative humidity on the United States radiosonde. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Volume 11, pp. 687–700.

Wade, C.G., 1995: *Calibration and data reduction problems affecting national weather service radiosonde humidity measurements. Ninth AMS Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation*, Charlotte, North Carolina, pp. 37–42.

Wang, J., H.L. Cole, D.J. Carlson, E.R. Miller, K. Beierle, A. Paukkunen and T.K. Laine, 2002: Corrections of humidity measurement errors from the Vaisala RS80 radiosonde: Application to TOGA-COARE data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Volume 19, pp. 981–1002.

World Meteorological Organization, 1970: *Performance Requirements of Aerological Instruments* (C.L. Hawson). Technical Note No. 112, WMO-No. 267. TP.151, Geneva.

World Meteorological Organization, 1975: *Upper- Air Sounding Studies. Volume I: Studies on Radiosonde Performance* (A.H. Hooper), Technical Note No. 140, WMO-No. 394, Geneva.

World Meteorological Organization, 1986: *Algorithms for Automatic Aerological Soundings* (A.H. Hooper). Instruments and Observing Methods Report No. 21, WMO/TD-No. 175, Geneva.

World Meteorological Organization, 1987: WMO *International Radiosonde Comparison (UK 1984, USA 1985): Final Report* (J. Nash and F.J. Schmidlin). Instruments and Observing Methods Report No. 30, WMO/TD-No. 195, Geneva.

World Meteorological Organization, 1988: Values of some physical functions and constants used in meteorology. *Technical Regulations*, Volume I, Appendix A, WMO-No. 49, Geneva.

World Meteorological Organization, 1989a: SRS-400: The new Swiss radiosonde (B. Hoegger, A. Heimo, G. Levrat and J. Rieker). *Papers Presented at the Fourth WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation* (*TECIMO-IV*) (Brussels), Instruments and Observing Methods Report No. 35, WMO/TD-No. 303, Geneva, pp. 197–202.

World Meteorological Organization, 1989*b*: *Compatibility of Radiosonde Geopotential Measurements* (M. Kitchen). Instruments and Observing Methods Report No. 36, WMO/TD-No. 344, Geneva.

World Meteorological Organization, 1991: *WMO International Radiosonde Comparison – Phase III, Dzhambul (USSR), 1989: Final Report* (A. Ivanov, A. Kats, S. Kurnosenko, J. Nash and N. Zaitseva). Instruments and Observing Methods Report No. 40, WMO/TD-No. 451, Geneva.

World Meteorological Organization, 1992: *International Meteorological Vocabulary*. Second edition, WMO-No. 182, Geneva.

World Meteorological Organization, 1993*a*: *Historical Changes in Radiosonde Instruments and Practices* (D.J. Gaffen). Instruments and Observing Methods Report No. 50, WMO/TD-No. 541, Geneva.

World Meteorological Organization, 1993*b*: *Report by the Rapporteur on Radiosonde Compatibility Monitoring*. Part A: WMO Catalogue of Radiosondes and Upper-air Wind Systems in Use by Members (1993), Part B: Compatibility of Radiosonde Geopotential Measurements 1990, 1991 and 1992 (T. Oakley), Instruments and Observing Methods Report No. 56, WMO/TD-No. 587, Geneva.

World Meteorological Organization, 1994*a*: The difference in observed temperatures from radiosondes suspended 10 m and 40 m beneath a 1400 g balloon (J.B. Elms, J. Nash and G. Williams). *Papers Presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation* (*TECO-94*), Instruments and Observing Methods Report No. 57, WMO/TD-No. 588, Geneva, pp. 121–126.

World Meteorological Organization, 1994*b*: Comparison of potential reference radiosonde observations – Results from PREFRS-92 (J. Nash). *Papers Presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation* (*TECO-94*), Instruments and Observing Methods Report No. 57, WMO/TD-No. 588, Geneva, pp. 115–120.

World Meteorological Organization, 1995: *Manual on Codes*. Volume I.1, WMO-No. 306, Geneva.

World Meteorological Organization, 1996*a*: *WMO International Radiosonde Comparison – Phase IV: Final Report* (S. Yagi, A. Mita and N. Inoue). Instruments and Observing Methods Report No. 59, WMO/TD-No. 742, Geneva.

World Meteorological Organization, 1996*b*: *Description and User Guide for the Radiosonde Comparison and Evaluation Software Package (RSKOMP – Version 3/ Version 4)* (S. Kurnosenko and T. Oakley). Instruments and Observing Methods Report No. 60, WMO/TD-No. 771, Geneva.

World Meteorological Organization, 1998: *Report by the Rapporteur on Radiosonde Compatibility Monitoring*. Part A: WMO Catalogue of Radiosondes and Upper-air Wind Systems in Use by Members (1998), Part B: Compatibility of Radiosonde Geopotential Measurements 1995, 1996 and 1997 (T. Oakley), Instruments and Observing Methods Report No. 72, WMO/TD-No. 886, Geneva.

World Meteorological Organization, 2003*a*: *Manual on the Global Observing System*. Volume I, WMO-No. 544, Geneva.

World Meteorological Organization, 2003*b*: *WMO Catalogue of Radiosondes and Upper-air Wind Systems in Use by Members in 2002* and *Compatibility of Radiosonde Geopotential Measurements for Period from 1998 to 2001* (J. Elms). Instruments and Observing Methods Report No. 80, WMO/TD-No. 1197, Geneva.

World Meteorological Organization, 2003*c*: *Executive Summary of the WMO Intercomparison of GPS Radiosondes* (Alcantâra, Maranhão, Brazil, 20 May–10 June 2001). Instruments and Observing Methods Report No. 76, WMO/TD-No. 1153, Geneva.

World Meteorological Organization, 2005*a*: Preliminary results of WMO intercomparison of high quality radiosonde systems, Mauritius, February 2005 (B. Pathack, J. Nash, R. Smout and S. Kurnosenko). *Papers Presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2005)*, Instruments and Observing Methods Report No. 82, WMO/TD-No. 1265, Geneva.

World Meteorological Organization, 2005*b*: Results of the RS92 acceptance test performed by the Met Office (UK) (R. Smout, J. Nash, T. Hewison and M. Smees). *Papers Presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation* (*TECO-2005*), Instruments and Observing Methods Report No. 82, WMO/TD-No. 1265, Geneva.

ГЛАВА 13

ИЗМЕРЕНИЕ ВЕТРА НА ВЫСОТАХ

13.1 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

13.1.1 Определения

Нижеследующие определения взяты из *Наставления по Глобальной системе наблюдений* (ВМО, 2003*а*):

Шаропилотное наблюдение: определение ветра на высотах путем прослеживания при помощи оптического прибора траектории свободного полета шара-пилота.

Радиоветровое наблюдение: определение ветра на высотах путем прослеживания траектории свободного полета шара-пилота при помощи электронных средств.

Радиоветровое зондирование: сочетание радиозондовых и радиоветровых наблюдений.

Аэрологическое наблюдение: наблюдение, производимое в свободной атмосфере прямо или косвенно.

Наблюдение за ветром на высотах: наблюдение на данной высоте или результаты завершенного зондирования направления и скорости ветра в атмосфере.

В этой главе рассматриваются, в первую очередь, шаропилотные и радиоветровые наблюдения. Методы использования шаров-зондов, а также измерения с использованием специальных платформ, специализированного оборудования или произведенные косвенным образом с помощью методов дистанционного зондирования, рассматриваются в различных главах части II.

13.1.2 Единицы измерения ветра на высотах

Скорость ветра на высотах обычно измеряется в метрах в секунду или в узлах, но может измеряться и в километрах в час. Направление, откуда приходит воздушный поток, измеряется в градусах от севера. В сводках TEMP направление ветра округляется до ближайших 5°. Измерение с таким разрешением понижает точность, которую можно достичь с помощью самых современных систем, особенно при сильном ветре на высотах. Передача более точных сообщений о направлении ветра, которая возможна при использовании кода BUFR, должна осуществляться в тех случаях, когда требуется наиболее высокая точность.

При вертикальных аэрологических наблюдениях для определения высоты уровня используется значение геопотенциала, выраженное в стандартных геопотенциальных метрах (м). Стандартный геопотенциальный метр определяется как 0,980 665 динамического метра. В тропосфере значение геопотенциальной высоты является хорошим приближением к высоте, выраженной в метрах. Значения геопотенциальной высоты, используемые в сводках, содержащих данные о ветре на высотах, отсчитываются от уровня моря, хотя во многих системах расчеты геопотенциальной высоты первоначально выполняются применительно к высоте над уровнем станции.

13.1.3 Метеорологические требования

13.1.3.1 Области применения в метеорологической практике

Наблюдения за ветром на высотах имеют большое значение для оперативного прогнозирования погоды в любом масштабе и на всех широтах и обычно производятся параллельно с измерениями полей характеристик воздушных масс (температуры и относительной влажности). Они чрезвычайно важны для обеспечения безопасности и экономичности полетов воздушных судов. Неопределенность данных о ветре на высотах ограничивает точность современной артиллерии, и поэтому эти данные важны с точки зрения безопасности при проведении военных операций. Точные измерения ветра на высотах, а также измерения вертикального сдвига ветра критически важны при запуске космических аппаратов и других типов ракет. В пограничном слое значения ветра на высотах при надежных измерениях вертикального сдвига ветра существенны для прогнозирования загрязнения окружающей среды.

13.1.3.2 Усовершенствование процедур передачи сообщений

В численных прогнозах погоды обычно используются значения ветра на высотах, усредненные по слоям; при этом толщина слоев зависит от масштабов прогнозируемых атмосферных движений. Эти значения не обязательно относятся к стандартным уровням по давлению или высоте; чаще эти значения относятся к барометрическим высотам, которые изменяются по мере изменения давления у поверхности Земли в месте наблюдения. Таким образом, важно, чтобы изменения ветра между стандартными уровнями были с хорошей точностью

представлены в сводках, содержащих значения ветра на высотах. Это внесет дополнительный вклад в повышение точности значений ветра, передаваемых для стандартных уровней.

В прежние годы значения ветра на высотах обычно обрабатывались вручную или с использованием небольшого вычислительного устройства, и было нецелесообразно выпускать подробные сводки о вертикальной структуре поля ветра. Однако с появлением недорогих компьютерных систем стало возможным обрабатывать и передавать данные обо всех деталях вертикальной структуры, представляющих интерес для метеорологической деятельности и научных исследований. Сводки о ветре на высотах должны содержать достаточно информации, для того чтобы определить вертикальный сдвиг ветра на границе слоев с различными характеристиками воздушных масс. Например, данные о сдвиге ветра через инверсии температуры или о значительном сдвиге ветра, связанном с существенными изменениями относительной влажности с высотой, следует сообщать во всех случаях, когда это возможно.

Когда данные о ветре на высотах сообщаются с использованием кода FM 35-X Ext. TEMP или FM-32-IX PILOT (ВМО, 1995), значения скорости ветра могут отклоняться до 5 м/с от линейной интерполяции между значимыми уровнями. Использование автоматизированных алгоритмов с таким установленным пределом отклонения может вызывать ошибки при передаче сообщений, которые будут превышать ошибки наблюдений. Иногда процедура кодирования может также привести к уменьшению точности до такой степени, что не будут удовлетворяться требования к точности, изложенные в части I главы 12. Этого можно избежать с помощью целого ряда методов. Установленный предел отклонения для скорости ветра, равный 3 м/с вместо 5 м/с, можно принять в качестве национальной практики для сообщений TEMP и PILOT. Сужение установленного предела должно привести в среднем приблизительно к одному сообщению, содержащему данные о ветре на значимом уровне на километр по вертикали. Сводки TEMP или PILOT должны быть визуально сверены с результатами детализированных измерений ветра на высотах, и передаваемые сообщения должны быть отредактированы, с тем чтобы избежать недопустимых ошибок перед их выпуском. Сводки, представляемые с использованием соответствующего кода BUFR, могут исключить необходимость текущего выбора значимых уровней.

13.1.3.3 Требования к точности

Требования к точности измерений ветра на высотах представлены применительно к скорости и направлению ветра в части I главы 12, приложение 12.A. Сводка предельных ошибок при измерении ветра на высотах в терминах среднеквадратических векторных ошибок приводится в части I главы 12, приложение 12.B, таблица 1. Кроме того, необходимо, чтобы систематические ошибки измерения направления ветра были по возможности минимальными – определенно значительно меньшими 5 %, особенно в тех районах, где на высотах, как правило, наблюдаются сильные ветры. На практике большинство оперативных систем с хорошими эксплуатационными характеристиками обеспечивают предоставление данных о ветре на высотах со среднеквадратической векторной ошибкой (2σ), равной 3 м/с и более в нижней тропосфере, и 5 – 6 м/с в верхней тропосфере и стратосфере (Nash, 1994).

Диапазон значений скорости ветра, характерных для различных мест, можно также найти в части I главы 12, приложение 12.B, таблица 1. Большинство систем измерения ветра на высотах должны позволять проводить измерения ветра в диапазоне от 0 до 100 м/с. Для систем, используемых главным образом для измерения ветра на нижних уровнях, такой широкий диапазон необязателен.

Вертикальное разрешение при измерении ветра на высотах определено в части I главы 12, приложение 12.B, таблица 1, и составляет 300 – 400 м в тропосфере и 600 – 800 м в стратосфере. Более высокое вертикальное разрешение (50 – 150 м) может оказаться полезным для метеорологических применений общего характера в пограничном слое атмосферы (до высоты 2 км над поверхностью). Однако используемая система слежения должна обеспечивать поддержание приемлемой точности измерения ветра при более высоком вертикальном разрешении, если увеличение разрешения представляется целесообразным.

В части I главы 12, приложение 12.A, наиболее строгие требования к измерениям ветра на высотах предъявляются при наблюдениях мезомасштабной атмосферной циркуляции. Кроме того, очень высокая точность измерения ветра на высотах часто устанавливается при проведении операций на полигонах, таких как запуск ракет. Программы наблюдений, которые должны удовлетворять требованиям очень высокой точности, следует тщательно планировать, поскольку наблюдения необходимо проводить близко к требуемому месту и в пределах установленных временных рамок. Можно привести следующие характеристики атмосферной изменчивости. Среднеквадратическая разность векторов между двумя безошибочными наблюдениями ветра на высотах на одной и той же высоте (при вертикальном разрешении, равном 300 м), как правило, составляет менее 1,5 м/с, если измерения

производятся одновременно и на расстоянии менее 5 км по горизонтали. Это верно также в том случае, когда измерения производятся в одном и том же месте, но разделены по времени интервалом менее, чем в десять минут.

13.1.3.4 Требования к максимальной высоте

Измерения ветра с помощью аппаратуры, установленной на шаре-зонде, рассматриваемые в данной главе, могут потребоваться на высотах до 35 км и выше в ряде пунктов, особенно в тех, которые входят в Глобальную систему наблюдения за климатом. Для того чтобы достичь этих высот, могут понадобиться более дорогие шары-зонды, чем маленькие дешевые шары-зонды, поднимающие системы радиоветрового зондирования на высоты 20 – 25 км.

Идеальная сеть наблюдения за ветром на высотах должна адекватно отражать движения воздушных масс любого масштаба – от планетарного до мезомасштаба, в тропосфере и нижней стратосфере. На станциях наблюдательной сети также определяются значимые мелкомасштабные ветровые структуры с помощью систем дистанционного зондирования с высоким временным разрешением. Однако в средней и верхней стратосфере для решения метеорологических задач интерес представляют, прежде всего, более крупномасштабные движения воздушных масс, главным образом планетарного масштаба и более крупного синоптического масштаба. Таким образом, на всех пунктах аэрологических наблюдений национальной сети с распределением станций, оптимальным для проведения наблюдений в тропосфере, необязательно проводить измерения на высотах более 25 км. Общие оперативные расходы могут быть ниже, если использовать сочетание наблюдательных систем, описанных в этой главе, с системами зондирования, описанными в части II. В этом случае национальная техническая инфраструктура должна позволять обеспечивать адекватную эксплуатацию различных задействованных систем.

13.1.4 Методы измерений

Данные о ветре на высотах собираются, главным образом, посредством использования методов радиоветрового зондирования, хотя в тех случаях, когда требуются дополнительные данные о ветре на высотах без больших затрат на запуск радиозонда, можно использовать наблюдения с помощью шаров-зондов и радиоветровые наблюдения. Наблюдения, производимые на аэрологических станциях Глобальной системы наблюдений, дополняются над сушей измерениями с самолетов, с помощью измерителей профиля ветра, а также доплеровских метеорологических радиолокаторов. Над морем данные о ветре на высотах получаются, прежде всего, с гражданских воздушных судов, пролетающих на крейсерской высоте. Они дополняются вертикальными профилями, получаемыми с радиоветровых зондов, запускаемых с судов или удаленных островов, а также в результате слежения за облачностью или структурами полей водяного пара, наблюдаемыми с геостационарных метеорологических спутников. В будущем ожидается, что измерения ветра с помощью установленных на спутниках лидаров (лазерных локаторов обнаружения и определения дальности объектов) и радиолокаторов улучшат глобальный охват существующих систем наблюдений. При измерении ветра с высоким временным разрешением для конкретных применений используются также содары (радиолокаторы звукового обнаружения и определения дальности), лидары и змейковые анемометры. Для применения в метеорологических целях разрабатывается экономичная технология использования беспилотных воздушных судов.

Выбор метода радиоветрового зондирования для измерения скорости и направления ветра на высотах обычно зависит от наблюдений, получаемых либо в результате перемещения запущенного свободного шара-зонда при более или менее одинаковой скорости подъема, либо при падении под действием силы тяжести объектов, таких как зонды, сбрасываемые с парашютом. В случае если нужно измерить горизонтальное перемещение воздушной массы, отслеживаемая мишень не должна существенно перемещаться по горизонтали относительно наблюдаемой воздушной массы. Основная информация, которая требуется от систем непосредственного слежения, включает высоту мишени и данные о ее планируемой траектории или в качестве альтернативы ее горизонтальной скорости в известные временные интервалы. Требования к точности, изложенные в части I главы 12, приложение 12.A, включают влияние ошибок определения высоты или давления при измерении ветра. Маловероятно, чтобы общие оперативные требования к точности могли выполняться для уровней, расположенных выше пограничного слоя атмосферы, при использовании какого-либо метода слежения, который должен скорее предполагать скорость подъема шара-зонда, чем использовать данные о высоте, полученные с помощью системы слежения или с помощью радиозонда, связанного с мишенью.

Системы дистанционного зондирования позволяют измерять перемещение атмосферных масс в результате рассеяния электромагнитного излучения или звука с одной или нескольких мишеней: гидрометеоров, пыли, аэрозоля или неоднородностей индекса рефракции, обусловленных мелкомасштабной атмосферной турбулентностью или самими молекулами воздуха.

В методах прямого обнаружения ветра, рассматриваемых в этой главе, используются мишени, положение которых может непрерывно отслеживаться. Хотя существует много методов, с помощью которых может производиться слежение за мишенями, здесь будут рассмотрены только два наиболее широко используемых.

13.1.4.1 Слежение с использованием направленной антенны

Наземная система позволяет следить за мишенью с помощью направленной антенны: определяются азимут и любые два из следующих параметров: угол места, наклонная дальность и высота. Измерения можно проводить, используя первичный радиолокатор (см. раздел 13.2.4) для слежения за отражающей мишенью, прикрепленной к шару-зонду, радиотеодолит или вторичный радиолокатор (см. раздел 13.2.4.2), осуществляющий слежение за радиозондом, прикрепленным к шару-зонду, или оптический теодолит, осуществляющий слежение за шаром-зондом. Точность слежения за углом места и азимутом при использовании радиолокационных и радиотеодолитных систем обычно имеет порядок 0,1°, в то время как для радиолокационных систем ошибка по дальности обычно должна составлять менее 30 м.

Современные радиотеодолитные системы с антенной размером менее 2 м наиболее подходят для измерений ветра на высотах, когда угол места шара-зонда превышает 10 – 15°. При использовании первичных радиолокаторов требуется высококвалифицированный персонал для их качественного обслуживания и более высокие первоначальные капитальные затраты. Однако первичные радиолокаторы позволяют производить дешевые радиоветровые измерения, когда не требуются измерения с помощью радиозондов. Первичные радиолокаторы также могут удовлетворять очень высоким требованиям точности измерения ветра на высотах при всех условиях. Системы вторичных радиолокаторов являются возможной альтернативой, когда они поставляются соответствующим производителем, но для успешной работы может потребоваться слишком широкий спектр радиочастот в полосах частот, выделенных для метеорологических целей, использование которых практикуется во многих странах.

Выбор между использованием первичного радиолокатора или радиотеодолита для измерения ветра на высотах будет частично зависеть от максимальной наклонной дальности, ожидаемой в месте наблюдения. Использование первичной радиолокационной системы или системы измерения ветра с помощью навигационных средств необходимо для получения достаточно высокой точности измерений при большей дальности. Максимальная дальность существенно изменяется в зависимости от широты, при этом дальность 70 км достаточна в экваториальных и полярных районах, но она может достигать по меньшей мере 200 км в некоторых среднеширотных зонах. В таблице 13.1 представлена повторяемость зондирований с превышением определенной наклонной дальности для шара-зонда на высоте 30 км. Данные приводятся по станциям, расположенным в Европе в зоне 50 – 60° с. ш. Число зондирований дается за целый год, но следует отметить, что зондирования с превышением пределов наклонной дальности в основном приходятся на зимний период.

13.1.4.2 Слежение с использованием радионавигационных сигналов

Радиозонд, способный получать сигналы от системы навигационных радиопередатчиков, прикрепляется к мишени (либо к поднимающемуся шару-зонду, либо к парашюту сбрасываемого зонда). Изменения как фазы (а также доплеровское смещение), так и времени поступления радионавигационных сигналов, получаемых радиозондом, используются для расчета горизонтального движения мишени. Методы, основанные на использовании наземных радиомаяков, таких как „Лоран», описаны в публикации ВМО (WMO, 1985). Производители предлагают радиозонды со спутниковой глобальной системой определения местоположения (ГСОМ) с 1995 г. (WMO, 1994, и Kaisti, 1995). Достижение надежного функционирования требует некоторого времени, но большинство основных проблем было решено к моменту проведения в Бразилии мероприятия по сравнению радиозондов, работающих на основе ГСОМ (ВМО, 2003b). Измерения высоты с использованием систем ГСОМ, приведенных в соответствие с кодами, в настоящее время являются довольно точными и могут заменить датчики давления в современных радиозондах.

Таблица 13.1. Повторяемость зондирований с превышением наклонной дальности (для шара-зонда на высоте 30 км)

Превышенная наклонная дальность, км	140	160	175	190
Повторяемость, %	5	2	1	0,5

В повседневной метеорологической практике шире стала использоваться навигационная система слежения, что связано с высокой степенью автоматизации, которая может быть достигнута при выборе этого типа системы измерения ветра. Масштаб работ, связанных с обслуживанием наземного оборудования данной системы, также весьма незначителен.

Точность измерений ветра с помощью навигационной системы при использовании наземных передатчиков зависит от геометрии, фазы, стабильности и отношения сигнала к шуму для радионавигационных сигналов в данном месте. Обычно точность существенно не меняется в течение полета с учетом того что, пока получение сигналов навигационной системы радиозондом и получение данных этой системы, передаваемых с радиозонда на наземную систему обработки, остаются адекватными. Применение радиозондов навигационной системы часто связано с трудностями в получении надежных навигационных сигналов непосредственно после запуска.

Качество измерений с помощью навигационной системы может понизиться при очень сильном ветре на высотах и при плохом приеме наземной системой сигналов с радиозонда. Повышенный электростатический заряд на антенне радиозонда навигационной системы во время гроз или грозовые кристаллические облака часто вызывают потери на длительное время сигнала во время полетов при использовании систем «Лоран», применяющих средства навигационной системы. Статическое электричество на антенне радиозонда обычно разряжается позднее в полете, когда снова становится возможным проведение удовлетворительных измерений. Системы радиозондов, работающих на основе ГСОМ, не имеют подобных проблем.

13.2 ДАТЧИКИ И ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВЕТРА НА ВЫСОТАХ

13.2.1 Оптический теодолит

Оптические теодолиты могут использоваться для слежения за шарами-зондами, когда расходы на проведение радиоветровых измерений неоправданны. Операторам требуется значительная подготовка и профессионализм, чтобы не происходило быстрого увеличения ошибок измерений ветра на высотах при подъеме шара-зонда выше пограничного слоя.

Оптическая система шаропилотного теодолита должна быть такой, чтобы ось окуляра оставалась горизонтальной независимо от направления оптической трубы. Предпочтительно использовать пятиугольную, а не прямоугольную призму, так как незначительное смещение первой не влияет на перпендикулярность обеих частей оптической оси.

Труба, фокусирующая окуляр, который должен быть снабжен пересекающимися линиями или сеткой нитей, должна иметь увеличение в 20 – 25 раз по диаметру и угол зрения не менее 2°. Конструкция основания теодолита должна быть прочной. Следует обеспечить возможность быстрого вращения теодолита вручную или медленного, с помощью фрикционной и червячной передач на азимутальных и вертикальных кругах. Эти круги должны быть подразделены на сектора с ценой деления не более 1° и снабжены верньерами или ручными колесиками микрометра, позволяющими определять углы с точностью до 0,05° и возможной погрешностью до 0,01°. Расположение шкал и их освещение должны обеспечивать возможность для считывания показаний днем и ночью. Люфт приводного механизма кругов не должен превышать 0,025°. Ошибки горизонтальной и вертикальной юстировки не должны превышать 0,1°.

Для облегчения слежения за быстро перемещающимся шаром-зондом теодолит должен быть оснащен визир-искателями. Также полезно для этой цели использовать вторую трубу с широким углом зрения – не менее 8°.

Основание теодолита должно быть смонтировано так, чтобы его можно было крепить к стандартной треноге или на другую опору. Он должен быть снабжен устройством для точной установки горизонтального положения. Штатив должен регулироваться по росту наблюдателя. Теодолит должен иметь прочную конструкцию и защиту от коррозии.

13.2.2 Общие сведения о системах радиоветрового зондирования

Системы радиоветрового зондирования первоначально стали применяться для проведения измерений ветра на высотах при наличии облачности. Эти системы также отличала высокая точность измерений при большой дальности, когда слежение за шарами-зондами осуществлялось до высоты 30 км. Использование этих систем в настоящее время позволяет удовлетворять большую часть современных требований к точности измерения ветра на высотах. Высокая степень автоматизации, возможная в случае применения наиболее современных систем радиоветрового зондирования, исключила необходимость вмешательства оператора в большую часть цикла измерений. Преимущество этих систем заключается также в том, что их использование позволяет сократить расходы при метеорологических работах.

13.2.3 **Радиотеодолит**

Определение ветра с помощью радиотеодолита наиболее подходит для ситуации, когда угол места шара-зонда по отношению к наземной станции достаточно велик на протяжении всего полета. Если угол места шара-зонда превышает приблизительно 16°, большая часть требований к точности измерений ветра на высотах, изложенных в части I главы 12, может быть удовлетворена с помощью относительно небольших антенн слежения. При малых углах места шара-зонда ошибки измерений с использованием радиотеодолитов быстро возрастают с уменьшением угла места даже при больших антеннах слежения (см. раздел 13.5.3). При постоянно сильном ветре на высотах крайне трудно удовлетворять требованиям к точности, изложенным в части I главы 12, используя радиотеодолит, если не применять ретранслятор для обеспечения измерения наклонной дальности (см. раздел 13.2.4.2).

Радиотеодолит обычно отслеживает излучение радиозонда, подвешенного к метеорологическому шару-зонду. Направленная антенна, соединенная с радиопередатчиком, вращается вокруг вертикальной и горизонтальной осей для определения силы максимального сигнала с помощью соответствующих сервомеханизмов. Обычно используется радиочастота 1 680 МГц. Хорошо сконструированная антенна диаметром около 2 м должна иметь низкую чувствительность в области боковых лепестков относительно основного луча; при таком размере может быть достигнута точность углового слежения, равная 0,1°. В этом случае радиотеодолит должен иметь возможность обеспечивать слежение при малых углах места (6 – 10°) без интерференции сигналов, получаемых непосредственно от радиозондов и отраженных от примыкающих поверхностей. Интерференция между прямыми и отраженными сигналами называется многоканальной интерференцией и обычно ограничивает возможности слежения с помощью радиотеодолита при малом угле места шара-зонда. Величина многолучевой интерференции в значительной степени зависит позиционирования антенны в зависимости от соответствующих отражающих поверхностей, вне зависимости от того, располагается радиотеодолит на крыше или на поверхности земли.

Подробное описание характеристик радиотеодолитной антенны, системы обнаружения, сервоконтроля, а также алгоритмов обработки данных следует получить от производителя до покупки. При использовании современных переносных радиотеодолитов с антенной размером менее 2 м можно столкнуться с проблемами многоканальной интерференции при угле места порядка 16°. Когда происходит многоканальная интерференция, как правило, невозможно поймать максимальный сигнал в направлении шара-зонда. Ошибка по высоте изменяется с течением времени, поскольку изменяются условия многоканальной интерференции по мере перемещения радиозонда; это может привести к большим систематическим ошибкам при измерении ветра (более 10 м/с).

Во время слежения за радиозондом с помощью радиотеодолита наблюдаемые азимут и угол места передаются с радиотеодолита на наземную компьютерную систему. По результатам измерений, поступающих с радиозонда, со временем можно получить данные об изменении геопотенциальной высоты, соответствующей наблюдаемым направлениям. Затем может быть рассчитана скорость изменения положения шара-зонда. Компьютер должен представлять результаты измерений ветра на высотах в табличной или графической форме. Непрерывность данных о ветре по вертикали позволит оператору проверить ошибки в слежении. Если оператор удовлетворен качеством слежения, может выпускаться соответствующая сводка о ветре на высотах для потребителей.

Иногда в зависимости от приземного ветра направление перемещения шара-зонда меняется на противоположное, и он опять пролетает над радиотеодолитом почти сразу же после запуска, даже если запущен с наветренной стороны от теодолита. Если при этом радиотеодолит должен обеспечивать автоматизированное слежение с хорошей точностью, он должен обладать очень высокой скоростью сканирования при определении азимута и угла места. Это ведет к повышению требований к техническим характеристикам по сравнению с теми, которые необходимы для большинства полетов, когда шар-зонд находится на большем удалении. Для того чтобы снизить требования к механическим характеристикам, необходимым для точного слежения, несколько современных конструкций радиотеодолитов включают интерферометрическое слежение. В этих системах интерферометр сравнивает фазы сигналов, поступающих на различные участки антенны слежения, с тем чтобы определить положение передающего источника по отношению к ориентации антенны. На практике фазовые данные измеряются с высокой скоростью с использованием микропроцессоров, в то время как простой сервомеханизм ориентирует антенну приблизительно в направлении радиозонда. Приближенная ориентация антенны необходима для обеспечения хорошего соотношения сигнала и шума для интерферометра и для минимизации отражений, получаемых от земли. Угол места и азимут затем рассчитываются на основе сочетания положений антенны, в то время

как направление на источник выводится интерферометром на основе фазовых измерений. Достигаемая точность измерений аналогична точности лучших стандартных радиотеодолитов. Ожидается, что системы интерферометрических радиотеодолитов будут более надежными и, таким образом, более дешевыми в эксплуатации.

13.2.4 Радиолокатор

Отличительной особенностью метода слежения с помощью радиолокатора по сравнению с методом, предполагающим использование радиотеодолита является возможность измерения наклонной дальности непосредственно вместе с азимутом и углом места. Первичный радиолокатор основан на эффекте обнаружения импульсов ультракоротких радиоволн, отраженных от соответствующей мишени, поднимаемой шаром-зондом. При наличии надежного первичного радиолокатора требования к точности для измерения ветра на высотах, изложенные в части I главы 12, могут быть удовлетворены почти при всех обстоятельствах. Очень высокие точностные характеристики при измерении ветра на высотах могут достигаться путем прослеживания с помощью прецизионных радиолокаторов. Для обеспечения точности измерений выше приблизительно 1 м/с важно использовать шары-зонды с отражающей поверхностью (которые являются очень дорогими), а не стандартные метеорологические шары-зонды.

При измерении ветра с помощью первичного радиолокатора не требуется использование радиозонда. Существенная экономия от минимизации расходов на радиозонды возможна в тех случаях, когда существуют структуры технической поддержки по эксплуатации радиолокатора и расходы на персонал невысоки. Однако во многих странах высокие затраты на перемещение и эксплуатацию радиолокаторов по сравнению с расходами на навигационные системы обнаружения ветра привели к уменьшению использования систем первичных радиолокаторов в повседневной метеорологической практике.

Большинство радиолокационных систем по обнаружению ветра включают в себя модулятор, генератор радиочастоты, антенную систему определения направления, приемник и устройство обработки данных для передачи данных о наклонной дальности, азимуте и угле места в наземную компьютерную систему. Модулятор вырабатывает резкие импульсы напряжения длительностью около 1 мкс обычно с частотой повторения от 400 до 1 000 импульсов в секунду. Эти импульсы приводят в действие магнетрон, который дает вспышки энергии мощностью в несколько сот киловатт на ультравысокой частоте. Эта энергия передается через волновод к фокусу параболического отражателя. Когда последний направлен на мишень шара-зонда, импульсы отражаются обратно к той же самой антенной системе и принимаются приемником. Измеряется временной интервал между излучением импульса магнетроном и поступлением сигнала, отраженного от мишени шара-зонда. Он преобразуется в значения наклонной дальности до мишени после введения поправки на задержку сигнала в электронных средствах обнаружения.

Используются длины волн 3,2; 5,7 и 10,6 см. При длине волны 3,2 см для получения желаемой точности слежения можно использовать антенну меньшего размера, и поэтому имеется тенденция к снижению стоимости радара. Однако затухание сигнала при сильных осадках больше проявляется на длине волны 3,2 см, чем на 10,6 см. Когда сильные осадки выпадают часто, возможно, следует использовать более длинные волны для обеспечения возможности проведения наблюдений при большой дальности при всех погодных условиях.

13.2.4.1 Радиолокационные отражатели

Наиболее эффективной мишенью для длин волн, указанных выше, является уголковый отражатель, состоящий в основном из трех взаимно перпендикулярных электропроводящих поверхностей. В одной из моделей верхняя поверхность, которая в полете горизонтальна, представляет собой квадрат. В модели для проведения измерений при большой дальности используется трехсторонняя конструкция, обеспечивающая вращение отражателя. Это позволяет избежать появления «нулевой» точки отражения мишени, наблюдаемой радиолокатором в течение ощутимого времени. Вес и сопротивление мишени во время полета должны быть по возможности минимальными. Мишень должна легко складываться для облегчения хранения и транспортировки.

Энергия, перехватываемая уголковым отражателем в луче радиолокатора, изменяется прямо пропорционально квадрату линейного размера отражателя. Общая теория радиолокации указывает, что отношение получаемой энергии к энергии, передаваемой радиолокатором, прямо пропорционально квадрату размера отражателя и обратно пропорционально четвертой степени наклонной дальности от радиолокатора до отражателя. Используемый отражатель должен быть достаточно большим, чтобы обеспечивать точное слежение до самых больших расстояний при ожидаемых метеорологических условиях. При слабом ветре на высотах могут использоваться более дешевые модели меньшего размера.

Характеристики уголковых отражателей зависят до некоторой степени от длины волны радиолокатора. Коротковолновые радиолокаторы (3 см) отражают больше энергии от данной мишени, делая более практичным использование маломощных систем, но на коротких волнах затухание и затенение мишени во время дождя более существенны.

Наиболее удобными в применении являются уголковые отражатели размером 0,5 – 1,0 м. При этом в качестве «размера» указывается длина внешних сторон (гипотенуз) треугольников, формирующих уголковый отражатель. При конструировании соответствующих проводящих поверхностей успешно используются металлическая фольга, наклеенная на бумагу, расширенный полистирол, металлизированная сетка с размером ячеек около 0,5 см или металлизированный майлар. Эти поверхности должны иметь хорошую электропроводность. Например, поверхности с сопротивлением не более 20 Ом между любыми двумя точками на расстоянии 30 см дают удовлетворительные результаты. Когда отражатель смонтирован, его поверхности должны быть плоскими с точностью до 0,6 см, а плоскости должны быть перпендикулярны с точностью до 1°.

13.2.4.2 Системы ответчиков

В системах вторичной радиолокации импульсы энергии, передаваемые с наземной станции, принимаются системой ответчика, подвешенной к шарозонду. Ответчик может представлять собой отдельный блок или включаться в основную конструкцию радиозонда. Частота обратного сигнала может отличаться от частоты излучаемого сигнала. Время между передачей импульса и реакцией ответчика позволяет измерять непосредственно наклонную дальность.

Преимущество этого метода над методом первичной радиолокации состоит в возможности обеспечения большей дальности слежения для заданной выходной мощности наземного передатчика. Это происходит потому, что энергия, передаваемая ответчиком, не зависит от энергии, которую он получает от наземного передатчика, а обычно и превышает ее. Таким образом, энергия, получаемая наземным приемником, обратно пропорциональна квадрату наклонной дальности цели. В случае первичной радиолокации получаемая энергия обратно пропорциональна четвертой степени наклонной дальности.

Однако если в данном месте требуется проводить значительное число радиоветровых измерений без одновременных радиозондовых измерений, затраты на оперативные расходные материалы в случае вторичной радиолокации будут выше, чем при первичной радиолокации, и применение последней может оказаться более целесообразным.

По сложности конструкции и эксплуатационным требованиям система вторичной радиолокации, как правило, находится между радиотеодолитами и системами первичной радиолокации.

13.2.5 Навигационные системы слежения

В навигационных системах слежения в радиозонд встроена антенная система, которая принимает сигналы с радионавигационной системы. Эта радионавигационная система предназначена для использования агентствами, не зависящими от национальных метеорологических служб. Основная цель применения этой системы состоит, как правило, в осуществлении оперативной навигации воздушных или морских судов или навигации в военных целях. В настоящее время в качестве навигационных систем, применяемых для оперативного измерения параметров ветра, применяются системы «Лоран», в которых используются наземные передатчики и спутниковые ГСОМ.

Для минимизации расходов на обработку сигналов большая часть обработки с целью получения данных о ветре с помощью сигналов навигационной системы осуществляется после ретрансляции радиозондом навигационных сигналов обратно на наземную систему. Таким образом, для этой системы обнаружения ветра является существенным хороший прием сигналов, поступающих с радиозонда; выбор местоположения антенн наземной системы должен обеспечивать прямую видимость радиозонда во всех направлениях. Расчет радиочастот радиозонда должен обеспечивать, чтобы искаженная модуляция несущей частоты радиозонда с навигационными сигналами не привела к разделению несущей частоты, передаваемой с радиозонда на станцию.

Точность измерения ветра на высотах, которая может быть достигнута при использовании навигационных средств, будет меняться в зависимости от географического местоположения и используемых навигационных сигналов. Измерение ветра при помощи ГСОМ является более точным по сравнению с измерением ветра с использованием большинства других оперативных средств.

Одним из основных преимуществ навигационных систем является простота наземной системы, в которой отсутствуют передвижные части и не требуется очень точная настройка антенн слежения. В связи с этим такие системы пригодны для установки на воздушных и морских судах, а также на наземных системах определения ветра.

При использовании для измерения ветра на высотах наземных систем высота определяется на основе радиозондовых измерений геопотенциала. Крайне важно, чтобы время определения обработанных ветровых данных, полученных с помощью навигационной системы наземной системой, точно соответствовало времени определения данных измерений высоты радиозонда.

13.2.5.1 Использование навигационных сигналов в будущем

Произошли значительные изменения в использовании сигналов навигационных систем. Система «Омега», работающая на очень низких частотах (ОНЧ) была выведенна из строя. Международные навигационные системы перешли, главным образом, на навигацию с использованием сигналов, поступающих от антенны навигационных спутников ГСОМ, вращающихся вокруг Земли. Использование спутниковых сигналов в значительной мере заменило практику использования сигналов, поступающих от фиксированных наземных передатчиков. Однако по различным причинам некоторые страны предпочли сохранить наземные навигационные системы для региональных и национальных навигационных сетей. Следует проконсультироваться с руководящими органами в области навигации в отношении использования этих сигналов в будущем, до того как будет рассмотрен вопрос о долгосрочных вложениях в данную систему.

Расчет данных о ветре в случае использования навигационной системы ГСОМ является более сложным, чем в случае получения сигналов навигационных систем с наземных передатчиков, поскольку спутники постоянно перемещаются относительно радиозондов, и система измерения ветра должна иметь возможность в любой момент времени определить получаемые спутниковых сигналы, а также положение и перемещение спутников. Сигналы ГСОМ имеют значительно более высокую радиочастоту, чем сигналы системы «Лоран-С». Таким образом, сигналы ГСОМ должны в значительно большей степени подвергаться предварительной обработке на радиозонде перед передачей на наземный приемник. Таким образом, радиозонды ГСОМ должны обладать более высокими возможностями обработки, чем радиозонды, использовавшиеся до настоящего времени. Точность измерений ветра с помощью ГСОМ выше точности хороших первичных радиолокаторов.

13.2.5.2 Системы, работающие на очень низких частотах

Российская сеть навигационных систем «Альфа» функционирует на ОНЧ. Существует также ограниченное число дополнительных регулярных передач ОНЧ достаточной стабильности, которые тоже могут использоваться для измерений ветра. Прежде чем вкладывать средства в оборудование, в котором могут использоваться дополнительные сигналы ОНЧ, следовало бы удостовериться в наличии дополнительных сигналов ОНЧ на ежедневной регулярной основе.

На выбранных частотах (длины волн от 22 до 30 км) ионосфера и поверхность Земли ведут себя как волновод. Передатчики ОНЧ возбуждают различными способами электромагнитные волны, амплитуды и фазовые скорости которых изменяются в зависимости от высоты ионосферы, направления распространения и расстояния от передатчика. В результате присутствия большого числа экстремумов фазу сигнала трудно предсказать и использовать в пределах 1000 км от передатчика. Вне этих пределов фаза является результативной линейной функцией расстояния. Высота ионосферы подвержена суточным колебаниям. Это вызывает колебания фазы, получаемой в данном месте со стационарного передатчика, особенно если вдоль большей части трассы от передатчика к приемнику происходит либо закат, либо восход Солнца. В период ионосферных возмущений, обусловленных рентгеновским излучением и потоками частиц от Солнца, наблюдаются спорадические аномалии в распространении сигналов. Наиболее часто такие проблемы возникают ближе к концу 11-летнего цикла солнечной активности.

Сигналы ОНЧ, получаемые антенной радиозонда, используются для моделирования несущей частоты радиозонда. После получения сигналов ОНЧ приемником радиозонда они снимаются с носителя и подаются на устройство слежения наземной системы. Скорости изменения фазы сигналов ОНЧ, получаемых радиозондами, рассчитываются относительно внутреннего опорного источника сигнала. При использовании стандартных гиперболических вычислений требуемая стабильность опорного источника сигнала является только умеренной, а использование кварцевого генератора колебаний высокого качества дает удовлетворительные результаты.

13.2.5.3 Цепи передатчиков «Лоран-С»

Система «Лоран-С» представляет собой относительно высокоточное средство, функционирующее с помощью навигационных систем, которое имеет большой радиус действия и действует в полосе низких частот с центром на 100 кГц (длина волны 3 км). Поскольку в основном эта система используется для морской навигации, в частности, в прибрежных и континентальных шельфовых районах, она применяется только в определенных частях земного

шара. Это в основном морские районы северного полушария. В последние годы большая часть передатчиков, расположенных вне прибрежных районов Северной Америки, перешла в другие руки, некоторые станции были закрыты. Некоторые передатчики цепи «Лоран» были модернизированы новыми собственниками для обеспечения региональной морской навигационной сети. В Северной Америке цепи передатчиков «Лоран-С» модернизируются и автоматизируются.

Передача «Лоран-С» состоит из групп восьми или девяти импульсов несущей частоты 100 кГц, длительность каждого из которых составляет 150 мкс. Каждая цепь передатчиков состоит из одной ведущей станции и двух или более смежных. По существу последовательность цепи устанавливается относительно передачи ведущей станции. Каждая смежная станция передает свои группы импульсов в строго фиксированные интервалы времени после ведущей со скоростью, которая определена для данной цепи, – обычно один раз в каждые 100 мс.

Сигналы «Лоран-С» распространяют как приземные, так и пространственные волны, отраженные от ионосферы. Распространение приземных волн относительно стабильно. Имеются только очень небольшие фазовые коррекции, которые зависят от того, распространяются сигналы вдоль суши или моря. Скорость изменения фазовой коррекции по мере изменения положения радиозонда обычно не настолько велика, чтобы влиять на точность измерения ветра. Распространение пространственных волн является более изменчивым, поскольку оно зависит от положения ионосферы и времени суток. Сигналы приземных волн, поступающие от передатчика, существенно сильнее, чем сигналы пространственных волн, но пространственные волны затухают значительно медленнее, чем приземные волны. Таким образом, для системы измерения ветра «Лоран-С» ситуация является наилучшей, когда в сигналах, получаемых радиозондом со всех передатчиков, преобладают приземные волны. Это может быть достигнуто в части районов, охватываемых системой «Лоран-С», но не везде в пределах теоретического охвата системы.

Радиозонд системы «Лоран-С» получает сигналы через свою собственную антенну и затем модулирует несущую частоту радиозонда, с тем чтобы передать сигналы приемнику радиозонда. Устройство слежения «Лоран», используемое для определения времени поступления импульсов системы «Лоран», должно позволять в определенной степени дифференцировать сигналы приземных и пространственных волн. Это достигается посредством определения времени поступления ведущих частей импульсов. Современные устройства слежения «Лоран» могут работать в режиме пересечения цепей, когда сигналы от более чем одной цепи «Лоран» могут использоваться вместе. Эта аппаратура важна для качественных измерений ветра во многих частях районов, обслуживаемых системой «Лоран-С». Данные о ветре рассчитываются на основании скорости изменения во времени разностей поступления сигнала между парами передатчиков «Лоран-С». В расчетах используются все имеющиеся надежные сигналы «Лоран-С», а не минимальный набор из трех сигналов.

Система измерения ветра «Лоран-С» широко используется для метеорологических исследований в Северной Америке и Европе и в метеорологической практике в северо-западной Европе. Изменения в конфигурации цепи «Лоран-С» после обновления систем передатчиков выявили следующее. Необходимость обеспечения возможности адаптации используемых оперативных устройств слежения «Лоран» к новым конфигурациям цепи, прежде всего, за счет изменений в программном обеспечении, а не посредством замены аппаратурного обеспечения.

13.2.5.4 Глобальная система определения местоположения

ГСОМ является очень точной радионавигационной системой, основанной на использовании радиосигналов, передаваемых системой из 25 спутников, находящихся на околоземной орбите в шести плоскостях. Плоскость каждой орбиты пересекает экватор на расстоянии 60° друг от друга, при этом плоскости наклонены под углом в 55° к полярной оси. Период обращения спутника составляет около 11 часов 58 минут. Конфигурация этой системы спутников такова, что в любом месте на земном шаре как минимум четыре спутника находятся над горизонтом круглосуточно, однако в некоторых ситуациях в пределах радиовидимости с поверхности Земли может находиться до восьми спутников.

Сигналы, передаваемые с этих спутников, контролируются атомными эталонами частоты, предназначенными для обеспечения стабильности по частоте с точностью, превышающей 10^{-13}. Каждый спутник передает два уникальных псевдослучайных цифровых дальнометрических кода, наряду с информацией, включающей данные о прохождении спутников системы, эфемериды, время по UTC и рабочие параметры спутников. Дальнометрические коды и данные о системе передаются с использованием двухфазной цифровой технологии расширения спектра. Уровень мощности сигналов дальнометрических кодов составляет –130 дБм, т. е. значительно ниже теплового фонового шума.

Принимаются во внимание следующие коды:

(a) Код грубого разрешения передается на несущей частоте 1 575,42 МГц. Эта частота модулируется специальным спутниковым кодом псевдослучайного шума с частотой модулирующего сигнала в 1,023 МГц. Такая модуляция эффективно расширяет спектр полосы кода грубого разрешения до 2 МГц;

(b) Код высокого разрешения может заменяться контролируемым военным кодом Y в те периоды, когда задействовано устройство для защиты от помех. Код высокого разрешения и данные о системе передаются когерентно на несущих частотах L1 (1 575 МГц) и L2 (1 228 МГц).

Длины волн для сигналов ГСОМ значительно меньше, чем для системы «Лоран». Для приема сигналов ГСОМ используются гораздо меньшие антенны, устанавливаемые на верхней части корпуса радиозонда таким образом, чтобы во все стороны по направлению к горизонту отсутствовали какие-либо экранирующие элементы. Небольшая антенна лучше защищена от помех, возникающих за счет атмосферного электричества, чем антенны систем «Лоран». Однако монтаж антенны ГСОМ может вызвать сложности с размещением на радиозонде датчика температуры, который также должен устанавливаться на верхней части корпуса радиозонда. (Это необходимо для предотвращения проблем, связанных с тем, что поток воздуха, нагревающийся в дневное время при обтекании им верхней части радиозонда, может затем обтекать датчик температуры, если он не установлен над верхней частью корпуса радиозонда.)

Ширина полосы для дальнометрических кодов слишком велика для того, чтобы сигналы ГСОМ могли ретранслироваться на наземную станцию с радиозонда так же, как это делалось в случае сигналов «Лоран». Сигналы ГСОМ нуждаются в предварительной обработке на радиозонде, для того чтобы сократить информацию ГСОМ до таких сигналов, которые могут передаваться на наземную станцию на несущей частоте радиозонда (либо в виде аналоговой информации, как это делалось в случае применения систем «Лоран», либо в виде потока цифровых данных). Предварительная обработка может обеспечиваться различными методами. Первые системы радиозондов ГСОМ, которые можно было использовать на практике, были разработаны для применения кода грубого разрешения в дифференциальном режиме. Это требует одновременного приема сигналов ГСОМ приемником наземной станции и приемником на радиозонде. Данные о прохождении спутников и другая информация по ГСОМ хранятся в процессоре наземной станции ГСОМ. Точные расчеты ветра требуют получения сигналов как минимум с четырех спутников. В дифференциальном режиме фазовое или доплеровское смещение сигналов, принимаемых радиозондом, соотносится с принимаемыми на наземной станции. Это особенно удобно, когда радиозонд находится около наземной станции, поскольку ошибки по определению местоположения, возникающие за счет задержки при распространении радиоволн со спутника до приемников или из-за устройства для защиты от помех, аналогичны для обоих приемников и могут быть в значительной степени устранены.

Системы слежения, использующие ГСОМ, могут обеспечивать точное слежение при очень большом числе измерений по сравнению с системой «Лоран». Поэтому можно измерять изменение истинной горизонтальной скорости, так как радиозонд раскачивается как маятник под шаром-зондом с периодом колебаний примерно 10 с. Для большинства задач данные о ветре на высотах с очень большим вертикальным разрешением (50 м) не требуются (исключение – пограничный слой атмосферы), и эти движения качания лучше всего отфильтровывать до сообщения данных о ветре на высотах.

Более ранние радиозонды ГСОМ были в достаточной степени уязвимы для внешних радиоволновых помех, поскольку чувствительность радиозондового навигационного приемника должна была соответствовать слабым сигналам ГСОМ. В последних разработках защита против внешних радиоволновых помех была оптимизирована при конструировании радиозондов.

Радиозонды ГСОМ в настоящее время применяются примерно на четверти глобальной сети радиозондов. Большинство систем, используемых с 2005 г. определяют сигналы ГСОМ путем декодирования кода грубого разрешения. Эти радиозонды могут обеспечивать точное позиционирование в трех измерениях в процессе всего подъема радиозонда.

Основной практической проблемой в отношении радиозондов ГСОМ является время, которое требуется для того, чтобы устройство слежения ГСОМ, установленное на радиозонде, синхронизировалось с сигналами, получаемыми со спутников. Не рационально запускать радиозонд до завершения синхронизации. Данный процесс может потребовать размещения радиозонда снаружи на несколько минут перед запуском или, в качестве альтернативы, использования метода для передачи сигналов ГСОМ на радиозонд в место осуществления предподготовки.

13.3 МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

13.3.1 Общие сведения, касающиеся обработки данных

Современные датчики слежения могут производить отсчеты не за интервалы в 1 мин, как это обычно делалось на использовавшихся ранее неавтоматических системах, а намного чаще. Обработка данных о ветре, как правило, будет полностью автоматизирована при использовании включенного в систему наземного компьютера. Данные о ветре на высотах будут накапливаться и демонстрироваться оператором на экране в целях проверки до того, как информация будет выпускаться для пользователей.

Таким образом, отбор данных по слежению оптимально производится с интервалами в 10 с и менее. Отбор данных должен производиться с наиболее высокой частотой, которая считается полезной для получения информации по системе слежения. Высокая интенсивность производства наблюдений облегчает контроль за качеством данных с помощью автоматизированных систем обработки. После редактирования данные слежения могут быть сглажены с использованием методов математической статистики и использованы для определения изменения местоположения со временем, если это требуется. Применяемое сглаживание позволит определить толщину атмосферного слоя, к которому относится измерение ветра на высотах. Сглаживание часто необходимо будет изменять для отдельных участков полета с учетом различных потребностей пользователей в отношении данных для различных высот и ограничений используемой системы измерения ветра на высотах. Если точность измерения на верхних уровнях становится слишком низкой, то вертикальное разрешение производимых измерений может быть установлено ниже оптимальных требований, для того чтобы ошибка измерений ветра находилась в приемлемых пределах.

В эффективных алгоритмах для редактирования и сглаживания можно использовать многочлены низшего порядка (Acheson, 1970) или кубические сплайны (de Boor, 1978). Алгоритмы для расчета ветра по данным радиолокационных и радиотеодолитных наблюдений могут быть найдены в публикации ВМО (WMO, 1986). В целом ветер может определяться или по изменению местоположения, рассчитанному с помощью данных слежения, или по степени изменения сглаженных измеряемых переменных системы слежения (см. Passi, 1978). Многие современные системы используют последнюю методику, однако при этом необходимы такие алгоритмы, которые позволяют решить проблемы, связанные с некоторыми особенностями измеряемых переменных, например, в тех случаях, когда шар перемещается с большим углом места в обратном направлении над площадкой, с которой проводится слежение.

Когда ветер рассчитывается по данным слежения и демонстрируется для проверки, то важно при этом указать те районы полета, для которых данные слежения отсутствуют или считается, что шум слишком велик, чтобы эти данные можно было использовать. Некоторые из алгоритмов, применяемых для интерполяции, могут быть недостаточно стабильными в тех случаях, когда имеются пробелы в данных слежения. Важно проводить различие между надежными измерениями вертикального сдвига ветра и ложными сдвигами, которые являются результатом автоматической обработки данных, когда данные слежения отсутствуют. Часто в начале подъема шара качество данных слежения достаточно низкое. В случае если система измерения ветра на высотах не позволяет произвести корректного измерения ветра вскоре после запуска, предпочтительно оставить пробел в сообщаемых данных по ветру до того момента, к которому будут получены корректные данные слежения. Это обусловлено тем, что интерполяция между поверхностью и первыми уровнями достоверных данных часто требует интерполяции по слоям, в которых отмечается вертикальный сдвиг ветра. При таких условиях автоматизированная система обработки редко функционирует удовлетворительно.

Было предложено, чтобы для повышения гарантии качества наблюдений в системах измерения ветра на высотах использовались не один, а несколько методов слежения. В этих условиях оптимальное решение относительно того, как использовать информацию по местоположению могло бы быть найдено с помощью метода наименьших квадратов, применяемого для переопределенной системы нелинейных уравнений (см. Lange, 1988; Passi, 1978). Такой тип анализа мог бы также применяться для интерпретации тестов в тех случаях, когда наблюдение за шаром ведется одновременно более чем одной системой.

13.3.2 Шаропилотные наблюдения

Точная установка по уровню и ориентирование оптического теодолита относительно истинного севера выполняется заведомо до наблюдений за азимутом и углами места движущегося шара. Отсчеты азимута и угла места должны производиться с интервалами не менее 1 мин. Азимут должен отсчитываться с точностью до десятой доли градуса. При подъеме шара-пилота угол места отсчитывается с точностью до десятой доли градуса при

значениях 15° или больше. Если угол места составляет менее 15°, необходимо измерять его с точностью до 0,05°.

Если при подъеме радиозонда дополнительно используется оптический теодолит, можно получить большую точность измерений ветра на меньших высотах. Таким образом, углы места должны отсчитываться до десятой доли градуса, когда их значения превышают 20°, с точностью до 0,05° при их значениях 20° или менее, но более 15° и с точностью до 0,01°, когда углы места составляют 15° или менее. Отсчет времени может осуществляться либо с помощью секундомера, либо с помощью специального таймера, который подает звуковые сигналы через заданные промежутки времени.

Определение скорости и направления ветра при наблюдениях с использованием одного теодолита основано на тригонометрических вычислениях ежеминутных изменений положения шара-пилота в горизонтальной плоскости. Для этого лучше всего использовать карманный калькулятор.

Если необходима более высокая точность, то следует использовать метод двух теодолитов. Длина базисной линии между приборами должна составлять, по крайней мере, 2 км и располагаться по возможности под прямым углом к направлению преобладающего в данный момент ветра. Расчеты упрощаются, если обе площадки для слежения находятся на одном уровне. Связь между двумя площадками с помощью радио или наземной линии помогает синхронизировать наблюдения с обоих мест. Синхронизация необходима в том случае, если нужно произвести измерения с высокой точностью. Регистрирующие теодолиты, в которых отсчеты записываются с помощью электроники, будут также полезны для достижения большей точности измерений.

Для слежения с помощью нескольких теодолитов могут использоваться альтернативные процедуры оценки. Избыточность, которая обеспечивается всеми данными слежения, позволяет повысить точность измерений, однако дополнительная проблема при этом заключается в том, что вычисления должны выполняться с помощью персонального компьютера (см. Lange, 1978; Passi, 1978).

13.3.3 Наблюдения с использованием направленной антенны

Системы измерения ветра, которые обеспечивают слежение посредством использования направленных антенн, требуют очень тщательного соблюдения процедур установки и технического обслуживания. Необходимо приложить все усилия для обеспечения точного измерения угла места и азимута, что требует точного соблюдения горизонтальности установки и тщательного технического обслуживания, для того чтобы обеспечить такое положение, при котором электрическая ось антенны находится в положении, близком к положению механической оси. Это можно проверить различными методами, включая наведение на местные передатчики или цели, местоположение которых известно. В последние годы плохая ориентация по азимуту вызывала дополнительные ошибки при измерениях ветра на многих аэрологических станциях.

Калибровка наклонной дальности первичного радиолокатора может быть проверена посредством использования соответствующих стационарных мишеней. Проверка слежения радиолокатора в целом может быть осуществлена посредством сравнения геопотенциальных высот, полученных с помощью радиолокатора, с данными одновременных радиозондовых измерений. Вопрос о поправках к данным измерений высот радиолокатором за счет ошибок слежения, обусловленных атмосферной рефракцией, излагается в разделе 13.7.

На высотах приблизительно до 24 км сравнение значений высоты, полученных с помощью радиолокатора, со значениями высоты геопотенциала, полученными с помощью радиозондов, может быть использовано для выявления случаев, когда слежение с помощью радиолокатора не удовлетворяет стандартным требованиям. Более того, если известно, что измерения радиолокатором наклонной дальности надежны, то можно определить небольшие систематические ошибки по углу места посредством сравнения высот, измеренных с помощью радиолокатора, с высотами, полученными с помощью радиозонда, как функцию котангенса угла места. Типичные ошибки при определении радиозондом высоты геопотенциала были определены ВМО для большинства используемых радиозондов (WMO, 1987).

При использовании как радиолокационных, так и радиотеодолитных систем, встречаются трудности при попытке слежения за мишенью на малом расстоянии. Это обусловлено тем, что сила сигнала, принимаемого боковым лепестком антенны, может быть достаточно большой для поддержания автоматического слежения на малом расстоянии, однако при слежении на боковом лепестке сила принимаемого сигнала затем быстро уменьшается, и через несколько минут мишень, очевидно, будет потеряна. После потери мишени, возможно, будет сложно восстановить слежение с помощью некоторых систем при наличии на пусковой площадке низкой облачности, дождя или тумана. Поэтому необходимо иметь метод проверки того, что мишень находится в центре

главного лепестка в начале полета. Такая проверка может проводиться оператором с использованием визира, телескопа или видеокамеры, ориентированных по оси антенны. Смещение слежения труднее проверить с помощью интерферометрического радиотеодолита, когда механическое слежение радиотеодолита необязательно совпадает точно с наблюденным направлением перемещения шара.

13.3.4 Наблюдения с использованием радионавигационных систем

Для того чтобы удовлетворительным образом произвести аэрологические измерения при помощи наземных радионавигационных систем, необходимо, чтобы радиозонд принимал сигналы, по крайней мере, с трех станций. Разность во времени поступления навигационных сигналов, принимаемых радиозондом после когерентной передачи из двух мест, определяет местоположение или линию положения (см. WMO, 1985). Линия положения представляет собой гиперболу на плоскости (хотя становится эллипсом на поверхности сферы). Поэтому навигационные системы, использующие данный метод, называют гиперболическими. Двух пересекающихся линий положения достаточно для определения положения на плоскости. Однако при этом может возникнуть большая ошибка в определении положения, связанная с небольшой ошибкой во времени поступления сигналов, если линии местоположения близки к параллельным, когда они пересекаются. В отношении навигационных систем измерения ветра на высотах было четко продемонстрировано, что все имеющиеся навигационные сигналы данного типа (обычно, по крайней мере, четыре или пять) должны использоваться для улучшения надежности слежения. Один тип алгоритма, использовавшийся для всех имеющихся навигационных сигналов, был описан в работе Karhunen (1983).

Геометрия использования сигналов спутниковой навигации такова, что алгоритмы обнаружения ветра с использованием ГСОМ представляются наиболее надежными в том случае, если сигналы получаются в по меньшей мере, восьми спутников в процессе подъема. Для определения периодов, в которые геометрия расположения спутников не обеспечивает возможности обнаружения ветра, следует использовать данные о прохождении спутников ГСОМ. На практике при существующих конфигурациях спутников такие ситуации происходят достаточно редко.

При проведении измерения ветра на высотах с использованием систем слежения с помощью навигационных средств наземная аппаратура навигационного слежения должна быть точно синхронизирована с передачами сигналов навигационных средств еще до запуска. Синхронизация обычно достигается путем использования сигналов, принимаемых местной антенной, связанной с приемником наземной системы. Эта антенна должна обеспечивать прием адекватных сигналов для синхронизации при любых погодных условиях, которые, как показывает опыт, возможны в данном пункте.

Наземная система должна также обеспечивать оператору четкую индикацию поступающих сигналов навигационных систем для определения ветра как до запуска, так и в ходе полета радиозонда.

После запуска системы определения ветра с помощью навигационных средств работают в значительной степени в автоматизированном режиме. Однако оценки ожидаемых ошибок при измерениях, основанные на конфигурации и качестве принимаемых сигналов навигационных средств, будут полезны для операторов. В ходе полета оператор должен выявлять радиозонды, имеющие отказы, с плохими характеристиками приема или передачи, данные наблюдений которых явно не удовлетворяют стандартным требованиям. Эти данные наблюдений необходимо исключать и по мере необходимости пытаться произвести повторный запуск.

13.4 РАЗМЕЩЕНИЕ НАЗЕМНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Соответствующая площадка для радиотеодолита или радиолокатора располагается на высоком, по возможности открытом месте. Не должно быть обширных препятствий, закрывающих угол более 6° в точке наблюдения. Идеальным местом может быть симметричный холм с пологими (около 6°) склонами протяженностью 400 м в лощине, окруженной холмами, склоны которых поднимаются под углом 1 – 2°.

Для установки системы слежения необходим надежный фундамент, на котором можно монтировать оборудование. Проведение измерений с помощью навигационных средств будет успешным в случае хорошего приема сигналов местной антенной навигационных средств и антенной наземной системы для радиозонда. Эти антенны должны монтироваться на площадке для проведения аэрологических наблюдений, где обеспечена открытость горизонта для хорошего приема со всех направлений.

Результаты измерений ветра на высотах обычно сообщаются вместе с результатами измерений

приземного ветра. Предпочтительно, чтобы приземный ветер наблюдался с площадки, расположенной близко к месту запуска шара-пилота. Площадка для запуска должна выбираться таким образом, чтобы получаемые данные о ветре соответствовали целям проведения измерений ветра на высотах. Например, в случае если данные о ветре на высотах необходимы для определения локальных воздействий в масштабе аэродрома, оптимальное местоположение площадки может отличаться от того, которое необходимо для наблюдения за движениями мезомасштаба и синоптического масштаба.

13.5 ИСТОЧНИКИ ОШИБОК

13.5.1 Общие положения

Ошибки при измерении ветра на высотах представляют собой сочетание ошибок, связанных с несовершенным слежением за горизонтальным перемещением мишени, ошибок определения высоты мишени и различий между движением мишени и фактическим движением атмосферы.

13.5.1.1 Ошибки при слежении за мишенью

Взаимосвязь между ошибками измерения ветра и ошибками слежения зависит от применяемого метода наблюдения. Для некоторых систем, таких как радиотеодолиты, ошибки определения ветра значительно изменяются в зависимости от дальности, азимута и угла места даже в тех случаях, когда ошибки определения этих параметров остаются постоянными во времени. В то же время при использовании навигационных средств слежения ошибки измерения ветра обычно не изменяются слишком сильно при разных значениях дальности или высоты.

Неопределенности, обусловленные расчетом ветра вручную, были оценены в публикации ВМО (WMO, 1975). Был сделан вывод о том, что риск внесения существенных ошибок за счет использования ручных методов расчета ветра (таких как методы, предусматривающие применение планшетов, логарифмических линеек и т. п.) был слишком велик и что расчеты ветра на высотах следует автоматизировать в возможно большей степени.

Точность систем измерения ветра на высотах время от времени изменяется. Это изменение может происходить в короткие периоды времени в ходе конкретного полета мишени, когда слежение временно ухудшается, или в ходе всего запуска, например, в том случае, если сигналы, передаваемые с зонда, использующего навигационные средства, являются дефектными. В некоторых местах точность измерения ветра на высотах может постепенно уменьшаться со временем в течение нескольких месяцев в связи с нестабильностью работы системы слежения или с неправильной наладкой наземной системы. Во всех случаях было бы полезно рассчитывать оценки точности измерений ветра с помощью систем измерения ветра на высотах в реальном масштабе времени для дополнения этой информацией сообщаемых данных измерений ветра на высотах. Информация об ошибках позволила бы выявлять результаты измерений более низкого качества, и при численном анализе им мог бы придаваться меньший вес. Сообщения об ошибках могли бы обеспечиваться на практике посредством использования соответствующих кодов TEMP или PILOT и таблиц BUFR (ВМО, 1995).

Когда ошибки слежения за мишенью начинают приводить к неприемлемым ошибкам в результатах измерения ветра при конкретном вертикальном разрешении, то обычно приходится использовать меньшее вертикальное разрешение. В течение значительных промежутков времени может не происходить быстрого изменения ветра на высотах по вертикали. Часто трудно обнаружить какие-либо серьезные различия в результатах измерения ветра на высотах при вертикальном разрешении 150 м и 1,2 км.

Практика ступенчатого уменьшения вертикального разрешения при измерениях ветра на высотах в верхней тропосфере и нижней стратосфере в основном принималась для преодоления ограничений по слежению, присущих радиотеодолитам. Такая практика не оправдана фактической вертикальной структурой атмосферы. Многие из наиболее значительных вертикальных сдвигов ветра обнаруживаются в верхних слоях струйных течений на высотах 10 – 18 км (см., например, вертикальные профили ветра, представленные в работе Nash, 1994).

13.5.1.2 Ошибки определения высоты

Ошибки определения высоты обычно незначительны, если только высота не рассчитывается по времени нахождения шара в полете и предполагаемой скорости его подъема.

Однако испытания полностью автоматизированных систем измерения ветра на высотах часто показывали расхождение между временем, определенным для проведения наблюдений за ветром, и временем, установленным для связанных с ними радиозондовых измерений. В некоторых случаях начало измерений ветра не совпадало с началом радиозондовых измерений, в других – синхронизация нарушалась в ходе полета по ряду причин. В некоторых системах

время, установленное для сообщений о ветре, не соответствовало времени получения данных, использовавшихся для расчета ветра, а скорее соответствовало времени начала или завершения отбора данных. Все виды ошибок, связанных с согласованием по времени, могут приводить к серьезным ошибкам определения высоты, на которой проводились измерения ветра. В надежных оперативных системах такие ошибки должны быть устранены.

13.5.1.3 Движение мишени по отношению к атмосфере

Движение мишени относительно воздуха имеет наибольшее значение для систем, обладающих высокой точностью слежения и самым большим вертикальным разрешением. Например, раскачивание радиозонда ГСОМ под шаром-пилотом отчетливо прослеживается с помощью ГСОМ и должно отфильтровываться в возможно большей степени.

Ошибки, обусловленные движением шара-пилота относительно атмосферы, возникающим из-за распространения вихрей от спутного потока шара, могут достигать 1 – 2 м/с (уровень 2σ) при отслеживании небольших шаров-пилотов (массой 50 г) при вертикальном разрешении 50 м. В случае повседневных оперативных измерений (вертикальное разрешение около 300 м) при использовании шаров большего размера (массой более 350 г) ошибки, связанные с движением шара, меньше.

Горизонтальное движение зондов, сбрасываемых с парашютом относительно атмосферы, также может ограничить точность измерений сбрасываемыми зондами, слежение за которыми производится с помощью ГСОМ. Скорость спуска сбрасываемых зондов обычно вдвое больше скорости подъема оперативных шаров-радиозондов.

13.5.2 Ошибки при шаропилотных наблюдениях

Инструментальные погрешности хорошего оптического теодолита желательно не должны превышать ± 0,05°. Эти погрешности могут медленно изменяться с изменением азимута или угла места, но они невелики по сравнению с ошибками, которые вносятся наблюдателем. Погрешности шкал отсчета не должны превышать 0,1°. Значение этих погрешностей возрастает при большой дальности и при работе с малыми углами места.

При слежении за подъемом с помощью одного теодолита источником наибольших ошибок является неопределенность скорости подъема шара. Эта неопределенность возникает из-за различий в заполнении шара газом, формы шара и скорости вертикальных движений воздуха в атмосфере, в которой поднимается шар. Соответствующая ошибка определения скорости подъема дает в результате пропорциональную ошибку определения высоты, на которой находится шар, и, следовательно, с учетом изменения угла места, пропорциональную ошибку определения скорости ветра.

При отслеживании подъема с помощью двух теодолитов погрешности системы зависят от принятого метода оценки. Анализ погрешностей был представлен в работе Schaefer and Doswell (1978).

13.5.3 Ошибки систем, в которых используется направленная антенна

Связь между ошибками по вектору ветра и ошибками фактических измерений слежения может быть выражена как приближенная функция высоты и средней скорости ветра (или отношения последней к средней скорости подъема шара-зонда). Выражения для случайных ошибок при измерениях ветра с помощью первичных радиолокаторов и радиотеодолитов имеют следующий вид:

(a) для первичного или вторичного радиолокатора, измеряющих наклонную дальность, азимут и угол места:

$$\varepsilon_v^2 = 2 \times [\varepsilon_r^2 \times Q^2/(Q^2 + 1) + \varepsilon\theta^2 \times h^2 + \varepsilon\varphi^2 \times h^2 \times Q^2]/t^2 \qquad (13.1)$$

(b) для оптических теодолитов или радиотеодолитов и радиозондов, измеряющих азимут, угол места и высоту:

$$\varepsilon_v^2 = 2 \times [\varepsilon h^2 \times Q^2 + \varepsilon_\theta^2 \times h^2 \times (Q^2 + 1)^2 + \varepsilon_\varphi^2 \times h^2 \times Q^2]/t^2 \qquad (13.2)$$

где ε_v –векторная ошибка расчета ветра; ε_r – случайная ошибка измерения наклонной дальности; ε_θ – случайная ошибка измерения угла места; ε_φ – случайная ошибка измерения азимута; ε_h – случайная ошибка измерения высоты (рассчитанная по измеренному значению давления); Q – отношение величины среднего вектора ветра до высоты h к средней скорости подъема шара-зонда до высоты h; t – интервал времени между измерениями.

Таблица 13.2 демонстрирует различие точности определения вектора ветра с помощью указанных выше двух методов при измерении ветра на высотах. Средняя скорость подъема, принимаемая при измерении ветра на высотах, обычно должна составлять 5 – 8 м/с. Значения ошибок вектора ветра рассчитываются по уравнениям (13.1) и (13.2) для

различных высот и значений Q, для системы слежения со следующими характеристиками: ε_r = 20 м; ε_θ = 0,1°; ε_φ = 0,1°; εh – ошибка измерения высоты, соответствующая ошибке определения давления, равной 1 гПа; t = 1 мин.

Из таблицы 13.2 видно, что точность измерения ветра с помощью радиотеодолита (или оптического теодолита) при заданной точности слежения, безусловно, меньше точности измерений с помощью первичных или вторичных радиолокаторов.

В выражениях для векторной ошибки рассчитанных значений ветра в уравнениях (13.1) и (13.2) первые два члена в квадратных скобках представляют собой радиальную ошибку и ошибку в значениях ветра, наблюдавшегося с тем же азимутом, что и у следящей антенны. Третий член в квадратных

Таблица 13.2. 90-процентная векторная ошибка ε_v (м/с) как функция высоты и отношения Q среднего ветра к скорости подъема

	Радиолокатор						*Радиотеодолит*					
Q	ε_v *5 км*	ε_v *10 км*	ε_v *15 км*	ε_v *20 км*	ε_v *25 км*	ε_v *30 км*	ε_v *5 км*	ε_v *10 км*	ε_v *15 км*	ε_v *20 км*	ε_v *25 км*	ε_v *30 км*
1	1	1	1,5	1,5	2,5	2,5	1	1,5	3	5,5	9	25
2	1	1,5	2,5	3	4	4	5	4	6,5	11	19	49
3	1,5	2,5	3	4	5	6	4	7	11	19	30	76
5	1,5	3	5	6	2,5	10	9	18	27	42	59	131
7	2,5	5	7	9	11	13	18	34	51	72	100	194
10	3	6,5	10	13	16	19	34	67	100	139	182	310

ПРИМЕЧАНИЯ:

1. Настоящая таблица не включает дополнительные ошибки, вызванные многолучевой интерференцией при радиотеодолитных наблюдениях, которые возможны при значениях Q, равных 7 – 10.
2. На практике радиотеодолитные ветровые наблюдения сглаживаются по бульшим по вертикали слоям, чем указано в этих расчетах, для всех высот за исключением 5 км. Таким образом, ошибки радиотеодолитов на высотах 15 км и более должны делиться на коэффициент, равный, по крайней мере, четырем, для соответствия оперативной практике.

Таблица 13.3. Соотношение $\alpha_{\varepsilon v}$ компонентов ошибок при измерении ветра на высотах ($\alpha_{\varepsilon v}$ равно отношению тангенциальной ошибки к радиальной)

	Radar						*Radiotheodolite*					
Q	$\alpha_{\varepsilon v}$ *5 км*	$\alpha_{\varepsilon v}$ *10 км*	$\alpha_{\varepsilon v}$ *15 км*	$\alpha_{\varepsilon v}$ *20 км*	$\alpha_{\varepsilon v}$ *25 км*	$\alpha_{\varepsilon v}$ *30 км*	$\alpha_{\varepsilon v}$ *5 км*	$\alpha_{\varepsilon v}$ *10 км*	$\alpha_{\varepsilon v}$ *15 км*	$\alpha_{\varepsilon v}$ *20 км*	$\alpha_{\varepsilon v}$ *25 км*	$\alpha_{\varepsilon v}$ *30 км*
1	1/2	1	1	1	1	1	1/3	1/2	1/3	1/4	1/5	1/13
2	1	1	2	2	2	2	1/3	1/3	1/3	1/4	1/6	1/13
3	1	2	2	3	3	3	1/4	1/4	1/4	1/5	1/6	1/13
5	1	3	4	4	5	5	1/5	1/5	1/6	1/6	1/7	1/14
7	3	5	5	6	6	7	1/7	1/7	1/7	1/7	1/9	1/14
10	4	7	8	9	9	9	1/10	1/10	1/10	1/11	1/11	1/16

скобках представляет собой тангенциальную ошибку – ошибку в значениях ветра, наблюдавшегося под прямым углом к азимуту следящей антенны. Для этих типов систем измерения ветра на высотах распределение ошибок не является независимым от направлений и не может адекватно представляться одним параметром. Таким образом, значения в таблице 13.2 указывают размер ошибок, но не направление, в котором, они действуют.

Когда тангенциальные и радиальные ошибки очень сильно различаются по величине, распределение является в значительной степени эллиптическим и совместные ошибки имеют тенденцию концентрироваться или параллельно оси следящей антенны, или перпендикулярно к этой оси. В таблице 13.3 приведены некоторые значения отношения тангенциальных ошибок к радиальным, которые совместно дают векторные ошибки, представленные в таблице 13.2. Значения более 3 в таблице 13.3 указывают на ситуации, когда доминирует компонент тангенциальной ошибки. Таким образом, при радиолокационном измерении ветра тангенциальные ошибки доминируют при больших расстояниях (высокие значения средней скорости ветра и, следовательно, высокие значения Q плюс самые большие высоты). При радиотеодолитном измерении ветра радиальные ошибки доминируют при больших расстояниях, и соотношения становятся гораздо меньше единицы. Ошибки по углу места вносят существенный вклад в радиальные ошибки радиотеодолитов. Однако случайные ошибки определения высоты радиозонда вносят наиболее значительный вклад на больших высотах, когда значения Q малы.

Результаты, приведенные в таблицах 13.2 и 13.3, основаны на теоретической оценке ошибок по различным видам систем. Однако предполагается, что ветер рассчитывается просто по разности между данными двух дискретных отсчетов слежения. При этом не принимается во внимание возможность повышения точности за счет вычисления скорости изменения местоположения по большому объему информации по слежению при высоком временном разрешении. В таблице 13.4 содержатся оценки точности

Таблица13.4. Оценки типичных случайных векторных ошибок (уровень 2σ, единицы м/с) при измерениях ветра на высотах, полученные в ходе сравнений радиозондов ВМО (включаютсяоценки типичных значений Q и $\alpha_{\varepsilon v}$ для каждой из четырех фаз)

Система	ε_v *3 км*	$\alpha_{\varepsilon v}$ *3 км*	Q *3 км*	ε_v *18 км*	$\alpha_{\varepsilon v}$ *18 км*	Q *18 км*	ε_v *28 км*	$\alpha_{\varepsilon v}$ *28 км*	Q *28 км*	*Место испытания*
Первичный радиолокатор (Соединенное Королевство)	1,1	1	3,5	2,1	1,3	5	2,7	1,6	5	Соединенное Королевство[a]
Радиотеодолит (Соединенные Штаты)	2,1	≈ 1	1,5	4,8	≈ 1	2,5	5,2	≈ 1	1	Соединенное Королевство
Радиотеодолит (Соединенные Штаты)	2,8	≈ 1	2,5	10,4	0,4	6	9	0,33	4	Соединенные Штаты
Портативный радиотеодолит	1,5	≈ 1	< 1	4,8	≈ 1	3	5,8	≈ 1	1,5	Казахстан
Портативный радиотеодолит	2,2	≈ 1	1,5	12	0,31	5,5	9	0,23	4	Япония
Радиотеодолит (Япония)	1,7	≈ 1	1,5	6,4	0,48	5,5	4,7	0,48	4	Япония
Вторичный радиолокатор (АВК, Россия)	1,5	≈ 1	< 1	2,6	≈ 1	3	2,6	≈ 1	1,5	Казахстан
Первичный радиолокатор (Китай)	1,5	≈ 1	< 1	3,8	≈ 1	3	3,4	≈ 1	1,5	Казахстан

[a] Данные, полученные в ходе испытаний в Соединенном Королевстве после фазы I сравнений радиозондов ВМО (см. Edge, et al., 1986).

фактических измерений, полученные по ряду радиолокаторов и радиотеодолитов в ходе четырех фаз международных сравнений радиозондов ВМО (см. раздел 13.6.1.2 с информацией по тестам).

Из трех радиотеодолитов, тестированных в ходе международных сравнений радиозондов ВМО, японская система наилучшим образом зарекомендовала себя при высоких значениях Q, но позже этой системой для измерения угла превышения в большом объеме использовалось сглаживание и точность измерения скорости вертикальных движений в верхних слоях струйных течений была недостаточно высокой. Для портативного радиотеодолита меньшего размера, установленного Соединенными Штатами в Японии, характерны самые большие ошибки измерения ветра при высоких значениях Q в связи с проблемами, обусловленными многолучевой интерференцией.

Эллиптичность распределения ошибок радиолокационных и радиотеодолитных наблюдений продемонстрировала тенденции, предсказанные для высоких значений Q. Однако эллиптичность была не столь высокой, как указано в таблице 13.3, вероятно, в связи с тем, что случайные ошибки скорости изменения азимута и угла превышения, полученные на практике, были меньше принятых для таблицы 13.3.

13.5.4 Ошибки наземных радионавигационных систем

Ошибки навигационной системы зависят от фазовой стабильности сигналов системы, принимаемых радиозондом, и от положения радиозонда по отношению к сети передатчиков навигационной системы. Однако нельзя при этом игнорировать качество телеметрической линии связи между радиозондом и наземным приемником. В тестах, в которых радиозонды перемещались на большие расстояния (по крайней мере, на 50 – 100 км), было обнаружено, что ошибки измерения ветра, характерные для навигационных систем измерения ветра, возрастают с увеличением расстояния, однако обычно в той же или в меньшей степени, что и ошибки при такой же дальности в случае использования первичного радиолокатора. Прием сигнала с радиозонда сразу же после запуска не всегда бывает надежным. Ошибки измерения ветра с помощью системы «Лоран-С» сразу же после запуска больше, чем при уже установившемся движении радиозонда через несколько минут после запуска.

Точность навигационных измерений ветра ограничена, главным образом, соотношением сигнал-шум сигналов, принимаемых радиозондом. Используемое на практике для получения надежных данных о ветре время осреднения составляет от 30 с до 2 мин для сигналов «Лоран-С» и менее 1 мин для сигналов ГСОМ. Мощность сигналов, принимаемых в данном месте от некоторых передатчиков «Лоран-С», может значительно колебаться в течение дня. Обычно это связано с тем, что в определенных ситуациях суточные колебания высоты и ориентации ионосферных слоев оказывают сильное влияние на мощность сигнала. Колебания мощности и устойчивости сигнала могут быть настолько велики, что в некоторых местах успешные измерения ветра с помощью системы «Лоран-С» будут невозможны в течение всего дня.

Другим важным фактором, влияющим на точность, является геометрическое уменьшение точности навигационной системы, которое зависит от местоположения радиоприемника зонда по отношению к передатчикам системы. Когда радиозонд находится поблизости от центра базисной линии между двумя передатчиками, то соответствующая случайная ошибка определения разности времени поступления сигналов от двух передатчиков даст в результате небольшую случайную ошибку определения местоположения в направлении, параллельном базисной линии между передатчиками. Однако та же случайная ошибка определения разности времени поступления сигналов приведет к очень большой ошибке определения местоположения в том же направлении, если радиозонд находится на продолжении базисной линии одного из передатчиков. Для обеспечения самой высокой точности двумерного измерения горизонтального ветра требуются, по крайней мере, две пары навигационных передатчиков, расположенных таким образом, чтобы их базисные линии находились приблизительно под прямым углом, а радиозонд при этом перемещался к центру треугольника, образованного тремя передатчиками. На практике во всех случаях, когда это возможно, используются сигналы с более чем двух пар навигационных передатчиков для повышения точности ветровых наблюдений. Использование метода наименьших квадратов для определения согласованности полученных данных измерений ветра весьма полезно при определении оценок ошибок измерения ветра.

Помехи, препятствующие распространению сигналов сети навигационных передатчиков, являются еще одним источником ошибок.

13.5.4.1 Системы для измерения ветра «Лоран-С»

Имеющиеся в продаже системы обеспечивают хорошее качество данных об измерении ветра (таблица 13.5). Качество измерений, полученных при работе, главным образом, с сигналами в виде приземной волны, было рассчитано по тестам установки на Британских островах, как сообщалось в работе Nash и Oakley (1992). Качество измерений, получаемых при

работе с передатчиками на большем расстоянии, когда существенное значение имеют пространственные волны, оценивалось по результатам фазы IV международных сравнений радиозондов ВМО в Японии (см. WMO, 1996).

13.5.5 Ошибки систем для измерения ветра, использующих Глобальную систему определения местоположения

Теоретически система обнаружения ветра ГСОМ, использующая коды дальности грубого разрешения в дифференциальном режиме, должна обладать возможностью измерения ветра с неопределенностью 0,2 м/с. Оценки точности, приведенные в таблице 13.5, были сделаны на основе недавно проведенных ВМО тестов радиозондов ГСОМ. Основное различие между системами заключается в различной фильтрации, применяемой в отношении ветра для устранения маятникового движения радиозонда. Измерения ветра с помощью ГСОМ должны быть, по крайней мере, столь же надежны в долгосрочном плане, как и самые лучшие измерения с помощью первичных радиолокаторов.

13.6 СРАВНЕНИЯ, КАЛИБРОВКА И ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ

13.6.1 Сравнения

Системы для измерения ветра на высотах, как правило, достаточно сложны, поэтому возможны различного рода отказы. Вполне вероятно, что такая система при частичном отказе может продолжать выдавать данные о вертикальной структуре ветра, которые операторам могут показаться правдоподобными. Многие из этих систем требуют тщательной отладки и технического обслуживания для поддержания точности слежения.

Точность измерений ветра оперативными системами может быть проверена путем сравнения их со статистикой мониторинга наблюдений, выпускающейся центрами численных прогнозов погоды. Статистика мониторинга включает сводки различий между измерениями ветра на высотах по каждому месту и краткосрочными прогнозами полей (фоновых) для того же места. При существующих в настоящее время методах усвоения и анализа данных ошибка в наблюдениях оказывает некоторое влияние на поля метеорологического анализа. Таким образом, было продемонстрировано, что ошибки наблюдений наиболее надежно обнаруживаются посредством использования краткосрочного прогноза по результатам анализа, подготовленного за 6 часов до времени наблюдения.

Эксплуатационные характеристики систем измерения ветра на высотах могут также сравниваться с характеристиками других систем, качество измерений которых известно, с помощью специальных тестов. Эти тесты могут дать возможность отследить ошибки, которые должны быть оценены независимо от ошибок оценки высоты.

Оба вида сравнений могут быть интерпретированы с помощью статистических методов, предложенных в публикации ВМО (WMO, 1989).

13.6.1.1 Оперативный мониторинг посредством сравнения с прогностическими полями

Статистические данные ежедневных сравнений результатов оперативных измерений ветра и полей краткосрочных прогнозов, полученных с использованием численных моделей прогнозов погоды, могут предоставляться операторам систем через ведущие центры, назначенные Комиссией ВМО по основным системам.

Интерпретация статистики мониторинга ветра на высотах является непростой задачей. Значения

Таблица 13.5. Ожидаемая случайная ошибка (уровень 2σ) и систематическая ошибка для навигационных систем обнаружения ветра в районах, где охват навигационными сигналами близок к оптимальному

Система	*Время осреднения, с*	*Систематическая ошибка, м/с*	*Случайная ошибка, м/с*
«Омега»	150 – 240	до ±0,1	2,5 – 5
«Лоран-С» (приземная волна)	30 – 60	до ±0,2	0,6 – 3
«Лоран-С» (пространст венная волна)	60 – 120	до ±0,2	1,6 – 4
ГСОМ	5	up to ±0,1	0,2 – 0,6

случайных ошибок в прогностических полях имеют такой же порядок или даже больше ошибок, полученных при использовании систем для измерения ветра на высотах, если они функционируют нормально. Ошибки прогнозов изменяются в зависимости от географического положения, и поэтому могут понадобиться указания центра численных прогнозов погоды по их интерпретации. Однако относительно легко определить те системы измерения ветра на высотах, для которых случайные ошибки значительно превышают обычные значения. В последние годы около 6 % систем измерения ветра на высотах глобальной сети были определены как дефектные. В основном системы с дефектами функционирования были представлены радиотеодолитами и системами вторичных радиолокаторов.

Сводки систематических отклонений результатов наблюдений от прогностических полей за несколько месяцев или за весь год также полезны для выявления систематических ошибок определения скорости и направления ветра с помощью данной системы. Довольно распространенным дефектом является небольшое рассогласование следящих антенн радиотеодолитов или радиолокаторов.

13.6.1.2 Сравнение с другими системами измерения ветра

Специальные сравнительные тесты систем измерения ветра на высотах позволили получить большое количество информации о фактических эксплуатационных качествах различных систем для измерения ветра на высотах, используемых по всему земному шару. В этих тестах ряд мишеней подвешивали к одному шару и отслеживали одновременно рядом наземных систем. Время получения сообщений о ветре с различных наземных станций синхронизировалось с точностью менее 1 с. Затем результаты измерения ветра могли сравниваться как функция времени полета мишени, а определенные для ветра высоты также могли сравниваться независимо. Интерпретация результатов сравнений становится более надежной, если, по крайней мере, одна из систем измерения ветра на высотах обеспечивает измерение ветра с высокой точностью и с известными характеристиками ошибок.

Всеобъемлющие серии сравнительных тестов были проведены в период 1984 – 1993 гг. как часть международных сравнений радиозондов ВМО. Фазы I и II этих тестов были проведены в Соединенном Королевстве и Соединенных Штатах соответственно (WMO, 1987). Фаза III была проведена Российской Федерацией в Казахстане (WMO, 1991), а фаза IV прошла в Японии (WMO, 1996).

Информация, приведенная в таблицах 13.4 и 13.5, основана, прежде всего, на результатах международных сравнений радиозондов ВМО и дополнительных тестах, выполнявшихся в соответствии с теми же стандартами, что и тесты ВМО.

Предполагается, что когда разработка систем обнаружения ветра с помощью ГСОМ будет завершена, эти системы можно будет использовать в качестве надежных транспортируемых эталонов для сравнительных тестов оборудования для измерений ветра на высотах в более отдаленных районах земного шара.

13.6.2 Калибровка

Калибровка наклонной дальности для радиолокаторов, в которых используются отраженные радиолокационные сигналы, должна проверяться по отдаленным объектам, местоположение которых точно известно. Подобным же образом следует осуществлять поверку азимута.

Ориентация следящих антенн радиотеодолитов или радиолокаторов должна проверяться регулярно посредством сравнений отсчетов по ним с результатами, полученными с помощью оптического теодолита. Если средняя разность по углу места при наблюдении по теодолиту и радиолокатору составляет больше 0,1°, то необходимо проверить регулировку следящей антенны. Когда при поверке определения азимута используется компас, направление на северный магнитный полюс необходимо точно приводить к направлению на географический север.

При использовании навигационных систем важно проверить, точно ли зарегистрировано в компьютере местоположение наземной системы. Навигационная система слежения должна иметь правильную конфигурацию в соответствии с инструкциями изготовителя и должна стабильно работать еще до запуска радиозонда.

13.6.3 Техническое обслуживание

Радиотеодолиты и радиолокаторы представляют собой относительно сложное оборудование, и обычно для проведения их технического обслуживания требуется опытный техник. Такой техник должен проводить техническое обслуживание как электрической, так и механической части, а также проверить выполнение задач по ремонту. Уровень требуемой квалификации и частота технического обслуживания различаются в зависимости от конструкции системы. В конструкциях некоторых современных радиотеодолитов предусмотрена более высокая по сравнению с предшествующими конструкциями

надежность механической части. Стоимость и возможности в отношении обеспечения технического обслуживания должны рассматриваться в качестве важных факторов при выборе типа системы для измерения ветра на высотах.

В большинстве современных навигационных систем слежения ремонт в связи с отказами в электрической части производится посредством замены дефектных модулей. Такие модули должны включать, например, приемники радиозондов или навигационные системы слежения. Как правило, в наземной навигационной системе отсутствуют движущиеся части, и техническое обслуживание механической части является незначительным, однако системы антенн, кабели и соединения следует регулярно инспектировать на предмет коррозии и других изменений, связанных с атмосферным воздействием. Расходы на техническое обслуживание могут быть минимальными при условии, если вместе с системой закупается достаточное число запасных модулей.

13.7 ПОПРАВКИ

Когда радиоветровые наблюдения производятся с помощью радиолокационной системы, то радиолокационная информация по слежению используется для расчета высоты, к которой привязываются измерения ветра. Эти радиолокационные высоты следует скорректировать на кривизну Земли, используя следующее уравнение:

$$\Delta z_{\text{curvature}} = 0{,}5\,(r_s \times \cos\theta)^2 / (R_c + r_s \sin\theta), \qquad (13.3)$$

где r_s – наклонная дальность до мишени; θ – угол места мишени; R_c – радиус кривизны Земли в месте расположения наземной станции.

Кроме того, направление распространения луча радиолокатора изменяется, поскольку показатель преломления воздуха в среднем уменьшается с высотой, так как температура и количество водяного пара также уменьшаются с высотой. Изменения показателя преломления являются причиной искривления радиолокационного луча в направлении Земли. Таким образом, атмосферная рефракция обычно приводит к тому, что угол места мишени, наблюдаемый радиолокатором, превышает ее истинное геометрическое возвышение.

Типичные значения поправок на рефракцию $\Delta z_{\text{refraction}}$ представлены в таблице 13.6. Они были рассчитаны Хупером (Hooper, 1986). В связи с увеличением в последнее время возможностей по обработке данных на компьютерной наземной станции, алгоритмы для расчета поправок на коэффициент рефракции легче использовать для радиолокаторов, обладающих высокой точностью слежения. Поправки, приведенные в таблице 13.6, были рассчитаны по осредненным за 5 лет климатологическим значениям температуры и содержания водяного пара для различных мест. В те дни, когда ошибки, обусловленные рефракцией, максимальны, требуемая поправка в некоторых местах может превышать приведенные в таблице 13.6 климатологические средние значения. Разница может доходить до 30 %.

Таблица13.6. Примеры поправок на кривизну Земли и рефракцию к значениям высоты, полученным с помощью радиолокатора

Дальность по горизонтали, км	*Высота, км*	$\Delta z_{curvature}$	$\Delta z_{refraction}$ *60 °N 01 °W*	$\Delta z_{refraction}$ *36 °N 14 °E*	$\Delta z_{refraction}$ *1 °S 73 °E*
25	10	49	–9	–10	–12
50	15	196	–31	–34	–39
100	20	783	–106	–117	–133
150	25	1760	–211	–231	–262
200	30	3126	–334	–363	–427

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Acheson, D.T., 1970: *Loran-C Windfinding Capabilities: Wallops Island Experiments*. United States Department of Commerce, Weather Bureau, ESSA Technical Memorandum WBTM EDL 11.

de Boor, C., 1978: *A Practical Guide to Splines*. Springer Verlag, New York.

Edge, P., *M. Kitchen, J.* Harding and J. Stancombe, 1986: *The Reproducibility of RS3 Radiosonde and Cossor WF Mk IV Radar Measurements*. Meteorological Office, Bracknell, OSM 35.

Elms, J.B. and J. Nash, 1996: Personal communication of results from a comparison of pre-production GPS radiosonde wind measurements with Loran-C and radar winds. Camborne, United Kingdom, 15–19 January 1996.

Hooper, A.H., 1986: *The Calculation of Radio-wave Refraction, with Special Reference to Data from Height-finding Radars*. Meteorological Office, Bracknell, OSM 17.

Kaisti, K., 1995: New low-cost GPS solution for upper-air windfinding. *Proceedings of the Ninth Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation*, Charlotte, North Carolina (27–31 March 1995), American Meteorological Society, pp. 16–20.

Karhunen, P., 1983: Automated windfinding developments. Preprints of the Fifth AMS Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation, (Toronto, 11–15 April 1983), pp. 110–115.

Lange, A.A., 1988: *A high-pass filter for optimum calibration of observing systems with applications. In: Simulation and Optimization of Large Systems (A.J. Osiadacz, ed.)*. Clarendon Press, Oxford, pp. 311–327.

Nash, J., 1994: Upper wind observing systems used for meteorological operations. *Annales Geophysicae*, Volume 12, pp. 691–710.

Nash, J. and T. J. Oakley, 1992: Experience in the use of Loran-C windfinding in the United Kingdom. *Proceedings of the Twenty-first Annual Technical Symposium*, Wild Goose Association, Birmingham, England, pp. 81–88.

Passi, R.M., 1978: Overdetermined windfinding systems. *Atmospheric Technology*, Number 10, Winter 1978–1979, pp. 65–75.

Passi, R.M. and C. Morel, 1987: Wind errors using the worldwide Loran network. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Volume 4, pp. 690–700.

Schaefer, J.T. and C.A. Doswell, 1978: The inherent position errors in double-theodolite pibal measurements. *Journal of Applied Meteorology*, Volume 17, pp. 911–915.

Stickland, J.J., 1996: Personal communication of results of trials of GPS radiosondes. Bureau of Meteorology, Australia.

World Meteorological Organization, 1975: *Upper-air Sounding Studies.* Volume II: *Manual Computation of Radiowinds* (R.E. Vockeroth). Technical Note No. 140, WMO-No. 394, Geneva.

World Meteorological Organization, 1985: *Meteorological Observations Using Navaid Methods* (A.A. Lange). Technical Note No. 185, WMO-No. 641, Geneva.

World Meteorological Organization, 1986: *Algorithms for Automatic Aerological Soundings* (A.H. Hooper). Instruments and Observing Methods Report No. 21, WMO/TD-No. 175, Geneva.

World Meteorological Organization, 1987: *WMO International Radiosonde Comparison (U.K. 1984, U.S.A. 1985): Final Report* (J. Nash and F.J. Schmidlin). Instruments and Observing Methods Report No. 30, WMO/TD-No. 195, Geneva.

World Meteorological Organization, 1989: An algorithmic approach for improving and controlling the quality of upper-air data (A.A. Lange). *Papers Presented at the Fourth WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-IV)* (Brussels, 4–8 September 1989). Instruments and Observing Methods Report No. 35, WMO/TD-No. 303, Geneva, pp. 87–92.

World Meteorological Organization, 1991: *WMO International Radiosonde Comparison – Phase III – Dzhambul, USSR, 1989: Final Report* (A. Ivanov, A. Kats, S. Kurnosenko, J. Nash and N. Zaitseva). Instruments and Observing Methods Report No. 40, WMO/TD-No. 451, Geneva.

World Meteorological Organization, 1994: A new GPS rawinsonde system (D.B. Call). *Papers Presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation (TECO-94)* (Geneva, 28 February–2 March 1994), Instruments and Observing Methods Report No. 57, WMO/TD-No. 588, Geneva, pp. 159–163.

World Meteorological Organization, 1995: *Manual on Codes*. WMO-No. 306, Geneva.

World Meteorological Organization, 1996: *WMO International Radiosonde Comparison – Phase IV – Tsukuba, Japan, 1993: Final Report* (S. Yagi, A. Mita and N. Inoue). Instruments and Observing Methods Report No. 59, WMO/TD-No. 742, Geneva.

World Meteorological Organization, 2003*a*: *Manual on the Global Observing System*. Volume I, WMO-No. 544, Geneva.

World Meteorological Organization, 2003b: *Executive Summary of the WMO Intercomparison of GPS Radiosondes* (Alcantâra, Maranhão, Brazil, 20 May–10 June 2001). Instruments and Observing Methods Report No. 76, WMO/TD-No. 1153, Geneva.

ГЛАВА 14

НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ТЕКУЩЕЙ И ПРОШЕДШЕЙ ПОГОДОЙ; СОСТОЯНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ПОЧВЫ

14.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

14.1.1 Определение

В практике наблюдений под термином «погода» подразумевают такие наблюдения за состоянием атмосферы и связанными с ним явлениями, которые первоначально не предназначались для количественных измерений. Эти наблюдения представляют собой качественное описание явлений, наблюдаемых в атмосфере или на поверхности Земли, таких как осадки (гидрометеоры, выпадающие в атмосфере), взвешенные или переносимые ветром частицы (гидрометеоры и литометеоры), другие специализированные оптические явления (фотометеоры), или проявления атмосферного электричества (электрометеоры). Полное описание этих явлений приводится в публикации ВМО (WMO, 1975).

> *Гидрометеором* называется скопление жидких или твердых частиц воды, взвешенных в воздухе или выпадающих в атмосфере, переносимых ветром с поверхности Земли или отлагающихся на предметах, на поверхности почвы или в свободном воздухе.
>
> *Литометеором* называется скопление частиц, большинство из которых твердые и не содержат воды. Эти частицы могут находиться в воздухе во взвешенном состоянии или подниматься ветром с поверхности почвы.
>
> *Фотометеором* называется световое явление, возникающее в результате отражения, преломления, дифракции или интерференции света, исходящего от Солнца или Луны.
>
> *Электрометеором* называется видимое или слышимое проявление атмосферного электричества.

Специальный класс явлений погоды представляют собой локализованные метеорологические явления. Определения таких явлений приведены в публикации ВМО (WMO, 1992). Описание специальных явлений, таких как пыльные вихри и воронкообразные облака, приведено в разделе 14.2.3.

В практике метеорологических наблюдений существуют два вида сообщений о погоде. Текущая погода (погода в срок наблюдения) – это описание метеорологических явлений, отмечавшихся во время срока наблюдения. Прошедшая погода – это описание важных явлений погоды, происходивших в предыдущий час, но не в срок наблюдения.

В настоящей главе описываются также методы наблюдения за непосредственно связанным с погодой состоянием поверхности почвы. Под термином состояние поверхности почвы подразумеваются условия поверхности Земли, сложившиеся в результате недавних климатических или погодных явлений в контексте количества влаги или описания любых слоев твердых, содержащих или не содержащих воду частиц, которые покрывают стандартную поверхность.

14.1.2 Единицы измерений и шкалы

На обслуживаемых персоналом станциях результаты наблюдений, определенных как погода в срок наблюдения, прошедшая погода и состояние поверхности почвы, сообщаются наряду с количественными данными. Такие наблюдения стандартизованы в специальных таблицах, что позволяет наблюдателю выбирать соответствующий термин из большого количества описаний, составленных в соответствии с восприятием наблюдателя и изложенных в публикации ВМО (WMO, 1995).

Начиная с 1990 г. введение автоматизированных метеорологических станций привело к необходимости количественного описания функций, прежде выполнявшихся наблюдателями. Для того чтобы учесть различную степень сложности и эффективности автоматизированных метеорологических станций при наблюдениях за текущей и прошедшей погодой, в публикацию ВМО (WMO, 1995) включены специальные инструкции по кодированию. В силу сложности предоставления данных о текущей и прошедшей погоде, связанной со сложностью систем наблюдений за текущей погодой, подобные данные должны предоставляться в виде значений в формате двоичного кода, поскольку с буквенно-цифровым форматом связано множество ограничений, возникающих в процессе предоставления полных данных.[1]

---

1 В соответствии с рекомендацией 3 (КОС-XII) следует «предоставлять значения данных наблюдений, а не качественные параметры в отношении погоды в срок наблюдения в процессе наблюдений на автоматизированных станциях в форматах FM 94 BUFR и FM 95 CREX»

14.1.3 Метеорологические требования

Погода в срок наблюдения и прошедшая погода, а также состояние поверхности почвы – это, прежде всего, качественное описание метеорологических явлений, которое необходимо, главным образом, в связи с воздействием, которое они оказывают на деятельность человека и безопасность работы на транспорте, а также с учетом их значения для понимания и прогнозирования синоптических процессов. Соответствующим вопросам посвящены несколько глав настоящего Руководства. Количественное измерение осадков описано в главе 6 части I, а наблюдения за облаками – в главе 15 части I. Часть II посвящена специфическим вопросам, касающимся авиационных и морских наблюдений, автоматизированных систем, радиолокаторов и атмосфериков.

В данной главе наблюдения за погодой, представляющие интерес для определения погоды в срок наблюдения и прошедшей погоды, разделены на три категории, а именно: наблюдения за осадками (выпадающие гидрометеоры), наблюдения за мутностью атмосферы и аэрозолем (литометеоры и взвешенные или переносимые ветром гидрометеоры) и наблюдения за другими погодными явлениями (например, воронкообразные облака, шквалы и молнии). Жидкие осадки или туман, при котором на поверхностях образуется изморозь, включены в соответствующую категорию осадков и взвешенных гидрометеоров.

Другие явления, имеющие оптическую природу (фотометеоры), или электрометеоры, в отличие от молний, являются показателями определенного состояния атмосферы и могут включаться в текущие записи последовательности наблюдаемых метеорологических явлений, которые ведутся на каждой станции. Однако они не имеют большого значения при определении погоды в срок наблюдения и прошедшей погоды, когда производится кодирование результатов стандартных метеорологических наблюдений, и включены в эту главу лишь для полноты изложения.

14.1.4 Методы наблюдений

Единственную возможность получения информации обо всем многообразии характеристик погоды в настоящее время обеспечивают визуальные и слуховые наблюдения квалифицированного наблюдателя. Однако, учитывая высокую стоимость содержания большого штата подготовленных наблюдателей, ряд метеорологических служб расширяют использование автоматизированных наблюдательных систем на первичных сетях наблюдений, а также продолжают их использовать в дополнение к сетям станций, обслуживаемых персоналом для проведения автоматизированных наблюдений в удаленных районах.

Фундаментальные исследования (Беспалов и др., 1983) подтвердили возможность определения погодных явлений посредством логического анализа группы переменных. В настоящее время не имеется ни одного датчика, который позволил бы классифицировать все типы погодных явлений в срок наблюдения; вместо этого используются полученные с помощью разнообразных датчиков данные (например, о видимости, температуре, точке росы, скорости ветра, выпадении дождя или снега). Автоматизированные наблюдательные системы позволяют выполнять этот логический анализ, но их способность наблюдать определенное погодное явление различается в зависимости от приборного оснащения системы и степени сложности алгоритмов. Не располагая возможностью наблюдать все типы погодных явлений, автоматизированные системы наблюдают наиболее важные из них, что делает такие системы экономически эффективной альтернативой хорошо подготовленному наблюдателю.

14.2 НАБЛЮДЕНИЕ ЗА ТЕКУЩЕЙ И ПРОШЕДШЕЙ ПОГОДОЙ

Наблюдения, которые должны регистрироваться под названием «погода в срок наблюдения» и «прошедшая погода», включают следующие явления: осадки (дождь, морось, снег, ледяная крупа, снежные зерна, ледяная пыль и град), мутность атмосферы и аэрозоль (мгла, пыль, дымка, туман, поземок и низовая метель, пыльная и песчаная буря, пылевой смерч), воронкообразные облака, шквалы и молнии.

При наблюдениях за текущей погодой требуется фиксировать различные явления, происходящие на станции или в поле зрения станции в срок наблюдения. В синоптических сводках должны сообщаться условия погоды в течение прошедшего часа путем выбора соответствующей кодовой цифры в случае если в срок наблюдения осадки отсутствуют.

14.2.1 Осадки

14.2.1.1 Объекты наблюдения

По *характеру выпадения осадки* можно разделить на три типа: ливневые, моросящие и обложные осадки. Ливневыми являются такие осадки, которые связаны с отдельными конвективными облаками.

Наблюдатели (или приборы, заменяющие человека) должны также классифицировать осадки по трем категориям интенсивности – слабые, умеренные и сильные – в соответствии с интенсивностью их выпадения или другими связанными с осадками факторами (например, видимостью).

Вид осадков (дождь, морось, снег, град) является третьей по важности наблюдаемой характеристикой осадков. При наблюдениях за дождем или моросью при низкой температуре следует различать, замерзают осадки или нет. По определению ледяной дождь или морось – это осадки, при контакте которых с твердыми объектами образуется гололед. Твердые осадки могут существовать в форме ледяных игл, снежных зерен, отдельных звездообразных снежных кристаллов, ледяной крупы и града; полное их описание дается в публикации ВМО (WMO, 1975).

Применяемая шкала интенсивности осадков зависит от характера выпадения (моросящие, обложные, ливневые) и вида (дождь, морось, снег, град) осадков. Несколько совместных совещаний групп экспертов Комиссии по приборам и методам наблюдений и Комиссии по основным системам разработали таблицы с целью определения более универсального соотношения между качественной интерпретацией и субъективным толкованием наблюдателя и измеренными значениями, полученными с помощью систем наблюдения за текущей погодой. Примеры подобных таблиц и других соотношений приведены в Приложении.

14.2.1.2 Приборы и измерительные устройства: виды осадков

Одна из основных задач инструментального измерения состоит в определении вида осадков. Системы, которые в настоящее время исследуются и испытываются в целях оперативного использования, или уже используются, как правило, предусматривают применение оптических методов, либо радиолокатора (Van der Meulen, 2003). Полевые испытания (WMO, 1998) показали, что все эти системы позволяют обнаружить основные типы и виды осадков (за исключением очень слабого снега или мороси) более чем в 90 % случаев. Вероятность обнаружения очень слабых осадков обычно гораздо ниже.[2] Для определения различия между несколькими видами осадков необходимы сложные алгоритмы. Например, мокрый или тающий снег трудно отличить от дождя. Ниже перечислены датчики определения типа и вида осадков.

2 Порог для определения дождя составляет 0,02 мм/ч (см. часть I, глава 6, приложение 1.Д)

Датчик прямого/обратного рассеяния для наблюдения за текущей погодой

Для предоставления информации о текущей погоде, в частности, вида осадков, используются разнообразные датчики рассеяния. Как правило, рассеяние светового потока от источника света частицами осадков наблюдается под фиксированным углом, что дает информацию о размере частиц. Дополнительные измерения (например, содержание влаги в частицах, скорость падения, температура) помогают определить природу частиц. Например, крупные частицы с малым содержанием влаги будут классифицироваться как снег. Некоторые датчики могут давать информацию о невозможности достоверного определения вида осадков в случае, если интенсивность их слишком слабая. Кроме определения вида осадков с помощью этих датчиков можно (в зависимости от типа датчика) также получать данные об интенсивности и продолжительности осадков (выявляя таким образом моросящие осадки), а также о видимости.

Такие датчики широко используются и, как правило, дают приемлемые результаты в отношении обычных видов осадков (дождь, снег) с вероятностью обнаружения 70–90 % (WMO, 1998) в зависимости от типа выпадающих осадков и какие конкретно используются приборы. Другие виды осадков не так хорошо поддаются наблюдениям, в частности, смешанные осадки (дождь + снег). Град не наблюдается. Пороги для слабых осадков могут варьироваться.

Оптический измеритель дождевых капель (дисдрометр)

Оптические измерители дождевых капель также используются для определения вида осадков. В этих приборах используется ослабление горизонтальной плоской широкой полосы направленного (инфракрасного) света для определения гидрометеоров. При прохождении частиц через широкую полосу направленного света интенсивность получаемого приемником излучения уменьшается. Степень этого уменьшения коррелирует с размером частиц, а продолжительность коррелирует со скоростью падения частиц. Учитывая измеренные значения этих величин, автоматически определяется тип частиц.

Эти датчики, как правило, дают приемлемые результаты для обычных видов осадков. Вероятность обнаружения (идентификации) видов осадков датчиками рассеяния близка к вероятности их определения наблюдателем. (Bloemink, 2005). Смешанные осадки и град также трудно поддаются определению. Этот тип датчика является относительно новым на рынке.

Допплеровский радиолокатор

Специальные допплеровские радиолокаторы также могут использоваться для определения типов осадков. Излучаемый радиолокатором луч (в вертикальном направлении) рассеивается падающими гидрометеорами. Скорость падения частиц может быть определена на основе допплеровского смещения сигнала обратного рассеяния. Около поверхности Земли эти конечные скорости падения частиц коррелируют с размером частиц. Некоторые приборы определения типов осадков измеряют значения непосредственно над датчиком, другие определяют скорости падения на различных высотах над датчиком. Также выполняются дополнительные измерения (например, температуры подстилающей поверхности).

Имеются различные типы допплеровских радиолокаторов для определения типов осадков. Они часто нечувствительны к частицам малых размеров, также как технологии определения, основанные на использовании радиолокаторов. Некоторые типы показывают результаты, сравнимые с результатами, полученными при использовании датчиков прямого/обратного рассеяния и измерителей дождевых капель, т.е. хорошие результаты для дождя и для снега, но не для смешанных осадков. Град не наблюдается.

Детектор динамического воздействия

Этот тип датчика основан на использовании пьезоэлектрического материала, который имеет свойство реагировать на механическое воздействие индивидуальных гидрометеоров. По характеру воздействию град и дождь достаточно различаются, что позволяет определить эти два типа осадков. О других типах осадков информация не предоставляется.

В связи с тем, что информация может предоставляться только о дожде и граде, этот датчик не находит широкого применения для определения текущей погоды, однако, в части определения града он может быть полезен для некоторых пользователей, поскольку определение града, как правило, является слабым местом других датчиков определения текущей погоды.

Акустический детектор

Акустический детектор реагирует на звуковые колебания, возникающие в результате падения осадков на какую-либо поверхность, что позволяет определить тип осадков. Датчик был разработан в качестве дополнения к датчикам прямого/обратного рассеяния для определения текущей погоды, в частности для улучшения определения града и ледяной крупы. Первые результаты в отношении данного датчика обнадеживают (Wade, 2003).

Другие методы

Для мониторинга типа осадков могут также использоваться видеокамеры. Наблюдатель/оператор может осуществлять мониторинг данных нескольких видеокамер с центрального пульта. Для того, чтобы осуществлять наблюдения за осадками, следует выбрать сотрудника с соответствующими базовыми знаниями. Поскольку данный тип измерений требует присутствия наблюдателя/оператора, он не является полностью автоматическим средством определения текущей/прошедшей погоды.

В настоящее время находит применение датчик, в котором имеется колеблющийся чувствительный элемент, специально разработанный для распознавания ледяного дождя или гололеда (Starr and Cauwenberghe, 1991). Он позволяет измерить количество льда, накопившегося на нем. Чувствительный элемент колеблется с частотой, пропорциональной его массе. Когда лед намерзает на этом элементе, масса последнего изменяется и частота колебаний уменьшается. В датчик встроен обогреватель для очистки элемента ото льда, когда это необходимо. Этот датчик также оказался эффективным для определения мокрого снега.

Детекторы льда могут использоваться для определения замерзающих осадков. Существуют различные методы. Например, может быть измерена масса льда на рейке. При другом методе используется зонд, который подвергается вибрации на ультразвуковой частоте, которая изменяется с образованием льда на нем. Недавно был проведен широкий ряд тестовых измерений (Fikke, 2007). Данные, поступающие с датчиков текущей погоды, корректируются с помощью данных, полученных от детекторов льда, особенно о ледяном дожде (Sheppard, 2000). Данная технология используется в автоматических метеорологических системах наблюдений (AMCH).

14.2.1.3 Приборы и измерительные устройства: интенсивность и характер осадков

Предоставление информации о текущей погоде включает данные об интенсивности осадков и, соответственно, о характере выпадения осадков (ливни, ливневые, моросящие и обложные осадки). Во многих случаях интенсивность также может быть измерена при помощи датчика, который определяет вид осадков, но с этой целью также можно использовать и другой датчик. Измерение интенсивности также позволяет определить прерывистые осадки (например, ливневый снег). Недавно было

завершено крупномасштабное сравнение дождемеров с точки зрения определения интенсивности осадков (WMO, 2006 и WMO, 2009), включая различные типы приборов и методы наблюдений. Методы автоматического измерения для предоставления информации об интенсивности осадков перечислены ниже.

Датчик прямого/обратного рассеяния для наблюдения за текущей погодой

Данный датчик описан в предыдущем разделе (14.2.1.2). Интенсивность осадков рассчитывается при помощи комбинирования данных о распределении размеров частиц, количестве частиц и форме осадков. Интенсивность осадков, определенная таким образом, обычно является менее точной, чем интенсивность, определенная с использованием традиционных методов (например, весовые дождемеры, дождемеры с опрокидывающимся приемником и т. д.). Калибровка интенсивности осадков также является проблемой. Для предоставления приближенных данных об интенсивности осадков (слабые, сильные, и т. д.) этот метод пригоден. Производители работают над улучшением результатов в отношении интенсивности осадков.

Оптический измеритель дождевых капель

Данный датчик также описан в предыдущем разделе (14.2.1.2). Интенсивность осадков рассчитывается при помощи комбинирования данных о распределении размеров частиц, количестве частиц и виде осадков. Поскольку данный метод определения интенсивности осадков аналогичен методу определения интенсивности с использованием датчика прямого/обратного рассеяния для наблюдения за текущей погодой, то и результаты анализа также аналогичны. Для улучшения результатов определения интенсивности осадков также проводится работа (см., например, Lanzinger, 2006).

Допплеровский радиолокатор

Данный датчик описан в предыдущем разделе (14.2.1.2). Интенсивность осадков рассчитывается при помощи комбинирования сведений о распределении размеров частиц, количестве частиц и виде осадков. Полученные в результате данные об интенсивности осадков хорошо коррелируют (≈ 0,9) с традиционными дождемерами, если рассматривать 30-минутные интервалы (см. Peters, 2002).

Дождемеры

Существует множество различных типов «традиционных» дождемеров. Они основаны на нескольких различных методах измерений, которые изложены в части I, главы 6: Измерение осадков. Они, как правило, разработаны для того, чтобы измерять количество осадков, хотя некоторые (меньшие по размеру) приборы разработаны специально для того, чтобы давать также и данные (информацию) об интенсивности осадков. Данные, полученные с помощью дождемеров, разработанных для измерения количества осадков, менее точны в определении интенсивности осадков. Однако, информация об интенсивности осадков, которая требуется для предоставления данных о текущей погоде, как правило, является удовлетворительной. Многие производители совершенствуют данные приборы также в отношении определения интенсивности осадков (WMO, 2009 и WMO, 2006).

14.2.1.4 Приборы и измерительные устройства: подход, предполагающий использование многих датчиков

Для определения характеристик текущей погоды и осадков в системах наблюдений используется набор датчиков в комбинации с алгоритмами. Подход, предполагающий использование многих датчиков, создает ограничение на используемые методы. Стандартные наблюдения также используются для измерения осадков, видимости, температуры воздуха, точки росы и нижней границы облаков. Алгоритмы характеризуются фильтрацией (например, в случае, если температура воздуха выше 6 °C, то только жидкие осадки). Комбинирование ряда датчиков для определения текущей погоды также используется в системах метеорологического обеспечения дорог (см. также 14.3: Состояние поверхности почвы).

4.2.2 Мутность атмосферы и аэрозоль

14.2.2.1 Объекты наблюдения

В сводках, сообщающих об атмосферных условиях в течение прошедшего часа, должно приводиться различие между мглой, дымкой или жидко-капельным туманом. При мгле воздух является относительно сухим, тогда как при дымке или жидко-капельном тумане влажность обычно велика, что проявляется в выпадении капелек воды или изморози на траве, листьях и пр. Если станция оборудована измерительными приборами, то с достаточной надежностью можно предположить, что причиной мутности атмосферы является мгла при относительной влажности не более определенного значения (например, 80 %), а видимость находится в определенных пределах (например, горизонтальная – меньше 1 км и вертикальная – меньше 2 км). О дымке сообщается при высоких значениях влажности и при видимости 1 км и более. В синоптических сводках

сообщается о тумане, под которым может подразумеваться жидко-капельный или кристаллический туман, когда горизонтальная видимость у поверхности Земли уменьшается до значений менее 1 км.

Отложение изморози происходит в результате превращения в лед водяных капелек, присутствующих в тумане, при контакте с твердыми предметами, находящимися при температуре ниже точки замерзания. При кодировании погоды в срок наблюдения и прошедшей погоды не приводится различие между типами изморози. Всякий раз, когда в закодированных сводках погоды в срок наблюдения и прошедшей погоды фигурирует термин «туман», его следует понимать именно в этом смысле. Однако в климатологических обобщениях все случаи уменьшения видимости до значений менее 1 км рассматриваются как туман.

Поземок или низовая метель – это снег, поднятый ветром в воздух после того, как он уже выпал на землю. В кодах для погоды в срок наблюдения приводится различие между поземком и низовой метелью, причем первый относится к снегу, поднятому ветром до уровня, не превышающего уровень глаз наблюдателя.

К другим метеорологическим явлениям, которые следует определять, относятся простирающаяся над обширным районом взвешенная в воздухе пыль; пыль или песок, поднятые ветром; пыльная или песчаная буря, вызванная турбулентными вихрями, поднимающими большое количество пыли или песка в воздух, которые значительно уменьшают видимость; пыльные или песчаные вихри и изредка воронкообразные облака.

Всем наблюдателям в качестве дополнительного средства следует использовать публикацию ВМО (WMO, 1975).

14.2.2.2 Приборы и измерительные устройства для определения характеристик мутности атмосферы и аэрозоля

Возможным подходом к определению характеристик мутности атмосферы и аэрозоля является комплексная обработка значений измеренных величин, которые могут использоваться в качестве предикторов. Такой подход требует исследований значений метеорологических величин при формировании, развитии и окончании данного явления, а также определения граничных условий. Проблема идентификации тумана, дымки, мглы, метели и пыльной бури обсуждалась в ряде публикаций Госкомгидромета (1984) и WMO (1985). Метеорологическая дальность видимости представляет собой наиболее важный элемент индикации. Из остальных параметров важными критериями идентификации являются скорость ветра, влажность воздуха, температура и точка росы.

Приборы для измерения видимости могут быть использованы для определения диапазона метеорологической дальности видимости, как это изложено в главе 9: Измерение видимости, в частности, раздел 3. Однако следует отметить, что для определения тумана, дымки и мглы предел измерения этих приборов может быть ограничен до нескольких километров. Три типа приборов измерения видимости, используемых для определения тумана, дымки и мглы, описаны ниже.

Трансмиссиометр

Трансмиссиометры измеряют ослабление луча света из источника на известном расстоянии. Обычно свет импульсной лампы определяется на расстоянии от 10 до 200 м. Видимость рассчитывается по ослаблению света. Для того, чтобы увеличить дальность действия можно использовать два детектора на разных расстояниях (так называемый трансмиссиометр с двойной базовой линией). Трансмиссиометры хорошо подходят для измерения видимости и широко используются, в частности, в аэропортах. Точность их измерения уменьшается с увеличением значений видимости (более детально изложено в главе 9 части I). Их установка, а также эксплуатация являются относительно дорогими, поскольку они требуют регулярного обслуживания.

Датчик прямого рассеяния

Датчик описан в разделе 14.2.1.2. Вне зависимости от формы осадков видимость может быть измерена с использованием этого прибора. Степень рассеяния зависит от оптической экстинкции (ослабления), которая определяется эмпирическим путем в процессе калибровки при помощи сравнения результатов с результатами, полученными с помощью трасмиссиометра. Датчики прямого рассеяния также хорошо подходят для измерения видимости и используются все шире. Их недостатком является то, что их калибровка не является тривиальной и требует внимания. Установка, а также эксплуатация прибора являются относительно недорогими, поскольку они не требуют такого частого обслуживания, как трансмиссиометры.

Лидар

Относительно небольшие системы лидаров могут также использоваться для определения видимости, используемой для идентификации тумана. Диодный лазер испускает пульсирующие пучки света, при этом измеряется свет, отраженный обратно

частицами тумана/мглы (если они присутствуют). Видимость определяется исходя из интенсивности отраженного света и времени его отражения. Дальность видимости, которую можно измерить при помощи лидара, ограничена, но при определении тумана, мглы и т.д. большая дальность видимости не требуется.

14.2.3 Другие погодные явления

14.2.3.1 Объекты наблюдения

Распознавание воронкообразных облаков и наблюдение за ними является чрезвычайно важным для защиты жизни людей и имущества.

Воронкообразные облака (торнадо или водяные смерчи): Явление обычно представляет собой очень сильные вихри, проявляющиеся в виде облачного столба или перевернутого облачного конуса (воронкообразное облако), выступающего из нижней части кучево-дождевого облака. Это облако может простираться вплоть до поверхности Земли, не обязательно достигая ее, в этом случае с поверхности поднимаются вода, пыль, песок или мусор, которые образуют «бороду» вокруг горла воронки. Диаметр может изменяться от нескольких метров до нескольких сот метров. Воронкообразное облако считается сформировавшимся если очень сильно вращающийся столб воздуха касается поверхности суши или воды. Полностью сформировавшимся воронкообразным облаком считается торнадо над поверхностью суши и водяной смерч над поверхностью воды. Наиболее сильные торнадо могут иметь соответствующую скорость ветра до 150 м/с.

Пыльные/песчаные вихри (пылевые смерчи): Быстро вращающийся столб воздуха обычно над поверхностью сухой и пыльной или песчаной суши, который переносит пыль и другие легковесные частицы, поднятые с поверхности. Диаметр пыльных и песчаных вихрей составляет всего несколько метров. Обычно по высоте они не достигают более 60 – 90 метров (пылевой смерч). Полностью сформировавшиеся пыльные/песчаные вихри в очень жарких пустынных регионах могут достигать 600 м.

Шквал: Неожиданное резкое усиление ветра, продолжающиеся в течение нескольких минут, а затем его затухание. Шквалы часто связаны с прохождением холодных фронтов. В таких случаях они возникают один за другим и обычно сопровождаются резким понижением температуры, сменой направления ветра, повышением относительной влажности и образованием облака шквалового ворота с горизонтальной осью (фронтальный шквал).

Определение грозы (см. ВМО, 1992) является примером отхода от описания исключительно на основе восприятия человека-наблюдателя. Явление следует считать грозой, когда слышен гром (даже если не наблюдается молния).

14.2.3.2 Приборы и измерительные устройства

Воронкообразные облака, или торнадо можно часто обнаружить с помощью метеорологического радиолокатора (см. главу 9 части II). Современные доплеровские метеорологические радиолокаторы являются весьма эффективным средством обнаружения мезомасштабных циклонов, предоставляя более детальную информацию об этом опасном метеорологическом явлении с большей заблаговременностью, чем позволяют визуальные наблюдения.

Шквалы могут быть обнаружены на основе последовательных дискретных измерений скорости ветра. Если сигналы устройства, измеряющего скорость ветра, рассматривать совместно с сигналами датчиков направления ветра, температуры и влажности, то, представляется возможным определить фронтальный шквал.

Грозы обнаруживаются главным образом с помощью использования счетчиков молний. Инструкции для наблюдателей, выпускаемые различными службами, предписывают подсчитывать число вспышек молнии за определенный интервал времени, что в сочетании с данными о количестве осадков или скорости ветра позволяет определить слабые, умеренные или сильные грозы (см. главу 7 части II).

14.2.4 Состояние неба

14.2.4.1 Объекты наблюдения

Основные данные о состоянии неба используются для описания изменения состояния неба за определенный период времени. При этом должны учитываться изменения общего количества облаков,

14.2.4.2 Приборы и измерительные устройства

Характеристики количества облаков (общий облачный покров в октантах (баллах), высота нижней границы облаков и общий облачный покров на разных ярусах) могут быть определены на основе колебания высоты нижней границы облаков, измеренной с помощью оптической измерительной системы с применением статистических методов. Очевидно, что этот метод ограничен облачными слоями, находящимися в пределах вертикального диапазона системы измерения высоты нижней

границы облаков (Персин, 1987; US NOAA, 1988, ICEAWS 1999).

14.3 НАБЛЮДЕНИЕ ЗА СОСТОЯНИЕМ ПОВЕРХНОСТИ ПОЧВЫ

14.3.1 Объекты наблюдения

Состояние поверхности почвы относится к условиям, в которых находилась поверхность после недавних метеорологических явлений с точки зрения количества влаги или твердых, содержащих или не содержащих воду частиц, покрывающих естественную поверхность. Наблюдения за состоянием поверхности почвы (буквенные обозначения E и E') должны проводиться в соответствии с требованиями, содержащимися в Кодовых таблицах 0901 и 0975 ВМО (WMO, 1995), которые не требуют разъяснений.

Предоставление информации о состоянии поверхности почвы также является частью сводок о текущей погоде и до недавнего времени обеспечивалось только наблюдателями. Автоматические измерения состояния поверхности почвы все еще являются относительно новыми и используются не очень широко.

14.3.2 Приборы и измерительные устройства

Исследования показали, что имеется возможность различать основные состояния почвы (сухая, влажная, увлажненная, покрытая снегом, изморозью или льдом), используя явления отражения и рассеяния (Gaumet, Salomon and Paillisse, 1991). Используемые методы кратко описаны ниже.

Датчик рассеяния. Эти датчики имеют оптическую конструкцию, при которой используются отражательные и рассеивающие свойства поверхности. Могут использоваться различные источники света. Например, поток белого света, отраженный от соответствующей керамической поверхности, будет зависеть от состояния этой поверхности. Другие (дорожные) датчики анализируют отражение инфракрасного излучения от поверхности дороги. В данном случае длина волны отраженного света зависит от состояния поверхности. Не все эти датчики подходят для метеорологических целей, поскольку они могут быть разработаны для поверхностей, отличающихся от естественных. Датчики в настоящее время совершенствуются.

Емкостной датчик. В настоящее время разрабатывается и тестируется новый емкостной датчик. Опорная плита с соединительными печатными проводниками располагается на (естественной) поверхности. По существу это конденсатор с использованием поверхности Земли в качестве диэлектрика. Диэлектрическая постоянная для сухой и влажной почвы отличаются значительно. Емкость таким образом зависит от влажности поверхности, а состояние поверхности почвы может быть определено при помощи измерения абсолютных величин и фазы испускаемых сигналов на двух частотах. Первые результаты тестов выглядят обнадеживающими, но этот датчик все еще находится в стадии разработки.

Комбинация датчиков. Комбинация датчиков может использоваться для определения состояния поверхности, особенно для поверхностей дорог. Например, с помощью оптического обнаружения можно определять вид покрытия поверхности, с помощью изменения электропроводности можно определять наличие химических веществ, температуру поверхности и температуру грунта и т.д. Все эти измерения в комбинации с атмосферными данными могут использоваться для определения дорожных условий. Однако, состояние поверхности почвы определяется как состояние естественной поверхности, и таким образом, данный метод определяет не точное состояние поверхности почвы, а определенные свойства.

Видеокамеры (*+наблюдатель*). Видеокамеры также используются для определения состояния поверхности почвы. Они могут быть установлены на различных поверхностях и наблюдатель/оператор определяет состояние поверхности почвы. Поскольку данный метод по сути не является автоматическим, он в данном Руководстве не анализируется.

14.4 НАБЛЮДЕНИЕ ЗА ОСОБЫМИ ЯВЛЕНИЯМИ

14.4.1 Электрические явления (электрометеоры)

Электрометеоры либо соответствуют прерывистым электрическим разрядам (молния, гром), либо представляют собой более или менее непрерывные явления (коронный разряд, полярное сияние). Полное описание электрометеоров содержится в публикации ВМО (WMO, 1975).

Специальные сводки о молниях должны включать информацию относительно типа, интенсивности, частоты вспышек, диапазона по азимуту, в котором наблюдаются разряды; следует отмечать промежутки времени между молнией и соответствующим ей громом. Необходимо быть внимательным, чтобы

не принять отражение вспышки молнии облаками и туманом за настоящую вспышку молнии. Во многих странах в оперативной работе используются автоматические системы обнаружения и определения координат молнии. Более подробная информация по этой теме содержится в главе 7 части II «Определение координат источников атмосфериков».

Необычное полярное сияние следует описывать подробно. По возможности следует применять светофильтры как средство увеличения чувствительности приборов при наблюдениях, а для повышения точности угловых измерений можно использовать теодолиты и клинометры (алидады).

14.4.2 Оптические явления (фотометеоры)

Фотометеор – это световое явление, возникающее в результате отражения, рефракции, дифракции или интерференции света, исходящего от Солнца или Луны. Фотометеоры можно наблюдать в условиях более или менее прозрачной атмосферы (мираж, мерцание, сцинтилляция, зеленый луч, оттенки сумерек) на облаках или внутри них (гало, солнечная корона, иризация, глория) и на определенных гидрометеорах или литометеорах, а также внутри них (глория, радуга, белая радуга, кольца Бишопа, сумеречные лучи).

Наблюдатели должны внимательно фиксировать любые оптические явления. По возможности письменное описание следует сопровождать рисунками и фотографиями. Полное описание этих явлений приводится в публикации ВМО (WMO, 1975). В ряде руководств для наблюдателей дается краткая инструкция по наблюдениям за наиболее часто встречающимися явлениями, например, в United Kingdom Meteorological Office (1982).

Для точных измерений наиболее подходящим прибором является теодолит. Однако, когда нет нужного прибора, можно использовать градуированный стержень, который следует держать на расстоянии вытянутой руки. Положение такого явления, как паргелий (ложное Солнце), можно установить по отношению к неподвижно закрепленным вехам. Диаметр короны определяют, принимая угловой диаметр Солнца или Луны приблизительно за полградуса.

ПРИЛОЖЕНИЕ

КРИТЕРИИ ДЛЯ ИНТЕНСИВНОСТИ СЛАБЫХ, УМЕРЕННЫХ И СИЛЬНЫХ ОСАДКОВ[1]

(Слабые, умеренные и сильные осадки определяются с учетом формы и интенсивности осадков, i)[2]

Переменная	*Диапазон*	*Интенсивность*
Морось	i < 0,1 мм/ч	слабая
	0,1 ≤ i < 0,5 мм/ч	умеренная
	i ≥ 0,5 мм/ч	сильная
Дождь (включая ливни)	i < 2,5 мм/ч	слабая
	2,5 ≤ i < 10,0 мм/ч	умеренная
	10,0 ≤ i < 50,0 мм/ч	сильная
	≥ 50,0 мм/ч	очень сильная[3]
Снег (включая ливневый)	i < 1,0 мм/ч (водный эквивалент)	слабая
	1,0 ≤ i < 5,0 мм/ч[1] (водный эквивалент)	умеренная
	i ≥ 5,0 мм/ч (водный эквивалент)	сильная

Смешанные осадки в виде дождя со снегом

То же, что и для снега (поскольку отношение дождь/снег не поддается никакому измерению, следует просто сделать выбор).

Град: То же, что и для дождя.
Ледяная крупа: То же, что и для снега.
Замерзающие явления: То же, что и для незамерзающих явлений.

Руководство для определения интенсивности снега

Слабая: Снежные хлопья небольшого размера и разреженные; видимость, при отсутствии других ухудшающих ее явлений, обычно уменьшается, но составляет не менее 1000 м.

Умеренная: Большее количество более крупных хлопьев, обычно видимость ухудшается до значений 400 – 1000 м.

Сильная: Многочисленные хлопья всех размеров при которых значения видимости, как правило, не превышают 400 м.

Ливни или моросящие осадки с перерывами

Автоматизированные системы должны предоставлять информацию о ливнях или моросящих осадках. Осадки с перерывами могут быть определены в том случае, если осадки отсутствуют в течение 10 минут между двумя последовательными явлениями с осадками, т.е. если имеет место 10-минутный период отсутствия осадков при расчете 10-минутного скользящего среднего за последний час, следует сообщать об осадках с перерывами.

Репрезентативность явлений текущей погоды

Явление текущей погоды хорошо определяется за 3-минутный период наблюдений. В текущей погоде следует сообщать наибольшее значение скользящего 3-минутного среднего за 10-минутный период.

1 Рекомендовано совещанием группы экспертов ВМО по автоматизации визуальных и субъективных наблюдений (Траппе/Париж;, Франция, 14 – 16 мая 1997 г.) и рабочей группы по приземным измерениям (Женева, Швейцария, 27 – 31 августа 2001 г.).

2 Значения интенсивности основаны на измерениях с периодичностью 3 мин.

3 Термин «очень сильная» не соответствует другим категориям и вносит путаницу, поскольку он относится к скорости выпадения осадков. Возможно, лучше подойдет термин «интенсивные осадки» или «экстремальные осадки».

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Беспалов Д.П. и др., 1983: Основные вопросы разработки сетевой автоматической гидрометеорологической станции. Труды ГГО, вып. 473, Ленинград, Гидрометеоиздат, с. 3 – 12.

Всемирная Метеорологическая Организация, 1992: Международный метеорологический словарь, ВМО-№ 182, Женева.

Всемирная Метеорологическая Организация, 1995: Наставление по кодам. Том 1.1 и 1.2, ВМО-№ 306, Женева.

Госкомгидромет, 1984: Определение атмосферных явлений по данным автоматических станций. Совещание группы экспертов СМ5/М5 социалистических стран по теме 9.1 КК ОМЗ/МЗ, Обнинск, 24 – 28 августа 1984 г., Москва.

Персин С.М., 1987: Измерение высоты нижней границы облаков и характеристика облачности как задача распознавания образов. Труды ГГО, вып. 512, Ленинград, Гидрометеоиздат, с. 49 – 91.

Bloemink, H.I. and E. Lanzinger, 2005: Precipitation type from the Thies disdrometer. Paper presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2005) (Bucharest, Romania), Instruments and Observing Methods Report No. 82, WMO-TD No. 1265, Geneva.

Fikke, S. and others, 2007: COST727: Atmospheric Icing on Structures, Measurements and data collection on icing: State of the Art, Publication of MeteoSwiss, No. 75, 110 pp., 2007.

Gaumet, J.L., P. Salomon and R. Paillisse, 1991: Automatic observations of the state of the soil for meteorological applications. *Preprints of the Seventh Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation: Special Sessions on Laser Atmospheric Studies*, American Meteorological Society (New Orleans, 14–18 January 1991), pp. J191–J193.

Goskomgidromet, 1984: *Opredelenije atmosfernych javlenij po dannym avtomaticeskich stancij, soveqanije gruppy ekspertov GMS/MS socialisticeskich stran po teme 9.1. KR GMS/MS* (Identification of atmospheric phenomena from the data from automatic weather stations: Meeting of the panel of socialist countries HMS/MS on theme 9.1.), Obninsk 24–28 August 1984, Moscow.

ICEAWS, 1999: *Second International Conference on Experiences with Automatic Weather Stations* (Vienna, 27–29 September). Österreichische Beiträge zu Meteorologie und Geophysik, No. 20 (available on CD-ROM only), ZAMG, Vienna, Austria.

Lanzinger, E., M. Theel and H. Windolph, 2006: Rainfall amount and intensity measured by the Thies laser precipitation monitor. Paper presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2006). Instruments and Observing Methods Report No. 94, WMO-TD No. 1354, Geneva.

Persin, S.M., 1987: *Izmerrenije vysoty niznej granicy oblakov i charakteristika oblacnosti kak zadaca paspoznavanija obrazov* (Measuring cloud ceiling and characterizing cloudiness as a task of image identification). Trudy GGO, 512, pp. 49 – 91, Gidrometeoizdat, Leningrad.

Peters, G., B. Fischer and T. Andersson, 2002: Rain observations with a vertically looking Micro Rain Radar (MRR), *Boreal Environment Research* 7, pp. 353 – 362.

Sheppard, B.E. and P.I. Joe, 2000: Automated precipitation detection and typing in winter: a two-year study, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 17, No. 11, pp 1493 – 1507.

Starr, K.M. and R. van Cauwenberghe, 1991: The development of a freezing rain sensor for automated surface observing systems. *Preprints of the Seventh Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation: Special Sessions on Laser Atmospheric Studies*, American Meteorological Society (New Orleans, 13 – 18 January 1991), pp. 338 – 343.

United Kingdom Meteorological Office, 1982: *Observer's Handbook*. Fourth edition, Her Majesty's Stationery Office, London.

United States National Oceanic and Atmospheric Administration, 1988: *Federal Standard Algorithms for Automated Weather Observing Systems Used for Aviation Purposes*. Office of the Federal Coordinator for Meteorological Services and Supporting Research, United States Department of Commerce, FCM-S5-1988, Washington DC.

Van der Meulen, J.P., 2003: *Present Weather – Science: Exploratory Actions on Automatic Present Weather Observations.* Final Report, E-PWS-SCI, KNMI, de Bilt, Netherlands, EUMETNET (available at: http://www.knmi.nl/~samenw/geoss/eumetnet/E-PWS-Sci/report/PWS-Sci_final_report.pdf).

Wade, C.G., 2003: Detecting ice pellets, snow pellets and hail on ASOS using an acoustic sensor. Twelfth AMS Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation, Long Beach, CA, United States, 8 – 13 February 2003.

World Meteorological Organization, 1975: *International Cloud Atlas: Manual on the Observation of Clouds and Other Meteors*. Volume I, WMO-No. 407, Geneva.

World Meteorological Organization, 1985: Algorithms for automatic coding of the present and past weather by

unmanned meteorological stations (M. Mezösi, A. Simon, P. Hanák and O. Szenn.). *Papers Presented at the Third WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-III)* (Ottawa, 8 – 12 July 1985), Instruments and Observing Methods Report No. 22, WMO/TD-No. 50, Geneva, pp. 255 – 259.

World Meteorological Organization, 1992: *International Meteorological Vocabulary*, WMO-No. 182, Geneva.

World Meteorological Organization, 1998: *WMO Intercomparison of Present Weather Sensors/ Systems: Final Report* (Canada and France, 1993 – 1995) (M. Leroy, C. Bellevaux and J.P. Jacob). Instruments and Observing Methods Report No. 73, WMO/TD-No. 887, Geneva.

World Meteorological Organization, 2006: *WMO Laboratory Intercomparison of Rainfall Intensity Gauges* (France, Italy, The Netherlands, 2004 – 2005) (L. Lanza, M. Leroy, C. Alexandropoulos, L. Stagi and W. Wauben). Instruments and Observing Methods Report No. 84, WMO/TD-No. 1304, Geneva.

World Meteorological Organization, 2009: *WMO Field Intercomparison of Rainfall Intensity Gauges* (Italy, 2007 – 2009) (E. Veurich, C. Monesi, L.G. Lanza, L. Stagi and E. Lanzinger). Instruments and Observing Methods Report No. 99, WMO/ TD-No. 1504, Geneva.

World Meteorological Organization, 2010: *Manual on Codes*. Volumes I.1 and I.2, WMO-No. 306, Geneva.

ГЛАВА 15

НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ОБЛАКАМИ

15.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Наблюдения за облаками и оценка или измерение высоты их нижней границы над земной поверхностью имеют большое значение для решения самых разнообразных задач, и в частности находят применение в авиации и оперативной метеорологической практике. В этой главе описываются широко распространенные методы. Важная дополнительная информация представлена в Международном атласе облаков (WMO, 1975; 1987), который содержит научные описания облаков и иллюстрации, используемые при определении форм облаков. Информация с учетом специфики авиационной метеорологии изложена в публикации ВМО (1990).

15.1.1 Определения

Облако. Совокупность мельчайших капель воды, частиц льда или того и другого вместе, нижняя граница которой находится над поверхностью Земли. Предельный диаметр жидких частиц составляет порядка 200 мкм, а более крупные капли представляют собой морось или дождь.

За исключением некоторых редких типов (например, перламутровые или серебристые облака), а также случайного появления перистых облаков в нижней стратосфере, облака не выходят за пределы тропосферы. Как правило, они образуются в результате конденсации водяного пара на ядрах конденсации в атмосфере. Образование облака происходит во время вертикального движения воздуха, например, при конвекции, вынужденном подъеме над возвышенностью или широкомасштабном вертикальном движении, связанном с падениями давления и фронтами. Облака могут образовываться при определенных значениях вертикального градиента температуры и влажности, в результате турбулентности нижних слоев атмосферы и других менее значимых причин. Такие виды деятельности человека, как авиация или промышленность также могут привести к образованию облаков путем увеличения ядер конденсации в атмосфере.

При температуре ниже 0 °C облачные частицы зачастую состоят в основном из капель воды, переохлажденных до -10 °C в случае слоистых облаков и до -25 °C в случае конвективных облаков. При температуре ниже этих весьма приблизительных пределов примерно до -40 °C множество облаков являются «смешанными» с преобладанием ледяных кристаллов в нижней части указанного диапазона температур.

Количество облаков. Часть неба, покрытая облаками одного типа (яруса) или различных типов (ярусов). В любом случае оценка производится с точностью до октанта (восьмая часть) или балла (десятая часть) и сообщается в масштабе, который по существу является одним из ближайших октантов, если не считать того, что цифры 0 и 8 на шкале обозначают совершенно чистое и полностью покрытое облаками небо соответственно при условии дальнейшего согласования с другими цифрами, указанными на любом конце шкалы.

Нижняя граница облаков. Нижняя граница облаков определяется как самая нижняя зона, в которой прозрачность переходит от соответствующей ясному небу или дымке к прозрачности совокупности водяных капель и кристаллов льда. В воздухе непосредственно над облачностью для частиц, вызывающих помутнение, характерна некоторая спектральная избирательность; в самом же облаке этого фактически не наблюдается, и различие обусловлено лишь разными размерами капель. Высота нижней границы облаков определяется относительно уровня земной поверхности. Для авиационных станций уровень земной поверхности определяется как официальная высота аэродрома.

Виды облаков (классификация). Существуют различные классификации облаков, и в частности нижеследующие:

a) В публикации ВМО (WMO, 1975) всю совокупность облаков подразделяется на десять основных форм с дальнейшим подразделением на:
   i) виды облаков (форма облака и структура);
   ii) разновидности облаков (расположение облака и его прозрачность);
   iii) дополнительные характерные особенности и разновидности облаков (например, incus, mamma, virga, praecipitatio, arcus, tuba, pileus, velum и pannus);
   iv) развитие нового вида облака из материнского облака обозначается с помощью добавления «genitus» к названию нового облака и рода материнского облака в том случае, если небольшая часть материнского облака претерпевает

изменения, а в тех случаях, когда все облако или значительная его часть изменяются, к названию прибавляется «mutatus» (например, stratocumulus cumulogenitus или stratus stratocumulomutatus).

b) Классификация производится по высоте облаков и в соответствии с высотой облака подразделяются на уровни (ярусы) – верхний, средний или нижний – на которых различные виды облаков обычно пересекаются. В умеренной зоне предельные значения приблизительно следующие: верхний ярус, 6–12 км (20 000 – 40 000 футов); средний ярус, 0–6 км (0 – 20 000 футов); нижний ярус, 0 – 1,5 км (0 – 5 000 футов)*. Формы облаков верхнего яруса – Cirrus, Cirrocumulus и Cirrostratus; среднего яруса – Altocumulus и Altostratus (последние часто распространяются выше), а также Nimbostratus (обычно распространяются как выше, так и ниже); к облакам нижнего яруса относятся Stratocumulus, Stratus, Cumulus и Cumulonimbus (последние два вида нередко достигают среднего и верхнего ярусов). В синоптических целях разработана девятикодовая классификация облаков по каждому из этих ярусов, где соответствующие коды обозначаются CH, CM и CL в указанном порядке. Целью этой классификации является описание характерного состояния неба, а не отдельных типов облаков:

c) Существуют также следующие классификации, основанные не на внешнем виде облаков:
   i) основанная на физических процессах образования облаков, исключительно кучевых и и слоя облаков.
   ii) основанная на структуре облаков и подразделяющая облака на кристаллические, жидкокапельные и смешанные.

Фотографии большей части этих форм облаков представлены в публикации ВМО (WMO, 1987).

Вертикальная видимость: максимальное расстояние, на котором наблюдатель может распознавать объекты в вертикальном направлении, независимо от того, где находится наблюдатель выше или ниже облаков. Вертикальная видимость может быть рассчитана, исходя из профиля ослабления $\sigma(h)$, как это описано в публикации ВМО (WMO, 2010*b*). Однако, эти соотношения более простые, чем для расчета видимости по горизонтали, т. к. σ может не рассматриваться, как постоянная величина. Тем не менее, может применяться правило $I(h=VV)/I_{I0}=5$ %. Принимая во внимание это предположение, вертикальная видимость может быть выражена по отношению к $\sigma(h)$, в котором VV представлена непрерывно, т. е.

$$\int_{h=0}^{h=VV} \sigma(h)dh = -\ln(5\%) \approx 3 \qquad (15.1)$$

См. также Часть II. Глава 2, уравнения 2.6 и 2.7

15.1.2 Единицы измерения

В качестве единицы измерения высоты облаков используется метр или для некоторых аэронавигационных применений фут. Единицей измерения количества облаков является октант, т. е. одна восьмая часть небесной площади, видимой наблюдателем.

15.1.3 Метеорологические требования

Для решения метеорологических задач необходимы наблюдения за количеством, формой и высотой нижней границы облаков. Для проведения наблюдений в синоптических целях в публикации ВМО (WMO, 2010*a*) приведены конкретные требования по кодированию, предназначенные для оптимального описания состояния облаков от поверхности до верхних уровней. Из космического пространства проводятся наблюдения за количеством облаков и температурой (на основании чего производится расчет высоты верхней границы облака). Измерения из космоса также могут быть использованы для наблюдения за развитием облачности и погоды.

Требования к точности изложены в Часть I. Глава 1. Приложения 1D.

15.1.4 Методы наблюдения и измерения

15.1.4.1 Количество облаков

Традиционно измерение количества облаков проводится посредством визуального наблюдения. Инструментальные методы находятся в стадии разработки и используются в оперативной практике для некоторых применений при оценке небольшого количества облаков. Оценки количества облаков в каждом конкретном слое и общего количества облаков производятся с учетом точки наблюдения.

Общее количество облаков, или общее покрытие небосвода определяется как его часть, покрытая всеми видимыми облаками. Следовательно, оценка общего количества облаков состоит в определении общей видимой площади неба, покрытой облаками.

Частичное количество облаков представляет собой часть площади небосвода, покрытую облаками одного вида или слоем облаков, как если бы это был единственный ярус облачности на небе. Сумма

частичного количества облаков может превышать общее количество облаков и восемь октантов.

Для записи количества облаков используется шкала, предлагаемая в таблице 2700 Кода (ВМО, 2010*a*), которая имеет вид:

Цифра кода	Значение	
0	0	0
1	1 октант или менее, но не нуль	1/10 или менее, но не нуль
2	2 октанта	2/10–3/10
3	3 октанта	4/10
4	4 октанта	5/10
5	5 октантов	6/10
6	6 октантов	7/10–8/10
7	7 октантов или более, но не 8 октантов	9/10 или более, но не 10/10
8	8 октантов	10/10
9	Небо не видно из-за тумана и\или других метеорологических явлений	
/	Облачный покров неразличим по причинам, не связанным с наличием тумана или другими метеорологическими явлениями, либо наблюдения не производились.	

15.1.4.2 Нижняя граница облаков (высота)

Высота нижней границы облаков может определяться посредством инструментального измерения, которое сейчас широко используется в тех местах, где эта характеристика имеет большое оперативное значение. Однако оценка высоты нижней границы облаков, производимая наблюдателем, по-прежнему остается широко распространенной.

В этой главе описаны несколько типов приборов, которые используются в оперативной практике в настоящее время. Международное сопоставление нескольких типов приборов проводилось при координирующей роли ВМО в 1986 г., и его результаты изложены в публикации ВМО (WMO, 1988). В этой публикации содержится полный отчет о точности измерений и рабочих характеристиках приборов.

Инструментальное измерение высоты нижней границы облаков применяется в обычной практике и имеет большое значение для авиационных метеорологических служб; этот вопрос обсуждается в Части II. Главы 2

15.1.4.3 Тип облаков

В настоящее время единственным методом наблюдений за большинством форм облаков является визуальное наблюдение. Иллюстрированные руководства и информация по кодированию предоставляются различными источниками, такими, например, как публикации ВМО (WMO, 1975; 1987) и публикации международных метеорологических служб.

15.2 ОЦЕНКА И НАБЛЮДЕНИЯ ЗА КОЛИЧЕСТВОМ, ВЫСОТОЙ НИЖНЕЙ ГРАНИЦЫ И ВИДАМИ ОБЛАКОВ, ОСУЩЕСТВЛЯЕМЫЕ НАБЛЮДАТЕЛЕМ

15.2.1 Проведение эффективной оценки

Место для проведения оценки характеристик облачности следует выбирать с учетом возможности наиболее широкого обзора неба. Это место должно быть удалено от постоянного источника освещения, который может повлиять на наблюдения в темное время суток. При проведении наблюдений в темное время суток большое значение для наблюдателя имеет достаточный период времени, необходимый для привыкания глаз к темноте.

Естественно, что при оценке количества облаков существуют определенные трудности, особенно в темное время суток. Последовательные наблюдения за развитием облачности и общие представления о ее структуре помогают наблюдателю достичь наилучших результатов. По возможности могут быть также использованы сообщения с самолетов.

15.2.2 Оценка количества облаков

Наблюдатель должен в равной мере изучить участки как над точкой наблюдения, так и расположенные ближе к горизонту. В тех случаях, когда облака беспорядочно разбросаны, целесообразно представить небо в форме отдельных квадрантов, разделенных диаметрами, проведенными под прямым углом друг к другу. Сумма оценок для каждого квадранта принимается как общая для всего неба.

Кодовая цифра 9 используется в тех случаях, когда небо закрыто туманом, падающим снегом и т. д. либо когда наблюдатель не может дать оценку количества облаков вследствие темноты или постороннего освещения. В безлунные ночи обычно представляется возможным дать оценку общего количества облаков, определив, на какой части неба

звезды затуманены или полностью закрыты облаками, хотя у линии горизонта звезды может затмевать мгла.

Наблюдатель также должен дать оценку частичному количеству облаков. Случается, например, что более высокий слой облаков частично закрыт более низкими облаками. В таких случаях оценка протяженности вышележащих облаков может быть произведена довольно уверенно при наблюдении за небом в течение короткого периода времени в дневное время. Движение более низкого облака относительно более высокого позволяет выяснить, покрывает ли более высокий слой небо полностью или наблюдаются разрывы.

Следует отметить, что оценка количества каждого отдельного типа облаков производится независимо от оценки общего количества облаков. Сумма отдельных оценок частичного количества облаков часто превышает как общее количество облаков, так и восемь восьмых.

15.2.3 Оценка высоты нижней границы облаков

На тех станциях, где измерительное оборудование отсутствует, может производиться лишь оценка высоты нижней границы облаков. В горной местности, если высота нижней границы любого облака меньше высоты окружающих станцию гор, она может быть оценена посредством сравнения с высотой характерных топографических особенностей, указанных на контурных картах района. Целесообразно иметь для постоянного отображения данных подробную схему высоты и местоположения холмов и наземных ориентиров, которые могут быть использованы при оценке высоты облаков. В силу эффекта перспективы наблюдателю может казаться, что облако лежит на удаленных холмах, но это не обязательно означает, что таким образом можно определить высоту облаков над наблюдаемым участком. В любых обстоятельствах наблюдатель должен произвести оценку, принимая во внимание форму и общий вид облаков.

Диапазоны высоты нижней границы облаков над поверхностью, соответствующие различным видам облаков в умеренной зоне, представлены в таблице ниже и соответствуют станциям, высота которых не превышает 150 м (500 футов) над средним уровнем моря. Для наблюдательных площадок на достаточно большой высоте или станций в горной местности высота нижней границы облаков нижнего яруса над станциями часто может быть меньше.

В других климатических зонах, и особенно в засушливых тропических условиях, высота нижней границы облаков может значительно отклоняться от указанных диапазонов. Различия могут привести к возникновению проблем при классификации облаков и оценке их высоты. Так, например, описания тропических кучевых облаков явно конвективного происхождения с высотой нижней границы более 2 400 м (8 000 футов) или даже 3 600 м (12 000 футов) были подтверждены наблюдениями с самолета. Следует упомянуть, что наземные наблюдатели в таких случаях часто в значительной степени недооценивают высоту облаков. Такая недооценка может быть обусловлена следующими двумя факторами: наблюдатель может полагать, что кучевое облако – это «низкое облако» с высотой нижней границы менее 2 000 м (6 500 футов), причем, как правило, даже менее 1 500 м (5 000 футов), либо атмосферные условия и форма облака в сочетании дают оптическую иллюзию.

В тех случаях, когда непосредственная оценка высоты нижней границы облаков производится в ночное время, результаты в значительной степени зависят от правильной идентификации формы облаков. Общие метеорологические знания и тщательное наблюдение за погодой играют очень важную роль, когда наблюдатель должен составить представление о том, осталось ли основание облака на прежней высоте, поднялось или опустилось. Особая тщательность и умение требуются от наблюдателя, когда слой высокослоистых облаков закрывает небо в вечернее время. Любое постепенное снижение такого слоя облаков часто очень трудно обнаружить; при этом основание редко бывает однородным, а небольшие контрасты зачастую могут быть обнаружены в любое время за исключением самых темных ночей.

Высота нижней границы облаков над уровнем земной поверхности в умеренных районах

Вид облаков	*Обычный диапазон высоты нижней границы**		*Более широкий диапазон иногда наблюдаемых значений высоты нижней границы и прочие примечания*	
	метры	*футы*	*метры*	*футы*
Нижний ярус:				
Слоистые	Поверхность–600	Поверхность–2 000	Поверхность–1 200	Поверхность–4 000
Слоисто-кучевые	300–1 350	1 000–4 500	300–2 000	1 000–6 500
Кучевые	300–1 500	1 000–5 000	300–2 000	1 000–6 500
Кучево-дождевые	600–1 500	2 000–5 000	300–2 000	1 000–6 500
Средний ярус	километры			
Слоисто-дождевые	Поверхность–3	Поверхность–10 000	Слоисто-дождевые облака считаются облаками среднего яруса для синоптических целей, хотя они могут распространяться на другие уровни.	
Высокослоистые Высококучевые	2–6	6 500–20 000	Увеличение толщины высокослоистых облаков по мере уменьшения высоты их основания может привести к их трансформации в слоисто-дождевые облака.	
Верхний ярус				
Перистые			При диссипации кучево-дождевых облаков могут образовываться перистые облака на высоте менее 6 км (20 000 футов) в зимнее время	
Перисто-слоистые Перисто-кучевые	6–12	20 000–40 000	Перисто-слоистые облака могут трансформироваться в высокослоистые.	

* Для станций, расположенных на высоте более 150 м над уровнем моря, высота нижней границы облаков нижнего яруса часто бывает меньше.

** Высота нижней границы облаков нижнего яруса в умеренных широтах колеблется в диапазоне высот от 30 м (100 футов) до 1 500 м (5 000 футов).

15.2.4 Наблюдение за видами облаков

Наблюдение за видами облаков в большинстве случаев проводятся наблюдателем. Иллюстрированные руководства и информация по кодам имеются в многочисленных источниках, таких как публикации ВМО (WMO, 1965, 1087) и публикации национальных метеорологических служб.

15.3 ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ КОЛИЧЕСТВА ОБЛАКОВ

Рабочих наземных датчиков для измерения общего количества облаков удовлетворительного качества пока не существует. Измерения, проводимые со спутниковых радиометров в диапазоне видеочастот, дополненные инфракрасными изображениями, могут быть использованы для оценки количества облаков над обширными территориями, но зачастую возникают трудности, связанные, например, с невозможностью отличить слоистые облака нижнего яруса от тумана. Количество облаков нижнего яруса в радиусе действия электронного облакомера может определяться посредством измерения времени прохождения хорошо идентифицированных слоев и при условии, что эти осредненные во времени результаты являются репрезентативными для условий пространства, окружающего наблюдательную площадку. Для решения задач синоптической метеорологии эти методы в большинстве случаев являются подходящими, но для наблюдений на аэродромах их использование может привести к значительным ошибкам при оценке количества облаков над аэродромом. В США на автоматических метеорологических станциях разработана технология «накопления» с использованием данных электронных облакомеров. Другие страны, такие как Швеция (Larsson and Esbjorn, 1995) и Нидерланды (Wauben, 2002) внедрили аналогичные технологии для проведения оперативных

измерений. Для измерения количества облаков существуют другие приборы: облакомеры, которые могут охватить пространство небосвода в нескольких направлениях и/или просканировать небосвод, и камеры обзора небосвода, специально разработанные для этих целей.

15.3.1 Использование лазерных облакомеров

В некоторых метеорологических службах используются временные ряды высоты нижней границы облаков, измеренные лазерным облакомером (15.4.1), для определения количества облаков. Этот метод имеет некоторые преимущества по сравнению с наблюдениями, выполняемыми персоналом. При использовании лазерного облакомера получаются более надежные результаты. Кроме того, измерения могут проводиться чаще и не зависеть от темного времени суток. Имеются также некоторые недостатки. Этот метод применим к облакам, движущимся в поле зрения прибора, а это не всегда происходит. Также в случае, если облака движутся по всему полю видимости облакомера, они могут не присутствовать на всем небосводе. Таким образом, временные ряды нижней границы облаков не всегда могут представлять весь небосвод, на основе которого сообщаются данные по облачности. Совпадение (в пределах 2 октантов) между этим методом и неавтоматизированным измерением величины облачности обычно составляет 80–90 % (Wauben, 2006).

В автоматизированной системе приземных наблюдений (АСОС) Национальной метеорологической службы США измерительный прибор высоты нижней границы облака (лазерный облакомер – раздел 15.4.1) обобщает отраженные сигналы возврата каждые 30 сек и определяет высоту действительных «точек отражения». Каждую минуту последние 30 минут 30 сек данных обрабатываются для получения удвоенной взвешенной величины последних 10 мин с целью реагирования на последние изменения в состоянии облачности. Затем данные сортируются в «накопители высоты отраженные сигналов».

Каждую минуту в случае, если зарегистрировано более пяти значений отраженных сигналов высоты (в течение последних 30 мин), значения высоты группируются в слои, применяя квадратическую процедуру до тех пор, пока не остается только пять накопителей (каждый накопитель отраженных сигналов может заключать в себе большое количество точек отражения). Данные «накопители» отраженных сигналов или кластеры распределяются от самой нижней до самой высшей точки. После кластеризации АСОС определяет могут ли кластеры быть объединены и округлены в зависимости от высоты в метеорологически значимые группы высоты. В результате накопители называемые «слоями» выбираются алгоритмом до трех из этих слоев для передачи данных в коде METAR/SPECI в соответствии с национальными приоритетами передачи данных о слоях облачности.

Количество облачности определяется путем прибавления в каждый слой общего числа точек отражения и расчете соотношения данных совпадений к общему возможному. Если имеется более одного слоя, точки отражения в первом слое добавляются ко второму (и третьему) для получения общей картины облачности. В целях передачи данных величина облака, измеренная по системе АСОС для каждого слоя, затем конвертируется в статистическую функцию эквивалентную проведению неавтоматизировнных наблюдений.

Данный алгоритм также проверяет наличие облачности по всему небосводу основываясь на критерии видимости нижних приземных слоев и высоком проценте «неизвестных точек отражения» в низких слоях.

Алгоритм состояния небосвода также был разработан для использования в тех случаях, когда формирование (или адвекция) облака происходило в (или от) известном расположении и приводило к значительной одновременной разнице в состоянии облачности в аэропорту. Данный метеорологический изменяющийся алгоритм применяется для датчиков показателя определения высоты нижней границы облака. Основной датчик устанавливается недалеко от зоны касания на пути действия основного прибора. Второй датчик обычно устанавливается на расстоянии от 3 до 6 км (2–4 миль) от основного датчика в наиболее вероятном направлении адвекции или ближе к постоянному источнику уникальных условий облачности. Второй индикатор высоты нижней границы облака предназначен для оперативного определения значительного расхождения в состоянии облачности.

Дополнительные детали алгоритма облачности АСОС и его верификации предоставлены НОАА (1988) и Правительством Соединенных Штатов.

15.3.2 Использование пирометров

Пирометры представляют собой ИК термометры, с помощью которых проводятся наблюдения по множеству направлений вертикали и/или сканирование небосвода. Измеряемая температура ИК является показателем наличия облаков в атмосфере. При сканировании для определения количество облаков измерения проводятся по всему небосводу.

Сканирующие пирометры исключают проблемы измерений, которые существуют при других методах, зависящих от количества исследуемых точек. Возможно также проведение измерений в темное время суток. Недостатком является трудность классификации фракционных и/или транспарантных «пикселей». Также некоторые приборы могут быть не полностью защищены от атмосферных воздействий.

15.3.3 Использование камер обзора небосвода

Существуют камеры, которые специально разработаны для измерения количества облаков. Они проводят наблюдения за небосводом применяя, например, изогнутые зеркала. Изображение с камеры анализируется при помощи алгоритма, определяющего наличие облака в настоящее время в каждом пикселе используя измеряемый цвет. Сумма всех пикселей определяет количество облаков.

Этот метод исключает проблемы, связанные с проведением измерений, которые выполняются при использовании других методов. Некоторые камеры используются в дневное время, и таким образом, не могут быть применены в темное время суток. Камеры, измеряющие в ИК, не имеют таких недостатков, но они охватывают меньшее поле зрения и более дорогостоящие. Для таких камер необходимо часто проводить техническое обслуживание по очищению оптических поверхностей.

15.4 ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ВЫСОТЫ НИЖНЕЙ ГРАНИЦЫ ОБЛАКОВ С ПОМОЩЬЮ ОБЛАЧНОГО ПРОЖЕКТОРА

Для измерения высоты нижней границы облаков используется несколько методов. Это: использование лазерного облакомера, потолочного прожектора с вращающимся лучом, облачного прожектора и шаразонда. Наиболее часто в настоящее время используется метод измерения с помощью лазерного облакомера. Эта методика обладает огромным преимуществом по сравнению с другими, и в этой связи ее следует рассматривать, как наиболее подходящую.

15.4.1 Использование лазерного облакомера

15.4.1.1 Метод измерения

При использовании лазерного облакомера высота нижней границы облаков определяется посредством измерения времени, необходимого для прохождения светового импульса когерентного света от источника до нижней границы облаков и возвращения к приемнику (принцип: определение света и диапазона, ЛИДАР). Мощность, излучаемая лазером, направлена вертикально вверх, где, если облачность располагается над источником света, излучение рассеивается гидрометеорами, составляющими облачность. Основная доля излучения рассеивается вверх, но некоторая часть ее рассеивается вниз и фокусируется на фотоэлектрическом детекторе приемника. Облакомер (рисунок 15.1) состоит из двух узлов – приемо-передатчика «в сборе» и записывающего устройства.

Передатчик и приемник устанавливаются рядом в одном помещении с электронной аппаратурой по детектированию и обработке сигналов. Источником света является полупроводниковый лазер с длиной волны близкой к инфракрасной. Оптические устройства передатчика располагаются таким образом, что лазерный источник и детектор приемника находятся в фокусе условной или ньютоновской телескопической системы. На поверхности линз наносится соответствующее покрытие толщиной в одну четверть длины волны с целью уменьшения отражения и обеспечения высокого уровня пропускания света. Отверстие источника света герметично закрывается стеклянным окошком, которое имеет антиотражательное покрытие на внутренней поверхности и устанавливается под углом для стекания дождевой воды.

Приемник имеет ту же конструкцию, что и передатчик, однако вместо источника света в него входят фотодиод, а также встроенный узкодиапазонный оптический фильтр. Фильтр не пропускает большую часть фонового рассеянного солнечного излучения, облегчая, таким образом, обнаружение рассеянного лазерного излучения в светлое время суток.

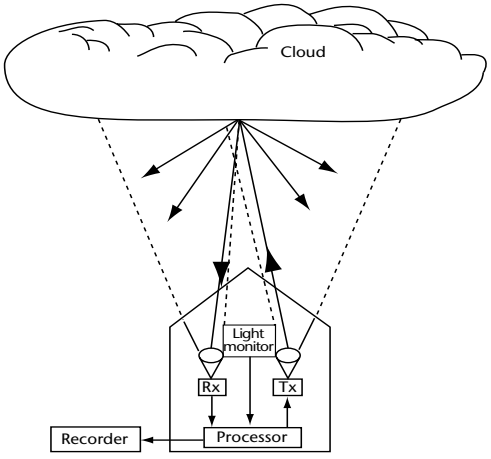


Рисунок 15.1. Типичный лазерный сейлометр

Излучатель и приемник установлены рядом таким образом, что пучок света излучателя и поле зрения приемника начинают совмещаться на высоте 5 м над устройством и полностью совмещаются на высоте нескольких сот метров. Такие же оптические устройства применяются в некоторых системах для передачи и получения излучения, что позволяет избежать этой проблемы.

Укрытие снабжается нагревателями во избежание конденсации на оптических поверхностях, а влажность внутри укрытия понижается посредством использования осушителя. Верхняя часть укрытия снабжена крышкой, в которую встроены оптические отражатели, предохраняющие устройство от прямого солнечного излучения.

Выходная мощность детектора разделяется на последовательные «строб-импульсы», каждый из которых отображает минимально обнаруживаемое приращение высоты. В прибор вмонтировано пороговое устройство таким образом, что исключается возможность того, что прибор не видит облако или видит несуществующее облако.

15.4.1.2 Размещение и установка

Устройство должно быть установлено на прочном основании со свободным обзором над точкой наблюдения в пределах конуса с углом приблизительно 30° к вертикали. Если необходимо, может быть использована площадка на крыше при условии соответствующей корректировки сообщаемых высот к уровню земной поверхности. Несмотря на то, что в оперативной практике конструкция лазерных облакомеров обеспечивает «безопасность для зрения», следует принять меры к тому, чтобы случайный наблюдатель не смотрел непосредственно в излучаемый пучок света.

С целью снижения воздействия сильно отражающихся дождевых капель пучок света и телескоп должны быть установлены под углом приблизительно 5° к вертикали.

15.4.1.3 Источники погрешностей

Существуют три основных источника погрешностей.

a) Погрешности диапазона. Такие погрешности возможны, когда в основных цепях хронирующего генератора возникают неисправности, но при обычной работе они могут не приниматься во внимание.

b) Вертикальность излучаемого/отраженного пучка света. В том случае, если прибор отъюстирован и отклонение луча от вертикали составляет не более 5°, погрешностями такого рода можно пренебречь.

c) Ошибки, возникающие в системе обработки сигналов. В связи с тем, что обычно нижняя граница облаков весьма расплывчата и варьирует в значительной степени во времени и в пространстве, были разработаны сложные алгоритмы для оценки репрезентативных значений нижней границы облаков по отраженному облаком сигналу. В условиях тумана (при наличии или отсутствии над ним облачности), а также при выпадении осадков могут возникать серьезные ошибки; следовательно, важно иметь информацию о видимости и осадках для того, чтобы оценить результаты, получаемые с помощью облакомера. В условиях характерной слоистой облачности, например, при наличии слоисто-кучевых облаков, ошибки измерения проверяются исключительно посредством пороговых алгоритмов облачности и могут считаться подходящими для некоторой частной конструкции облакомера.

d) Диапазон измерений. Благодаря ограниченной энергии, исходящей от лазера, коротковолновое излучение на большой высоте может быть настолько малой интенсивности, что ее можно не принимать во внимание. В этой связи не всегда можно наблюдать высоту нижней границы перистых облаков.

В оперативной практике в условиях однородного основания облаков результаты измерений лазерным облакомером обычно можно сравнить с результатами шаропилотных измерений, а также измерений с самолета и с помощью прожектора в ночное время. Были проведены сопоставления лазерных облакомеров различного производства. Например, во время проведения ВМО международного сопоставления облакомеров (WMO, 1988) сравнивались несколько конструкций облакомеров, а также результаты наблюдений с помощью облакомеров с вращающимся лучом и шаров-пилотов. Международные сопоставления обнаружили, что при использовании современной технологии лазерный облакомер представляет собой наиболее точное, надежное и эффективное средство измерения высоты нижней границы облаков с поверхности земли по сравнению с альтернативным оборудованием.

15.4.1.4 Калибровка и техническое обслуживание

Большинство лазерных облакомеров снабжены встроенной диагностикой, которая контролирует излучаемую выходную энергию и предохраняет от серьезных погрешностей во времени. Проверка калибровки обычно ограничивается проверкой частоты и стабильности основного генератора посредством использования высококачественных

наружных стандартов частоты и проверкой выходной мощности излучателя. Калибровка может быть произведена путем сопоставления (WMO, 1988). Устанавливая облакомер на определенном расстоянии (например, вышка), он используется для подтверждения измерения расстояния при помощи прибора. Текущее обслуживание обычно заключается в чистке открытых оптических приборов и наружных поверхностей и замене воздушных фильтров при наличии охлаждающих воздуходувок.

15.4.2 Использование потолочного прожектора с вращающимся лучом

15.4.2.1 Метод измерения

Принцип действия потолочного прожектора с вращающимся лучом заключается в измерении угловой высоты светового пучка, сканирующего облака в вертикальной плоскости, во время обнаружения отраженного от облака относительного количества света фотоэлементом, который направлен вертикально вверх на известном расстоянии от источника света (рисунок 15.2). Прибор состоит из передатчика, приемника и записывающего устройства.

Передатчик испускает узкий пучок, расходимость которого составляет 2°. Излучаемая радиация представляет собой в основном короткие инфракрасные волны длиной от 1 до 3 мкм. Таким образом, используемая длина волны незначительна по сравнению с размером водяных капель в облаке. Световой пучок сканирует облака в вертикальной плоскости, обычно охватывая от 8 до 85°, и модулируется частотой приблизительно 1 кГц для того, чтобы с помощью методов фазочувствительного детектирования улучшить соотношение сигнал–шум в приемнике.

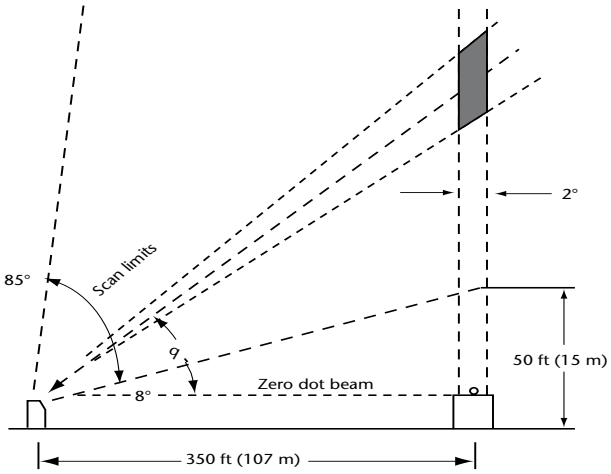


Рисунок 15.2. Типичный потолочный прожектор с вращающимся лучом

Приемник состоит из фотоэлемента и ограничителя угла зрения; ограничитель служит для того, чтобы на фотоэлемент могли попасть только направленные сверху вертикально лучи света. Перо записывающего устройства, движущееся одновременно с лучом передатчика, регистрирует получаемый от облака сигнал.

15.4.2.2 Размещение и установка

Передатчик и приемник должны быть установлены на открытой ровной площадке на расстоянии 100–300 м друг от друга на прочных и устойчивых подставках. Особенно важно, чтобы источник света сканировал в той же плоскости, что и приемник. Это достигается посредством точной регулировки оптики и проверкой плоскости, соответствующей лучу передатчика, в подходящих условиях в темное время суток.

15.4.2.3 Источники погрешностей

При измерении высоты нижней границы облака с помощью потолочного прожектора с вращающимся лучом могут быть допущены погрешности, обусловленные следующими факторами:

a) шириной светового пучка,
b) оптическим несовпадением,
c) механическими допусками движущихся деталей,
d) чувствительностью приемника.

Поскольку во многих конструкциях объем пересечения конусов передатчика и приемника довольно значителен при высоте облаков более 500 м, то погрешности, связанные с шириной светового пучка, обычно являются наиболее серьезными. Определение нижней границы облаков в разделе 15.1.1 не представляет собой адекватную основу для объективной конструкции облакомеров, следовательно, используемые алгоритмы основаны на экспериментальных результатах и сравнениях с другими методами оценки. В одних потолочных прожекторах с вращающимся лучом используется пороговая техника определения наличия облачности, а в других – схема детектирования пикового сигнала. В некоторых случаях чувствительность приемника влияет на сообщаемую высоту облаков, вследствие чего возникают значительные погрешности, превышающие при определенных обстоятельствах установленные эксплуатационные требования (Douglas and Offiler, 1978). Эти погрешности обычно возрастают с увеличением регистрируемой высоты.

Потолочный прожектор с вращающимся лучом крайне чувствителен к наличию осадков, и в случае умеренных или сильных осадков прибор может

ошибочно показать наличие облаков нижнего яруса или не сможет определить облака вообще. В условиях тумана пучок света может рассеиваться на нижнем уровне, и электронный облакомер не сможет дать какую-либо полезную информацию об облачности даже при наличии облаков нижнего яруса.

Было проведено сравнение потолочного прожектора с вращающимся лучом и лазерного облакомера; его результаты широко сообщались (WMO, 1988). Результаты сравнения показывают значительное совпадение данных, полученных двумя типами облакомеров на регистрируемых высотах вплоть до 500 м, но эффективность детектирования потолочного прожектора с вращающимся лучом во время дождя заметно ниже.

15.4.2.4 Калибровка и обслуживание

Единственный вид обслуживания, которое обычно производит пользователь, – это чистка окон передатчика и приемника и замена ленты. Снаружи пластиковые окна передатчика и приемника следует чистить еженедельно. Для этого должна использоваться мягкая сухая ткань. Следует проявлять осторожность с тем, чтобы не поцарапать стекло. При замене лампы передатчика следует произвести оптическую корректировку. Необходимо ежегодно проверять горизонтальность передатчика и приемника и, если необходимо, проводить корректировку.

15.4.3 Использование облачного прожектора

15.4.3.1 Метод измерения

При использовании этого метода (рисунок 15.3) угол возвышения E светового пятна на нижней границе облачности, полученного посредством вертикально направленного луча прожектора, измеряется с помощью алидады из удаленной точки. Пусть L – известное горизонтальное расстояние в метрах (футах) между прожектором и точкой наблюдения; тогда высота h в метрах (футах) нижней границы облачности над точкой наблюдения описывается выражением

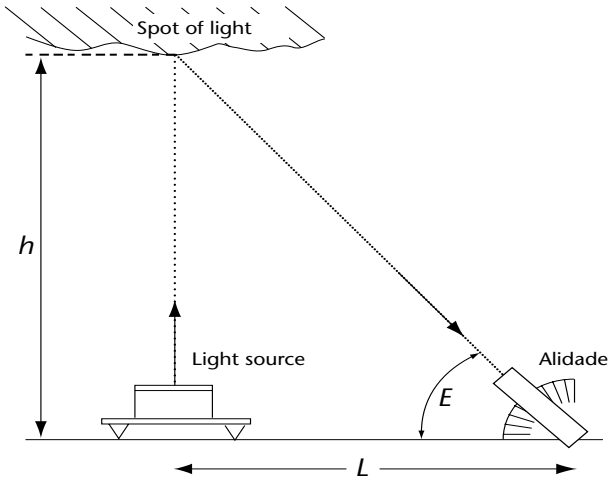


Рисунок 15.3. Принцип действия облачного прожектора

$$h = L \tan E \qquad (15.2)$$

Оптимальное расстояние между прожектором и точкой наблюдения составляет 300 м (1 000 футов). Если это расстояние будет больше, то световое пятно может стать плохо различимым; при меньшем расстоянии нет гарантии точности измерений высоты более 600 м (2 000 футов). Приемлемо расстояние, равное 250–550 м (800–1 800 футов).

15.4.3.2 Размещение и установка

Желательно, чтобы был свободный обзор между прожектором и алидадой, которые должны быть установлены на прочных, устойчивых подставках. При разнице в высоте над уровнем земной поверхности между прожектором и алидадой в расчетные высоты необходимо внести поправку. Если свободный обзор невозможен, то мешающий объект не должен распространяться более чем на 100 футов.

15.4.3.3 Источники погрешностей

Наиболее значительным источником ошибок погрешностей является неточность измерения угла возвышения. Погрешностей высоты, связанные с небольшими отклонениями от вертикали, не имеют значения.

Абсолютная погрешность Δh при определении высоты облака связана с ошибкой погрешностью ΔE измеренного возвышения следующим образом (предполагается, что L – точно измеренная постоянная):

$$\Delta h = L \cdot (1/\cos^2 E) \cdot \Delta E = L \sec^2 E \cdot \Delta E \qquad (15.3)$$

значение E в радианах ($1° = \pi/180$ рад). Необходимо учесть, что Δh стремится к бесконечности при $E \rightarrow 90°$. Если $L = 300$ м (1 000 футов) и $\Delta E = 1°$, то $\Delta h = 6$ м (17 футов) при $h = 300$ м (1000 футов) и Δh приблизительно равно 140 м (450 футов) при $h = 1\,500$ м (5 000 футов). Относительная ошибка h описывается выражением

$$\Delta h/h = 1/(\sin E \cdot \cos E) \cdot \Delta E \qquad (15.4)$$

при E в радианах. $\Delta h/h$ является минимальной при $E = 45°$ (или $h = L$).

15.4.3.4 Калибровка и техническое обслуживание

Фокусировку и вертикальность пучка света следует проверять, если возможно, приблизительно один раз в месяц, так как со временем могут произойти небольшие изменения формы нити накала лампы. При замене лампы следует произвести регулировку ее положения, так как не все лампы одинаковы.

Вертикальность пучка света следует проверять в безлунную ночь с помощью теодолита. Проверку следует проводить из двух положений: из точки, в которой находится алидада, и из другой точки, находящейся приблизительно на таком же расстоянии от прожектора под прямым углом к линии, соединяющей прожектор и алидаду (рисунок 15.4). Азимуты прожектора и светового пятна на облаке должны быть измерены с максимально возможной точностью, как и угол возвышения светового пятна. Если различие между азимутами обозначить буквой A, а угол возвышения светового пятна – E, то отклонение пучка света от вертикали выражается следующим образом:

$$\phi = \arctan(\tan A/\tan E) \approx A/\tan E \qquad (15.5)$$
(для $A \approx 1°$ или меньше)

Если отклонение ϕ составляет более 1° при измерении из точки алидады или более 0,5° из другого положения, следует продолжать регулировку до получения необходимой точности.

Фокусировку можно проверить и отрегулировать в безлунную ночь, проводя наблюдения за диаметром светового пятна на самом высоком облаке над прибором. Если необходимо, фокус можно отрегулировать с целью сведения к минимуму диаметра светового пятна.

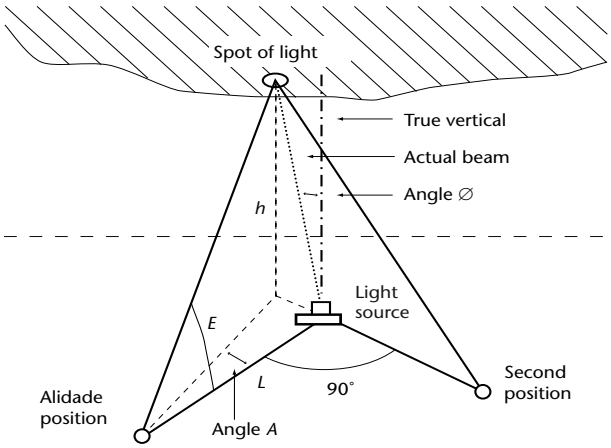


Рисунок 15.4. Проверка вертикальности светового луча прожектора

15.4.4 Измерение с помощью шара-зонда

15.4.4.1 Метод измерения

Высота облаков может быть измерена в светлое время суток путем определения времени, необходимого для того, чтобы маленький резиновый шар, наполненный водородом или гелием, поднялся от земной поверхности до нижней границы облаков. За нижнюю границу облаков следует принять уровень, на котором шар начинает входить в слой дымки, прежде чем окончательно исчезнуть.

Скорость подъема шара в основном обусловлена его свободным подъемом и может регулироваться посредством осуществления контроля за количеством водорода или гелия в шаре. Интервал времени между началом движения шара и его входом в облако измеряется с помощью секундомера. Если скорость подъема равна n метров в минуту, а время движения составляет t минут, то высота нижней границы облаков над поверхностью земли равна $n{\cdot}t$ метров, но не всегда стоит неукоснительно следовать этому уравнению. Вихревые потоки воздуха на месте взлета могут препятствовать подъему шара в течение некоторого времени с момента его выпуска. Как правило, секундомер включается в момент выпуска шара, и, следовательно, период времени между выпуском шара и моментом его выхода из вихревого движения следует вычесть из общего времени, прежде чем определять высоту облачности. Даже если не принимать во внимание вихревые эффекты, скорость подъема на самом низком участке 600 м (2 000 футов) является весьма непостоянной.

Несмотря на то, что высоту нижней границы облаков среднего яруса иногда получают в качестве сопутствующей информации при измерениях ветра на высотах с помощью шара-пилота, в основном метод измерения шаром-зондом подходит для облаков нижнего яруса. При отсутствии вспомогательных оптических приборов, таких как бинокль, телескоп или теодолит, не следует проводить измерения, если высота нижней границы облаков предположительно превосходит 900 м (3 000 футов) даже при слабом ветре. При сильном ветре шар-зонд может выйти за пределы диапазона видимости невооруженным глазом до того, как он достигнет границы облачности.

В случае выпадения осадков скорость подъема шара-зонда уменьшается, и измерения высоты облаков с помощью шара-пилота можно проводить только в условиях слабых осадков.

Описанный метод может использоваться в ночное время, если шар-зонд снабжен электрическим

освещением. В целях безопасности использование свечей строго запрещено.

15.4.4.2 Источники погрешностей

Результаты измерения высоты нижней границы облаков с помощью шара-зонда следует использовать с осторожностью, так как средняя скорость подъема шара-зонда, особенно на участке первых нескольких сотен метров, может значительно отличаться от предполагаемой скорости подъема (вследствие влияния вертикальных движений, формы шара-зонда, осадков и турбулентности).

15.5 ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ФОРМ ОБЛАКОВ

Наблюдения форм облаков до сих пор проводятся персоналом. Существует только один автоматический метод измерения специально для определения CB/TCU (кучево-дождевых/башенкообразных кучевых) облаков. При этом методе используются данные сети радара, измеряющего осадки. Радар классифицирует отражение, и ряд светящихся разрядов в пределах определенной зоны комбинируется для получения информации о присутствии CB и/или TCU. Это новый метод, который используется несколькими метеорологическими службами. Вероятность ложных тревог относительно высока. (Leroy 206).

15.6 ДРУГИЕ ОСОБЕННОСТИ, СВЯЗАННЫЕ С ОБЛАКАМИ

15.6.1 Вертикальная видимость

Вертикальная видимость определяется, как максимальное расстояние, на котором наблюдатель может различать предметы в вертикальном направлении. Вертикальная видимость может быть рассчитана исходя из профиля ослабления атмосферы, как описано в публикации ВМО (WMO, 2010*b*). Облакомеры (15.4.1 определение высоты нижней границы облаков) могут оценить вертикальную видимость на основе интегрированной отраженной энергии с амплитудой. В публикации ВМО (WMO, 1988) говорится, что при использовании данного метода нередко получаются недостоверные результаты. На практике данные о вертикальной видимости часто получают при использовании облакомера, когда высота нижней границы облаков не соответствует требованиям, но отражающийся свет принимается с определенной высоты.

Примечание: * – Диапазон высот облаков среднего и нижнего ярусов в соответствии с Международной классификацией для умеренных широт в оперативной практике Росгидромета принимается равным 2–6 км (7 000–20 000 футов) и 0,03–1,5 км (100–5 000 футов).

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Douglas, H.A. and D. Offiler, 1978: The Mk 3 cloud base recorder: A report on some of the potential accuracy limitations of this instrument. *Meteorological Magazine*, 107, pp. 23–32.

Larsson, B. and E. Esbjörn, 1995: *Cloud Cover Algorithm*. SMHI IO-BN 1995-01-11, SMHI, Norrköping, Sweden.

Leroy, M. and others, 2006: Status of the automatic observation on aerodrome and ongoing improvements in France. Paper presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2006), Instruments and Observing Methods Report No. 94, WMO/TD-No. 1354, Geneva.

National Oceanic and Atmospheric Administration, 1988: *Federal Standard Algorithms for Automated Weather Observing Systems Used for Aviation Purposes*. Office of the Federal Coordinator for Meteorological Services and Supporting Research, United States Department of Commerce, FCM-S5-1988, Silver Spring, MD, United States.

United States Government, 1999: *Automated Surface Observing System*. Air Force Operational Test and Evaluation Center: Final Assessment Report for the Federal Aviation Administration, California, United States.

Wauben, W, H. Klein Baltink, M. de Haij, N. Maat and H. The, Status, evaluation and new developments of the automated cloud observations in The Netherlands, Paper presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2006), Instruments and Observing Methods Report No. 94, WMO/TD-No. 1354, Geneva.

Wauben, W.M.F., 2002: *Automation of visual observations at KNMI*: (II) Comparison of automated cloud reports with routine visual observations. In: *Symposium on Observations*, *Data Assimilation and Probabilistic Prediction*. AMS Annual Meeting, 2002 Report, Orlando, FL, United States.

World Meteorological Organization, 1975: *International Cloud Atlas: Manual on the Observation of Clouds and Other Meteors*, Volume I, WMO-No. 407, Geneva.

World Meteorological Organization, 1987: *International Cloud Atlas*. Volume II, WMO-No. 407, Geneva.

World Meteorological Organization, 1988: *WMO International Ceilometer Intercomparison* (D.W. Jones, M. Ouldridge and D.J. Painting). Instruments and Observing Methods Report No. 32, WMO/TD-No. 217, Geneva.

World Meteorological Organization, 2006: *Guide on Meteorological Observing and Information Distribution Systems for Aviation Weather Services*. WMO-No. 731, Geneva.

World Meteorological Organization, 2010*a*: *Manual on Codes*. WMO-No. 306, Geneva.

World Meteorological Organization, 2010*b*: *Manual on the Global Observing System*. Volume I, WMO-No. 544, Geneva.

ГЛАВА 16

ИЗМЕРЕНИЕ ОЗОНА

16.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Молекула озона состоит из трёх атомов кислорода и образуется в стратосфере естественным путём посредством фотолиза обычного кислорода, проходящего под воздействием ультрафиолетового солнечного излучения с длиной волны менее 242,5 нм. Определённое количество озона также образуется в тропосфере в результате ряда химических реакций, проходящих с использованием углеводородов и азотсодержащих газов. Несмотря на то, что озон является малой атмосферной составляющей со средней концентрацией около 3 частей на миллион по объёму (ppmv), радиационные свойства этого «парникового» газа таковы, что он оказывает значительное воздействие на радиационный энергетический баланс атмосферы и является одним из важных регуляторов ультрафиолетового солнечного излучения, поступающего на поверхность земного шара. Бóльшая часть (90 %) атмосферного озона находится в стратосфере, а его максимальная концентрация наблюдается, в зависимости от широты и времени года, на высоте от 17 до 25 км (рисунок 16.1), где его присутствие служит причиной инверсии температуры в стратосфере и температурного максимума в стратопаузе. В дополнение к радиационным свойствам озон обладает также способностью вступать в реакции со многими другими малыми составляющими атмосферы, часть которых имеет антропогенное происхождение. Географическое и вертикальное распределение озона в атмосфере определяется сложным взаимодействием динамических и фотохимических процессов в атмосфере.

Контроль за озоном у поверхности Земли необходим, поскольку озон является продуктом промышленного и городского загрязнения. Данные измерений содержания озона в тропосфере и стратосфере используются для проверки моделей, в которых воспроизводятся фотохимические процессы или общая циркуляция реальной атмосферы. Измерения озона проводятся также для того, чтобы определить степень влияния газов антропогенного происхождения на озоновый слой, осуществить проверку результатов оценочного моделирования изменения объёмов озона, а также, с целью подтвердить эффективность Монреальского протокола по веществам, разрушающим озоновый слой, и поправок к нему[1]. Осуществление подобного мониторинга озонового слоя требует наличия на станциях, оснащённых хорошо обслуживаемыми приборами, рядов высококачественных, долгосрочных

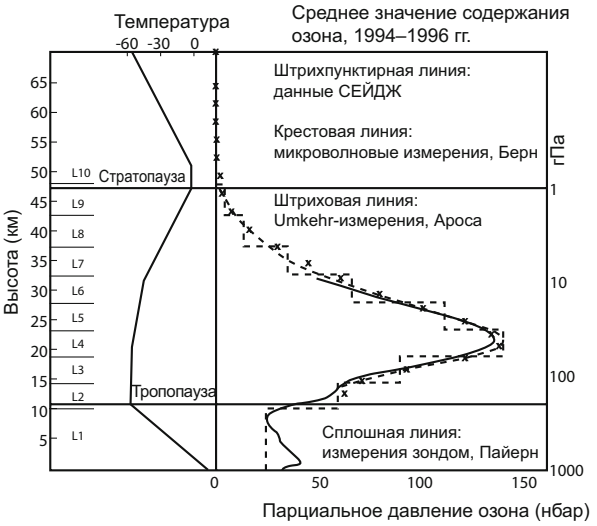


Рисунок 16.1. Пример вертикального среднего распределения озона в атмосфере над Швейцарией и различные методы, использовавшиеся для его измерения (Й. Стехелин, УЕР Федеральный институт технологии, Цюрих)

данных о состоянии озона, без чего проведение надежного анализа тенденций невозможно.

16.1.1 Определения

Существуют три основные характеристики атмосферного озона, которые обычно измеряются, данные о которых получают посредством систем наземного и спутникового наблюдения, а именно:

(a) приземный озон;
(b) общее содержание озона;
(c) вертикальное распределение озона.

Приземный озон – это локальная концентрация озона в слое, находящемся на уровне нескольких метров над земной поверхностью в каком-либо конкретном месте земной поверхности. Данные измерений содержания приземного озона выражаются обычно в единицах парциального давления или отношения смеси (либо по массе, либо по объему).

Общее содержание озона – это общее количество озона, содержащееся в вертикальном столбе атмосферы над поверхностью, протяжённостью от земной поверхности до верхней кромки атмосферы. Для обозначения общего содержания озона обычно используются такие единицы, как a) толщина столба слоя чистого озона при нормальных давлении и температуре и b) приведенная толща озона (количество молекул на площадь).

1 См. http://ozone.unep.org/pdfs/Montreal-Protocol2000.pdf.

Вертикальное распределение озона отражает концентрацию озона как функцию высоты или давления окружающего воздуха. Количество озона на каждой высоте или изобарической поверхности в атмосфере выражают обычно в виде парциального давления, отношения смеси или локальной концентрации (плотности числа частиц). Интеграл профиля озона от поверхности Земли до верхней точки атмосферы представляет собой общее количество озона в столбе.

Ниже приводятся определения других понятий, часто используемых в настоящем контексте.

Аэрозоли: находящаяся в газообразной среде взвесь твердых, жидких или твердых и жидких частиц.

Относительная оптическая воздушная масса: отношение наклонного пути солнечной радиации сквозь атмосферу (или слой) к вертикальному.

Единица Добсона (Д. Е.): мера общего содержания озона, эквивалентная слою чистого озона толщиной 10^{-5} м при нормальных давлении и температуре (эта единица часто используется, однако не является единицей СИ).

Миллиатмосантиметр: мера общего содержания озона, равная 10^{-3} см чистого озона при нормальных давлении и температуре (1 миллиатмосантиметр эквивалентен 1 Д. Е.).

Озон: газообразное нестабильное аллотропическое соединение кислорода голубого цвета, сильный окислитель. Селективно поглощает излучение в УФ области спектра (100–340 нм), в видимой (550–650 нм) и в инфракрасной (4 700, 9 600 и 14 100 нм) областях спектра.

Спектрофотометр: прибор для восстановления спектра и измерения спектрального излучения на выбранных длинах волн.

Ультрафиолетовое излучение (УФ): электромагнитное излучение в диапазоне 100–400 нм, которое зачастую подразделяется на УФ-А (315–400 нм), УФ-В (280–315 нм) и УФ-С (100–280 нм).

Umkehr-метод (метод обращения): Оптический эффект, проявляющийся в момент приближения восхода или заката, когда наблюдается повышение уровня относительного излучения неба в зените при увеличении солнечного зенитного угла. Вертикальное распределение озона определяется путём проведения ряда зенитных замеров на определённых длинах УФ волн при помощи спектрофотометров. Такие наземные измерения проводятся исключительно в условиях ясного неба.

16.1.2 Единицы измерения

Полное описание единиц измерения приведено в приложении 16.А, а кратко они представлены в таблице 16.1.

Таблица 16.1. Сводные данные о применяемых единицах измерения озона

Локальный озон	*Единицы измерения*	*Содержание озона в столбе воздуха*	*Единицы измерения*
Парциальное давление	Мили-паскаль	Общее содержание озона	матм-см 10^{-3} см озона при нормальных давлении и температуре Д. Е.
Отношение смеси по массе	мкг · $г^{-1}$		
Отношение смеси по объему	$млн^{-1}$ по объему		
Локальная концентрация	молекул · $см^{-3}$ молекул · $м^{-3}$	Приведенная толщина озона на заданном уровне	матм-см · $км^{-1}$
Локальная плотность	г · $м^{-3}$ мкг · $см^{-3}$		

Примечание: В честь фундаментальной работы Г. М. Б. Добсона единица измерения содержания озона в вертикальном столбе (общее содержание озона) миллиатмосантиметр (матм-см) может также быть названа единицей Добсона (Д. Е.). Одна единица Добсона соответствует количеству озона в вертикальном столбе, которое, будучи приведено к температуре 0 °C и давлению 10 1325 Па, образует слой толщиной 10^{-5} м.

16.1.3 Методы измерений

Атмосферный озон измеряют посредством дистанционного зондирования и контактными методами. Контактные методы предполагают анализ пробы воздуха с целью определения содержания озона с помощью оптических, химических или электрохимических методов. Измерения с помощью дистанционного зондирования проводятся с применением методов дифференциального поглощения. Для озона характерно сильное поглощение в ультрафиолетовой (УФ) области спектра с длинами волн менее 340 нм, более слабое поглощение в широком спектре на длине волны около 600 нм в видимой области спектра и много линий поглощения и теплового излучения в инфракрасной области спектра и в микроволновом диапазоне. Измеряя спектральную плотность потока излучения от естественного (Солнца) или искусственного источника после того, как излучение прошло через атмосферный озон,

можно определить количество озона на оптическом пути. Содержание озона измеряется также путем измерения его теплового излучения.

Точность практически всех видов обычных измерений озона зависит от наличия ошибок в данных о спектре поглощения озона. Все приземные и наземные измерения общего содержания озона зависят от коэффициента поглощения озона (α) используемой длины волны (в уравнении 16.1 и 16.2). Данные измерений профиля озона по методу обращения и при помощи озонозондов нормализуются почти до совпадения с данными наземных измерений общего содержания озона. Коэффициенты поглощения используются в алгоритмах преобразования для проводимых с помощью лидара и спутников измерений общего содержания озона и профиля озона.

Несколькими группами специалистов были предприняты значительные усилия по измерению спектра поглощения озона в лабораторных условиях. Измерения проводились в широком диапазоне температур, поскольку поглощение сильно зависит от температуры. Международная комиссия по озону Международной ассоциации метеорологии и физики атмосферы (МАМФА) (http://www.esrl.noaa.gov/gmd) рекомендовала (Megie, Miller and Bojkov, 1991), а ВМО утвердила со вступлением в силу с 1 января 1992 г. эталонный спектр озона, основанный на измерениях, представленных в работе Bass and Paur (1985). Данный спектр поглощения пришёл на смену коэффициентам поглощения озона Вигру, применяемым ранее для измерения содержания озона (IAMAP, 1967). Поскольку спектры поглощения зависят от температуры, были проведены дополнительные исследования, например Molina and Molina (1986), Brion and others (1993) и Burrows and others (1999), для того, чтобы установить каким образом поглощение зависит от температуры. При осуществлении сравнительного анализа данных, полученных в результате проведения наблюдений за озоном посредством нескольких приборов, необходимо использовать один и тот же спектр поглощения. Существуют и другие источники ошибок при измерении озона, которые зависят от того, что именно измеряется и какой метод измерений используется. Эти источники ошибок рассматриваются ниже.

16.2 ИЗМЕРЕНИЯ ПРИЗЕМНОГО ОЗОНА

16.2.1 Приборы для измерения приземного озона

Приземный озон на регулярной основе измеряется анализаторами озона, которые определяют концентрацию озона в окружающем воздухе контактным методом. Наиболее часто для измерений приземного озона используется такой прибор, как ультрафиолетовый фотометрический анализатор озона. Этот прибор измеряет содержание озона на основе фотометрии поглощения УФ-излучения в узком интервале длин волн (≈ 0,5–1 нм) на спектральной линии 254 нм. В повседневной практике ранее также применялись сухой химический анализатор (основанный на методе хемилюминесценции) и влажный химический анализатор; однако в настоящее время их используют все реже, поскольку эти методы не столь надежны, как метод поглощения УФ-излучения. Метод фотометрии поглощения УФ-излучения рекомендуется к применению ВМО и Научной консультативной группой по химически активным газам Глобальной службы атмосферы (ГСА). Техническая информация относительно контрольно-измерительных приборов для измерений озона в окружающем воздухе приведена в работе Paur and McElroy (1979). Был проведен ряд взаимных сравнений приборов для измерения приземного озона (Attmannspacher and Hartmannsgruber, 1982; Klausen and others, 2003).

16.2.2 Измерение приземного озона методом УФ-фотометрии

Регулярные измерения приземного содержания озона проводятся с помощью контактных технических средств. Чаще всего применяется метод УФ-фотометрии, при котором окружающий воздух прогоняется через камеру, в которой измеряется поглощение ультрафиолетового излучения на эмиссионной линии ртутной лампы в 254 нм. Сильное поглощение озоном именно на этой длине волны позволяет обнаружить и измерить поглощение в случае, когда в камере присутствует озон. В камеру поглощения поочередно попадают пробы окружающего воздуха, приходящего непосредственно из атмосферы, и окружающего воздуха, прошедшего через газопромыватель с диоксидом марганца, который каталитически преобразует озон в кислород, не затрагивая при этом все остальные газовые составляющие и практически не изменяя уровень относительной влажности. Таким образом, интенсивность ультрафиолетового излучения измеряется как при наличии озона в окружающем воздухе, так и при его отсутствии. Измеренные значения интенсивности излучения при наличии озона (I) и при его отсутствии (I0) соотносятся следующим образом:

$$I = I_0 \exp(-\alpha CL) \qquad (16.1)$$

где α – сечение поглощения озона на спектральной линии 254 нм (см^2), C – содержание озона в камере (число молекул на см$^{-3}$), L – длина камеры (см). Сравнивая два значения интенсивности излучения,

можно определить содержание озона в камере при условии, что известны длина камеры и сечение поглощения озона. Данные измерений содержания озона представляются в единицах млрд$^{-1}$ по объему или в виде парциального давления. Диапазон обнаружения составляет от 1 млрд$^{-1}$ до 1 000 млрд$^{-1}$ по объему.

16.2.3 Установка приборов для измерения приземного озона

Приборы, используемые для контактного измерения приземного озона, устанавливают обычно в лабораторном помещении; при этом окружающий воздух закачивается в анализатор через чистую тефлоновую трубку. Воздухозаборное устройство этой трубки монтируется таким образом, чтобы пробы воздуха были представительными для местной атмосферы. Воздухозаборное устройство следует размещать на высоте по меньшей мере 3 м над землей (обычно на плоской крыше). Впускное отверстие должно быть повернуто и защищено раструбом таким образом, чтобы предотвратить забор дождевой воды и свести к минимуму всасывание частиц и грязи. Следует избегать наличия поблизости любых потенциальных источников возмущения состава местной атмосферы (например, шоссейных дорог, дымовых труб, вентиляторных устройств и им подобных источников). На впускном отверстии следует устанавливать тефлоновый фильтр частиц, который предотвращал бы загрязнение переходной трубки частицами и грязью; этот фильтр следует заменять по мере необходимости (примерно один раз в неделю в зависимости от атмосферных условий). Пропускающая воздух трубка должна содержаться в чистоте и быть как можно короче, для того чтобы озон не разрушался до того, как его содержание будет измерено. В рамках компромисса между большой высотой, на которой должно находиться воздухозаборное устройство, и короткой трубкой длина этой трубки должна составлять примерно 3–5 м.

В том случае, когда необходимо измерять фоновые (при отсутствии загрязнений) значения приземного озона, следует выбирать место вдали от крупных источников загрязнения (городов). Станции должны удовлетворять критериям региональных и/или глобальных станций ГСА, как это определено в публикации ВМО (1988) и одобрено сорок четвертой сессией Исполнительного совета, проходившей в июне–июле 1992 г. (ВМО, 1993).

16.2.4 Погрешности при измерении приземного озона

Основным источником погрешностей при всех контактных методах измерений приземного озона с помощью анализаторов озона является потеря озона при прохождении воздуха через всасывающую трубку и фильтр частиц. Эта погрешность может быть значительно уменьшена, если поддерживать трубку и фильтр частиц в сухом чистом состоянии.

Некоторые другие малые газовые составляющие поглощают излучение с длиной волны 254 нм, которая используется для измерения поглощения озоном. Дифференциальные методы сопоставления окружающего воздуха, содержащего озон, с воздухом, из которого озон устранен, позволяют избежать проблемы поглощения другими газами, поскольку эти газы присутствуют и при том, и при другом измерении. Однако в случае, когда содержание другого газа изменяется в период между отбором пробы с озоном и отбором пробы без озона, результат измерений озона может быть ошибочным. Кроме того, на точность измерений содержания озона влияет неполное удаление озона, происходящее из-за неисправности газопромывателя.

В целом измерения озона с помощью метода УФ-фотометрии чрезвычайно стабильны, поскольку это относительные измерения (сравнение поглощения в камере, содержащей озон, с поглощением в камере без озона). Мощность излучения лампы и чувствительность детектора могут испытывать дрейф, не оказывая при этом негативного влияния на измерение поглощения озона. Оценка неопределённости и уровня погрешности данных, получаемых в результате проведения измерений приземного озона методом поглощения УФ-излучения, дана в работе Klausen and others (2003).

16.2.5 Сравнение, калибровка и обслуживание приборов для измерения приземного озона

УФ-фотометрические приборы являются признанными абсолютными приборами. Абсолютная калибровка фотометрического анализатора УФ-излучения зависит от точности значения сечения поглощения озона на длине волны 254 нм. Это измерение производится путем определения поглощения в камере, содержащей известное количество озона. Количество озона в камере должно определяться посредством химического или физического процесса, который позволяет подсчитать число молекул озона в камере. Такие методы измерения абсолютного содержания включают пропускание озона сквозь раствор йодистого калия, титрование озона с помощью окиси азота и измерение изменения давления по мере того, как кислород преобразуется в озон. Сечение поглощения озона оценивается с точностью до ±5 %.

Измерения с помощью УФ-фотометрии также признаны в качестве надежного метода первичной

калибровки применяемых на сети приборов. Мировым эталоном для контактного измерения озона является стандартный эталонный фотометр (СЭФ) функционирование которого обеспечивается Национальным институтом стандартов и технологий и Международным бюро мер и весов. Приборы переходного эталона калибруются по СЭФ. После этого применяемый на сети прибор взаимосравнивается с прибором переходного эталона, для чего осуществляется измерение озона в пробе (полученной либо в лаборатории, либо из окружающего воздуха) сначала применяемым на сети прибором, а затем прибором переходного эталона (Klausen and others, 2003).

16.3 ИЗМЕРЕНИЯ ОБЩЕГО СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА

16.3.1 Методы измерения общего содержания озона

Общее содержание озона измеряется с помощью дистанционного зондирования с использованием наземных и спутниковых приборов, которые измеряют интенсивность излучения на УФ участке спектра поглощения озоном между 300 и 340 нм. Общее содержание озона измеряется с земли посредством измерения прямого солнечного, лунного излучения и излучения неба в зените, а из космоса – путем измерения солнечного УФ-излучения, рассеиваемого атмосферой земного шара обратно в космос. В данном разделе приведены описания основных методик осуществления наземных измерений. В силу исключительной сложности технологий проведения наблюдений из космоса и по причине направленности этих технологий на выполнение индивидуальной программы того или иного спутника, в разделе 16.6 представлена лишь общая характеристика наблюдений из космоса.

16.3.2 Наземные приборы для измерения общего содержания озона

Для определения общего содержания озона методом дифференциальной оптической абсорбционной спектроскопии (ДОАС) могут применяться наземные приборы дистанционного зондирования, которые измеряют интенсивность излучения в УФ диапазоне на длинах волн, соответствующих спектру поглощения озона. Наиболее часто в сети наблюдений за озоном программы ГСА ВМО используются следующие наземные приборы: озонные спектрофотометры Добсона (Dobson, 1957; WMO, 1980) и Брюера (Kerr, McElroy and Olafson, 1980; Wardle and others, 1987) и фильтровый озонометр М-124 (Gushchin, Sokolenko and Kovalyev, 1985). Были разработаны и другие измерительные приборы, однако их использование ограничивается экспериментальным применением, а для регулярного мониторинга и сообщения данных они не используются.

16.3.2.1 Измерения прямого солнечного излучения

Самый точный и хорошо разработанный метод определения общего содержания озона заключается в измерении с земли прямого солнечного излучения в УФ-диапазоне на длинах волн 305–340 нм. Этот метод основан на законе Ламберта-Бера, который определяет спектральную энергетическую освещенность прямого солнечного излучения $I_{0\lambda}$, достигающую поверхности Земли на длине волны λ после ослабления при прохождении через столб определённой атмосферной составляющей X_i:

$$I_\lambda = I_{o\lambda} e^{-\sum \alpha_{\lambda i} X_i \mu_i} \qquad (16.2)$$

где $I_{0\lambda}$ – константа, определяемая как показание I_λ прибора, если он находится выше атмосферы (внеатмосферная константа), $\alpha_{\lambda i}$ – измеренный в лаборатории коэффициент поглощения ослабляющего вещества, а μ_i – отношение наклонного пути луча при прохождении через слои поглощающего или рассеивающего вещества к вертикальному пути (относительная оптическая воздушная масса). При проведении измерений спектральной плотности потока I_λ при помощи спектрофотометра на нескольких длинах волн λ_i с различными показателями поглощения озоном, воздействие прочих атмосферных ослабляющих элементов (в основном аэрозолей) можно устранить при помощи линейных комбинаций уравнения 16.2. Общее отношение, применяемое для вычисления общего содержания озона путём измерения прямого солнечного излучения X_{DS} можно выразить (см. Приложение 16.B) следующим образом:

$$X_{DS} = \frac{F_0 - F - \beta m}{\alpha \mu} \qquad (16.3)$$

где F – комбинация log $(I_{\lambda i})$, F_0 – комбинация log $(I_{0\lambda i})$, приборные константы α и β – коэффициенты дифференциального поглощения и рассеяния озоном в чистом воздухе, μm – показатели относительной оптической воздушной массы озонового слоя и всей атмосферы соответственно. В уравнении 16.3, значение F получено в результате проведения измерений при помощи прибора, F_0 – константа калибровки спектрофотометра, α и β – значения, определённые в лабораторных условиях, а значение μm вычисляется для времени и географического местоположения измерений на основании астрономических

соотношений. Измерения прямого солнечного излучения ограничены только дневными часами и периодами, когда его распространению не препятствуют облака либо прочие преграды по меньшей мере в течение 2 (для прибора Добсона) либо 5 (для прибора Брюера) минут. Значения солнечного зенитного угла, подходящие для проведения измерений, отличаются в зависимости от вида спектрофотометра и длин волн, используемых при проведении измерений, однако обычно они не превышают 72° для приборов Добсона и фильтровых приборов М-124, а также 75° для спектрофотометра Брюера. Спектрофотометр Брюера регистрирует значения спектральной плотности потока (методом фотоотсчёта) на пяти используемых длинах волн (306,3, 310,1, 313,5, 316,8 и 320,1 нм), тогда как спектрофотометр Добсона измеряет относительные показатели спектральной плотности потока на трёх парах длин волн (A: 305,5/325,4; C: 311,5/332,4; D: 317,6/339,8 нм). Фильтровый прибор М-124 производит измерения на длинах волн 302 и 326 нм при спектральной полосе пропускания 20 нм. Детальная информация о модификации отношения (уравнение 16.3) для приборов того или иного типа и их использовании для обработки результатов измерений общего содержания озона можно найти в исследованиях, указанных в разделе 16.3.2, или в соответствующей публикации ГСА (WMO, 2003).

Спектрофотометр Брюера измеряет интенсивность УФ-излучения на нескольких длинах волн, что позволяет вычислить значение общего количества двуокиси серы в вертикальном столбе атмосферы при помощи уравнения, подобного уравнению 16.3. Соответствующее уравнение выводится на основании прочих линейных комбинаций коэффициентов дифференциального поглощения и рассеяния, а также спектральной плотности потока I_i. Для осуществления обработки данных общего количества двуокиси серы, полученных в результате измерений, при калибровке прибора должна быть задана внеатмосферная константа для двуокиси серы.

16.3.2.2 Измерения прямого излучения Луны

Общее содержание озона также измеряется при помощи метода измерения прямого излучения Луны, когда отражённое Луной солнечное излучение используется в качестве источника УФ-излучения. Этот метод аналогичен в принципе методу измерения прямого солнечного излучения, однако менее точен из-за меньшего количества поступающей УФ-радиации и из-за трудностей при проведении измерений. Период измерения ограничен пятью сутками полной Луны, и полный охват на основе ежедневных измерений невозможен. Кроме того, на пути прямого излучения Луны не должны находиться облака, а истинное зенитное расстояние Луны должно быть меньше 75°. Измерение прямого излучения Луны, возможно, целесообразно проводить при полярной ночи. Тем не менее, данный метод не нашёл широкого применения на станциях ГСА.

16.3.2.3 Измерения излучения неба в зените

Метод измерения излучения неба в зените был разработан для того, чтобы иметь возможность продолжать проводить ежедневные измерения общего содержания озона в те дни, когда Солнце закрыто облаками. Полученные эмпирическим путем данные свидетельствуют о том, что информативность УФ-излучения, рассеиваемого небом в зените на поверхность земного шара, достаточна для обеспечения обоснованных данных измерений общего содержания озона. Измерения относительного значения УФ-излучения на группе длин волн зависит от общего количества озона и от значения μ. В случае наличия значительного ряда данных, полученных в результате проведения практически одновременных наблюдений (исчисляемых сотнями) за излучением неба в зените и прямым солнечным излучением, значения общего содержания озона по прямому солнечному излучению могут быть использованы для выведения эмпирической функции регрессии $f(F,\mu)$, позволяющей вычислить значение общего содержания озона по излучению неба в зените X_{ZS} следующим образом:

$$X_{ZS} = f(F,\mu) \qquad (16.4)$$

Статистические функции $f(F,\mu)$ являются полиномами множественной регрессии (полиномами зенитного атмосферного поглощения) и применяются вместо ранее использовавшихся расчётных таблиц. Измерения излучения неба в зените ограничены дневными часами, когда значение солнечного зенитного угла не превышает 80°. Они не так точны, как измерения прямого солнечного излучения, поскольку путь рассеянного света через атмосферу и озоновый слой более длинен и его ослабление зависит от других переменных, таких как вертикальное распределение озона и присутствие облаков. При использовании этого метода результаты измерения излучения неба в зените в течение длительного времени приводятся к результатам измерения прямого солнечного излучения. Учитывая, что значения общего содержания озона, полученные в результате измерений, проведенных при условиях, позволяющих осуществить практически одновременные измерения излучения неба в зените и прямого солнечного излучения, могут отличаться от значений общего содержания озона, полученных в результате измерений, проведенных в условиях, благоприятствующих проведению лишь измерений излучения неба в зените (особенно при закрытом тучами зените), точность результатов измерений излучения неба в зените ещё более снижается.

16.3.3 Установка приборов для измерения общего содержания озона

Наземные приборы дистанционного зондирования для измерения озона в стратосфере следует устанавливать в соответствии с требованиями к их полю обзора. В общем, требуется пункт наблюдения с четким обзором Солнца и неба в зените. Следует избегать мест поблизости от источников местного загрязнения или других видов загрязнения, которые могут негативно повлиять на оптические свойства местной атмосферы в УФ-области (в основном таковыми являются аэрозоли и двуокись серы). Спектрофотометры всех типов должны быть оснащены внешними системами подсушки либо встроенными механизмами влагопоглощения для постоянного поддержания компонентов оптических систем и электронных устройств приборов в сухом состоянии. Во избежание резких изменений чувствительности и перепадов настроек спектрофотометров в процессе проведения измерений, пользоваться спектрофотометрами необходимо при стабильных температурных условиях. По этой причине приборы Добсона должны быть снабжены изолирующими покрывалами.

Приборы Добсона и М-124 следует хранить в помещении и выносить наружу для проведения измерений при наличии прямой солнечной радиации или излучения неба в зените. В некоторых обсерваториях эти приборы не приходится выносить наружу, поскольку в крыше или куполе обсерватории имеется люк, который открывается для проведения измерений. Полностью автоматизированный прибор Брюера устанавливается на постоянное место на открытом пространстве, где обеспечивается хороший обзор Солнца при угле возвышения над горизонтом более 15° во все дни года. Этот прибор регулируется по уровню, и его система ориентации соотносится с Солнцем, с тем, чтобы он был всегда автоматически направлен на Солнце. Каждый спектрофотометр также оборудован встроенной системой нагрева.

16.3.4 Погрешности, возникающие при измерении общего содержания озона

Уравнение 16.3 является фундаментальной физической основой для измерений общего содержания озона методом прямого солнечного излучения. Некоторые погрешности, возникающие при измерении, рассмотрены ниже на основе анализа погрешностей отдельных членов данного уравнения. Детальное описание и пояснение для спектрофотометра Добсона приведено в работе WMO (1982*a*).

Внеатмосферная константа F_0

F_0 – это показание, получаемое прибором, если он помещен на пути распространения солнечного излучения за пределами атмосферы Земли, при полном отсутствии озона на этом пути. Это значение не измеряется прямым образом; оно определяется либо на основе некоторого ряда измерений в достаточно большом диапазоне озонных масс путем экстраполяции (абсолютная калибровка либо метод диаграмм Лэнгли), либо путем калибровки прибора в сравнении с эталоном с известным F_0 (см. разделы 16.3.5.1 и 16.3.5.2). Ошибки в значениях F_0 конкретного спектрофотометра могут возникать из-за погрешности в первоначальной калибровке в сравнении с эталоном или в результате изменения (в виде постепенного дрейфа или резкого скачка) оптических свойств этого прибора. Результаты измерений, полученные в ходе проведения кампаний по калибровке приборов и накопленные за длительный период времени, свидетельствуют о том, что ошибки измерений, связанные с погрешностями первоначальной калибровки (установление значения F_0 путём сравнения с эталоном в самом начале кампании до проведения каких-либо работ), как правило, не превышают 1,0 %. При обслуживании и использовании спектрофотометров Добсона и Брюера в соответствии с установленными для них стандартными правилами эксплуатации (см. раздел 16.3.5.2) смещение точности, связанное с их естественным старением, как правило, составляет менее 2,0 % за четырёхлетний период (Vanicek, 2003; Evans and others, 2004*a*; Lamb, 2004; Köhler, 2004). Однако ошибки в значениях F_0, обусловленные резким изменением технического состояния прибора (например, повреждение, смещение центровки оптики, быстрый износ фотоэлектронного элемента или фильтров), могут привести к ошибкам в измерениях до 10 % и выше. Изменчивость спектра излучения Солнца также может привести к возникновению ошибок определения F_0. Считается, что ошибки, обусловленные изменчивостью солнечного излучения, не превышают 0,3 % (WMO, 1982*b*; 1990). Эти ошибки оказывают влияние на уровень точности полученных значений содержания озона. Подобные изменения зачастую выявляются путём ежемесячного проведения проверок эталонной лампой (см. раздел 16.3.5.2).

Дифференциальное спектральное значение F

При считывании приборами показаний значения F случаются инструментальные ошибки. Один потенциальный источник погрешностей заключается в нелинейности реакции прибора. В случае использования прибора Добсона нелинейность неизбежно возникает

в основном из-за наличия неоднородностей в оптических клиньях прибора. Причиной возникновения нелинейности прибора Брюера может быть установка неверного «мертвого времени» фотоумножителя системы, работающей в режиме счета фотонов. Оба эти эффекта можно откорректировать при помощи мер калибровки. Эта погрешность обычно составляет менее 0,3 % для прибора Брюера и менее 0,5 % (WMO, 1982*a*) для прибора Добсона. Такие ошибки оказывают влияние на точность и прецизионность полученных значений содержания озона. Причиной возникновения ошибки в измеренном значении F может также служить случайная погрешность (шум) основного измеряемого сигнала. Эта ошибка как для прибора Брюера, так и для прибора Добсона составляет, по оценочным данным, менее 0,3 % при типичном измерении прямого солнечного излучения.

Относительная оптическая воздушная масса озонового слоя μ

Еще одним источником погрешностей при определении общего содержания озона является значение оптической воздушной массы озонового слоя (μ). Это значение рассчитывается на основе данных о дате и времени проведения измерений и географических координатах (широта, долгота, высота) размещения конкретного прибора. Ошибки в 1′ широты или долготы или в 10 с в сроке измерения могут (в определённые периоды года) привести в результате к возникновению ошибки в значении μ, равной 0,1 %. При расчетах значения μ предполагается, что оптический центр слоя озона располагается на высоте 22 км над станцией. Отклонение на 2 км по высоте от этого предполагаемого значения может привести в результате к ошибке в значении μ, равной 0,25 % и, как следствие, к ошибке до 2 % в значении общего содержания озона для $\mu > 3{,}2$. Поэтому для достижения наилучших результатов измерений рекомендуется использовать временно́е разрешение в 10 с для показаний значения F, а вычисления значения μ должны включать в себя географическую аппроксимацию высоты слоя озона. Это особенно важно учитывать при проведении измерений общего содержания озона в высоких широтах, где наблюдения осуществляются при малых значениях солнечного зенитного угла.

Коэффициент поглощения озона α

Погрешность определения коэффициента дифференциального поглощения α в уравнении 16.3 обусловлена для каждого конкретного прибора погрешностью функций пропускания излучения через щель прибора. Предполагается, что использующиеся в глобальной сети ГСА спектрофотометры имеют такие же аппаратные функции, что и приборы мирового эталона, если результаты их аппаратных тестов находятся в пределах допустимых значений, установленных разработчиками приборов (Dobson 1957; SCITEC, 1993). На самом же деле данное предположение не совсем соответствует действительности и действительные длины волн, которые избирает щель прибора, могут отличаться от предполагаемых. Чрезвычайно трудно определить правильные коэффициенты поглощения для спектрофотометров Добсона, поскольку для этого требуется проведение очень сложных лабораторных исследований и корректировок приборов. Выявление эффективных длин волн и определение значений коэффициента поглощения озона для спектрофотометра Брюера осуществляется путём «дисперсионного теста», который можно провести в рамках регулярной калибровки на станции. Как указывается в разделе 16.1.3, 1 января 1992 года новый ряд коэффициентов поглощения озона, основанных на измерениях Bass-Paur, был утверждён в качестве новой международной эталонной шкалы. Дополнительная ошибка в значениях коэффициента поглощения излучения озоном возникает вследствие его зависимости от температуры. Это имеет особо важное значение для коэффициентов поглощения спектрофотометров Добсона, которые были заданы для репрезентативной стратосферной температуры –46,3 °C (Komhyr, Mateer and Hudson, 1993). Поскольку действительная температура слоя озона (определяемая на основании вертикального распределения озона, взвешенного по вертикальному профилю температуры) нестабильна в зависимости от широты и времени года, значения коэффициента дифференциального поглощения могут отличаться примерно на 1,2 % на 10 K для эталонной комбинации длин волн AD[2] (Kerr, Asbridge and Evans, 1988). Такое влияние температуры может привести к возникновению дополнительной ошибки в значениях общего содержания озона, составляющей, по оценочным данным, 1–1,5 % (Köhler, 1999; Vanicek, Stanek and Dubrovsky, 2003; WMO, 2003). Поскольку в приборе Брюера используются такие сочетания длин волн, при которых значения коэффициентов поглощения атмосферного озона не зависят от стратосферной температуры (Kerr, 2002), следует считать, что точность измерений прибора Брюера выше точности измерений прибора Добсона.

Другие поглощающие газы и аэрозоли

Поглощение УФ-излучения другими атмосферными газами также способно оказывать влияние на

2 AD – это разность между поглощением на парах длин волн, которые обычно используются для измерения общего содержания озона. Длины волн (нм) составляют: A: 305,5/325,4; D: 317,6/339,8.

точность результатов измерений общего содержания озона. Установлено, что, в частности, двуокись серы является одним из значительных факторов, способствующих появлению ошибок в измерениях. Как правило, такая погрешность составляет 1 % для измерений, проводимых при помощи прибора Добсона в незагрязнённых местах (Kerr, Asbridge and Evans, 1988). Однако в регионах с локальными выбросами большого количества двуокиси серы (либо в ситуации инверсии) такая погрешность может достигать примерно 10 % значения содержания озона в атмосферном столбе (DeMuer and DeBacker, 1992; Vanicek, Stanek and Dubrovsky, 2003). Как указано в разделе 16.3.2.1, общее содержание двуокиси серы в вертикальном столбе атмосферы можно измерить при помощи прибора Брюера в том случае, если для него была задана внеатмосферная константа. Это позволяет устранить влияние двуокиси серы на точность значений общего содержания озона, полученных в результате измерений. Влияние аэрозолей практически сведено на нет с появлением технологического метода измерения прямого солнечного излучения (см. Приложение 16.B), а вызванная ими погрешность в значениях общего содержания озона, по оценочным данным, составляет менее 1 %. Таков же и процент погрешности вызванной тонкими перистыми облаками.

Измерения излучения неба в зените

Значение общего содержания озона может быть также установлено путём измерения поступающего с неба рассеянного солнечного излучения при помощи трёх основных типов приборов, применяющихся в сети ГСА по наблюдению за озоном (прибор Добсона, Брюера и фильтровый прибор М-124). Точность и прецизионность результатов таких измерений зависят от калибровки инструмента, качества полиномов зенитного атмосферного поглощения $f(F,\mu)$ в уравнении 16.4 и действительного состояния неба во время проведения наблюдений. В то время, как при эксплуатации прибора Добсона и фильтровых приборов в ручном режиме, оператор имеет возможность задать определённое состояние неба, после чего применить полином «ясное небо в зените» либо полином «облачность в зените», результаты зенитных измерений, полученных посредством прибора Брюера, можно обработать лишь при помощи общего полинома «небо в зените». Принимая во внимание тот факт, что результаты измерений излучения неба в зените сдвигаются к результатам измерений прямого солнечного излучения до их полного совпадения в долгосрочной перспективе, точность измерений излучения неба в зените в лучшем случае равна точности измерений прямого солнечного излучения.

Прецизионность результатов измерений излучения неба в зените, как правило, определяется путём сравнения результатов общего содержания озона, полученных в течение 10 минут или более длительного периода времени в результате почти одновременного проведения измерений прямого солнечного излучения и излучения неба в зените. В некоторых исследованиях (DeBacker, 1998; Vanicek, Stanek and Dubrovsky, 2003) приводится значение прецизионности измерений, полученных при помощи прибора Добсона, в размере 1,5 % для измерений, проводимых в условиях ясного неба в зените, и примерно 3 % для измерений, проводимых в условиях зенитной облачности с учётом непроницаемости облаков. Более значительный разброс в результатах измерений прямого солнечного излучения наблюдается при проведении измерений спектрофотометром Брюера и, как правило, значение прецизионности результатов измерений, полученных при всех типах небесного состояния (за исключением тяжёлых туч) способно достигать 3 %. Точность фильтрового прибора М-124 составляет примерно 4 % для измерений в условиях ясного неба и до 6 % для измерений в условиях облачности при значительно большем разбросе значений погрешности результатов конкретных измерений (Gushchin, Sokolenko and Kovalyev, 1985; Feister, 1991). Тем не менее, для достижения вышеуказанных уровней точности необходимо применять полиномы зенитного атмосферного поглощения, разработанные для конкретных прибора и станции, учитывая, что значения $f(F,\mu)$ зависят, в основном, от уровней внешнего и внутреннего рассеянного УФ-излучения, попадающего на фотодатчик прибора. Более высокая и стабильная точность результатов измерений излучения неба в зените достигается в средних и высоких широтах посредством применения полиномов зенитного атмосферного поглощения, созданных и применяемых отдельно для летнего и зимнего сезонов (Asbridge, Vanicek and Stanek, 1998).

16.3.5 Сравнение, калибровка и обслуживание приборов для измерения общего содержания озона

16.3.5.1 Калибровка приборов, являющихся первичным эталоном и шкалы калибровки

Калибровка полевого прибора проводится с прослеживанием, в конечном итоге, до образцового эталона. Образцовым прибором Добсона является признанный ВМО мировой первичный спектрофотометр Добсона (МПСД) № 83, который установлен в Отделении глобального мониторинга Научной лаборатории по изучению системы Земля (ЕСРЛ)

Национального управления по исследованию океана и атмосферы (НУОА) в Боулдере, Колорадо (Komhyr, Grass and Leonard, 1989). Образцовый прибор Брюера состоит из трёх первичных эталонных приборов (B008, B014 и B015). Этот тройной эталон Брюера содержится, в качестве группы международных эталонов ВМО, Метеорологической службой Канады (прежнее название Служба атмосферной среды) в Торонто, Канада (Kerr, McElroy and Wardle, 1998). Все полевые озонометры M-124 сверяются со спектрофотометром Добсона D108, который находится в Главной геофизической обсерватории им. Воейкова (ГГО) в Санкт-Петербурге, Российская Федерация (Bojkov, Fioletov and Shalamjansky, 1994). Важно отметить, что приборы мирового эталона Добсона и Брюера используются для калибровки одних и тех же видов спектрофотометров, применяющихся в глобальной сети. Таким образом, как МПСД, так и приборы тройного эталона Брюера устанавливают собственные отдельные шкалы калибровки, которые переносятся на применяемые на станциях приборы (см. раздел 16.3.5.2).

Спектрофотометры мирового эталона калибруются на основании сложного метода диаграмм Лэнгли, иногда также называемого «абсолютной калибровкой». В основе этого метода – определение значения внеатмосферной константы F_0 из уравнения 16.3, которое можно переформулировать следующим образом: $F + \beta m$

$$F + \beta m = F_0 - \alpha X_{DS} \mu \qquad (16.5)$$

Где α и β – константы. При наличии определённых атмосферных условий (практически неизменное общее содержание озона, ничтожно малое воздействие атмосферного аэрозоля, стабильное рэлеевское рассеяние воздухом солнечного излучения и абсолютно чистое небо в дни проведения измерений) при помощи эталонного прибора проводится ряд измерений значений $F + \beta m$ по прямому солнечному излучению в течение дня для различных значений μ. Затем результаты этих измерений наносятся на график против значений μ, а подбор прямой для экспериментальных точек на графике экстраполируется до $\mu = 0$ в целях определения значения F_0. Как правило, применяемое при калибровке значение – это средняя величина, полученная в результате проведения многодневных измерений, и уравнения преобразуются в целях выведения значения поправки для существующего значения калибровки. Необходимые особые атмосферные условия имеются лишь в нескольких обсерваториях в мире. По этой причине абсолютная калибровка приборов мирового эталона Добсона и Брюера осуществляется на регулярной основе в субтропических высокогорных условиях обсерватории НУОА Мауна-Лоа на Гавайях (19,5 °N 155,6 °W, на высоте 3 397 м). Как показывает анализ результатов абсолютной калибровки, в течение последних 20–25 лет устойчивость калибровки эталонных приборов поддерживалась с прецизионностью около 0,5 % (Evans and others, 2004*b*: Fioletov and others, 2004). Данная долгосрочная характеристика функционирования приборов составлена с учётом всех технических аспектов, способных повлиять на откалиброванность эталонных приборов, каковыми являются выбор действительных длин волн, чувствительность фотодетекции излучений, нелинейная ответная реакция электронных компонентов, старение оптических элементов, внутреннее рассеяние.

16.3.5.2 Переноска калибровки и обслуживание

Абсолютная калибровка, определенная для первичных образцовых приборов, должна быть перенесена на все полевые приборы; при этом калибровка каждого прибора должна тщательно поддерживаться.

Основным методом переноса шкалы калибровки первичного эталонного прибора Добсона на полевые приборы является метод одновременного проведения измерений общего содержания озона по прямому солнечному излучению с сопоставительным взаимосравнением полученных результатов. Такие измерения следует проводить по меньшей мере в течение половины одного дня при надлежащем диапазоне значений μ = 1,15–3,2 и хороших условиях наблюдений. Внеатмосферная константа полевого прибора корректируется, с тем чтобы обеспечить наилучшее соответствие значениям общего содержания озона, полученным образцовым прибором для значений AD по прямому солнечному излучению. Транспортировать все полевые приборы в то место, где находится первичный эталонный прибор, непрактично, и поэтому полевые инструменты обычно калибруются на региональных мероприятиях по взаимному сравнению приборов, в ходе которых собирают спектрофотометры определённого географического региона и калибруют их в сравнении с транспортируемым эталоном либо с региональным эталоном с непосредственной привязкой к МПСД D083. Вот уже около тридцати лет большинство спектрофотометров Добсона станций ГСА калибруются раз в четыре года на мероприятиях по взаимному сравнению, организуемых ВМО. Следующие спектрофотометры используются для проведения кампаний по калибровке: D065 из НУОА ЕСРЛ/ГМД (в качестве транспортируемого эталона) либо региональные эталоны из региональных центров калибровки приборов Добсона ВМО (D064, Хоенпайссенберг, Германия; D074, Градек Кралове, Чешская Республика; D089, Айрин, Южная Африка; D097, Буэнос-Айрес, Аргентина; D105, Перт, Австралия; и D116, Цукуба, Япония). Как показывают результаты взаимных сравнений, перенос шкалы калибровки Добсона с МПСД на станционные приборы

осуществляется с точностью в 1 %, согласно отчётам ВМО/ГСА (WMO, 1994; 2001*a*; 2002).

Константы калибровки переносятся на полевой прибор Брюера путем взаимного сравнения с вторичным транспортируемым эталоном раз в два года (согласно рекомендациям). И эталонный прибор, и полевой прибор производят измерения озона по прямому солнечному излучению одновременно в течение дня с хорошими условиями наблюдений по достаточному диапазону значений μ = 1,15–3,2. Значения коэффициента поглощения и внеатмосферной константы для конкретного полевого прибора определяются путем подгонки данных к значениям общего содержания озона, полученным в ходе измерений эталонным прибором, а также путём проведения проверок при помощи эталонной лампы. Калибровка вторичного транспортируемого эталона проверяется в Торонто перед его отправкой в место проведения измерений и после его возвращения оттуда с целью обеспечения неизменности калибровки, несмотря на транспортировку. За исключением приборов Брюера из Канады (МСК), большинство спектрофотометров Брюера глобальной сети калибруется коммерческим образом в соответствии со вторичным транспортируемым эталоном B017, принадлежащим частной компании International Ozone Service из Торонто. Прибор B017 привязан непосредственно к эталону Брюера с точностью 0,8 % и раз в один-два года проходит абсолютную калибровку в обсерватории Мауна-Лоа, подобно тройному эталону Брюера. Результаты взаимных сравнений приборов Брюера свидетельствуют о том, что прибор B017 переносит шкалу калибровки Брюера на размещённые на измерительных станциях приборы с точностью в 1 % (McElroy, Sevastiouk and Lamb, 2004). В целях укрепления системы Региональных центров ГСА по калибровке спектрофотометров Брюера, в 2003 году в обсерватории Изанья Национального метеорологического института Испании на Канарских островах был создан первый Региональный центр калибровки приборов Брюера для региона Региональной ассоциации VI (Европа).

Полевые озонометры M-124 проходят перекалибровку в среднем каждые два года путем прямого взаимного сравнения с прибором Добсона D108 в ГГО в г. Санкт-Петербург. Каждые два года приборы измерительных станций заменяются на недавно прокалиброванные озонометры и транспортируются на место калибровки, находящееся на территории ГГО, где данные измерений прямого солнечного излучения снимаются одновременно с них и со спектрофотометра Добсона D108. При этом показания прибора определяются как функция солнечного зенитного угла и общего содержания озона (как это измеряется прибором Добсона). Прокалиброванные таким образом приборы возвращаются затем в сеть измерительных приборов на других станциях. Таким образом, сеть озонометров M-124 поддерживается в пределах шкалы калибровки МПСД D083. Несмотря на то, что прибор D108 калибруется раз в четыре года с точностью в 1 %, оценочная точность переноса шкалы калибровки на сеть приборов M-124 равна примерно 3 % (Shalamyansky, 2003).

Для сохранения констант калибровки всех образцовых и полевых приборов необходимо проведение регулярных проверок естественным солнечным излучением и эталонными лампами. Эти проверки позволяют установить, правильно ли функционирует прибор, и в противном случае предупредить оператора о потенциальной проблеме. Результаты проверок используются по необходимости для коррекции калибровки прибора и помогают определить, требуется ли для конкретного прибора перекалибровка.

В случае прибора Добсона проверка калибровки регулировок длин волн и ответной реакции на эталонную относительную интенсивность излучения проводится раз в месяц. Регулировка длины волны производится и затем корректируется путем измерения эмиссионных линий излучения ртутной лампы. Ответная реакция прибора на относительную интенсивность излучения проверяется для всех трёх пар длин волн путем измерения мощности излучения кварцево-галогеновой лампы, которая является «эталонной» для этого конкретного прибора. Данные этого измерения используются для того, чтобы при необходимости скорректировать значение внеатмосферной константы конкретного прибора.

В случае прибора Брюера проверка регулировки длины волны, ответной реакции на уровне излучения и «мертвого времени» фотоумножителя должна проводиться ежедневно. Для калибровки и регулировки длин волн используются эмиссионные линии излучения ртутной лампы. Эмиссия встроенной кварцево-галогеновой лампы прибора используется для контроля за ответной реакцией прибора на излучение и для корректировки при необходимости его внеатмосферной константы. Линейность проверяется путем измерения «мертвого времени» фотоумножителя. Результаты вышеуказанных проверок регистрируются и используются для осуществления оперативной корректировки констант калибровки либо для проведения ретроспективной повторной обработки данных наблюдений.

16.3.5.3 Отличия между проведением измерений общего содержания озона прибором Добсона и прибором Брюера

Несмотря на то, что измерения общего содержания озона приборами Добсона и Брюера

проводятся на основании во многом схожих принципов ДОАС, в прочих аспектах они отличаются друг от друга (воздействие двуокиси серы, разные длины волн и, соответственно, разные коэффициенты поглощения озоном, а также, количество измерений в день). Кроме того, калибровочные шкалы для этих приборов, установленные соответствующими мировыми стандартами, определяются независимым образом, а их переноска на полевые спектрофотометры производится отличными друг от друга способами. Таким образом, возможны некоторые расхождения в данных действительного общего содержания озона, полученных посредством этих приборов. Примерно 75 приборов Добсона и 65 приборов Брюера регулярно использовались для поведения измерений общего содержания озона в глобальной сети ГСА в период с 1995 по 2004 год (http://www.woudc.org/). Однако лишь на немногих станциях проводились одновременные наблюдения с совместно размещённых спектрофотометров в целях выявления связи между рядами данных полученных с приборов Добсона и Брюера. В то время, как в некоторых исследованиях (Kerr, Asbridge and Evans, 1988; DeMuer and DeBacker, 1992) значительной разницы в результатах измерений не выявлено, недавно проведенный анализ долгосрочных рядов данных (Staehelin and others, 1998; Köhler, 1999; Vanicek, Stanek and Dubrovsky, 2003) показал наличие систематической сезонной зависимости, при которой разница данных, полученных с совместно размещённых, хорошо откалиброванных спектрофотометров (приборы Добсона калибруются (реже) приборов Брюера) составляет до 3–5 % в зимние месяцы, тогда как в летние месяцы результаты наблюдений совпадают. Причины для такой разницы можно суммировать следующим образом (Kerr, 2002; WMO, 2003):

(a) Более значительная температурная зависимость дифференциальных коэффициентов поглощения озона прибора Добсона;
(b) «Засветка» вызванная УФ-излучением внутри прибора;
(c) Разные углы зрения спектрофотометров, в результате чего влияние рассеянного атмосферного солнечного УФ-излучения изменяется;
(d) Влияние двуокиси серы на полученные при помощи прибора Добсона данные общего содержания озона в районе загрязнения;
(e) Разница в значениях μ, рассчитанных для высоких зенитных углов Солнца.

Исследования в области всех перечисленных факторов ещё не закончены. В этой связи на вышеуказанных станциях проводятся одновременные наблюдения.

16.4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОЗОНА

16.4.1 Приборы для определения вертикального распределения озона

Вертикальное распределение озона определяется с помощью озонозондов, лазерных локаторов (лидаров), наземных спектрометров и различных приборов спутникового базирования. Самые длинные ряды данных имеются для озонозондов. Озонозонд представляет собой анализатор озона, объединенный с радиозондом. Озонозонд измеряет концентрацию озона как функцию высоты путем забора проб окружающего воздуха в ходе подъема шара-зонда обычно до 30–35 км. В повседневной практике используются озонозонды Брюера–Маста и зонды с электрохимической ячейкой (Komhyr, 1986) или модифицированные варианты этих приборов (Komhyr, 1997). На измерительных станциях в Японии применяются зонды на базе угольноиодных датчиков озона японского производства (КС 96).

При измерении профиля озона наземными приборами обычно используются методы дистанционного зондирования. Данные измерений солнечного УФ-излучения неба в зените в сумерки, проводимых с помощью спектрофотометров озона Добсона или Брюера, используются для определения профилей озона на основе метода обращения (Umkehr). Системы измерения УФ-излучения с помощью лидара были разработаны в 1980 годы и с этого времени они оперативно используются на некоторых станциях. Наземные лидары и микроволновые приборы действуют внутри лаборатории. Измерения излучения неба в зените обычно производятся через люк в крыше или открытый купол. В некоторых случаях с помощью лидара производят измерения в других направлениях, ориентируя соответствующим образом луч лазера и детектор. Лидары следует устанавливать таким образом, чтобы избежать помех со стороны других источников УФ-излучения, а при установке микроволновых приборов следует избегать помех со стороны микроволновых радиопередатчиков. Как правило, применение метода с использованием лидара ограничено ночным временем и условием отсутствия значительного облачного покрова. Профиль определяется путем интегрирования результатов, полученных по большому числу лазерных импульсов за несколько часов.

16.4.2 Методы определения вертикального распределения озона

16.4.2.1 Измерения с помощью озонозондов

Озонозонды поднимаются в воздух на борту больших метеорологических шаров-зондов и

определяют профиль атмосферного озона для различной высоты от уровня поверхности и до высоты в 30–35 км среднего слоя стратосферы. Они находят регулярное оперативное применение во всех климатических регионах и в суровых погодных условиях. С 1960 годов озонозонды являются основным средством определения профиля озона.

В основе функционирования всех видов зондов контактного способа измерения на базе влажного химического анализатора лежит принцип электрохимического окисления озоном йодистого калия в водном растворе. В результате данной химической реакции образуются два свободных электрона для каждой молекулы озона, захваченной раствором. Полученный в результате этого электрический ток используется в качестве количественной меры для подсчёта числа молекул озона, прошедших через реакционную камеру (или ряд реакционных камер). Основными компонентами зонда являются а) реакционная камера, в которой молекулы озона вступают в реакцию с химическим раствором (барботёр); б) насос для нагнетания воздуха; в) источник питания, а также, г) электронный интерфейс, в котором первичный электрический сигнал преобразуется и передаётся на радиозонд. В целях предохранения чувствительных блоков прибора от механического воздействия и низких температур, все компоненты зонда монтируются в пенополистироловый кожух. Для передачи сигнала о содержании озона на наземный приёмник озонозонд должен иметь телекоммуникационное соединение с соответствующим метеорологическим радиозондом.

Принцип действия

Ниже приводится описание принципа измерения для зонда Брюера–Маста. Он проще схожего с ним принципа, применяемого в более современных сенсорах с электрохимической ячейкой производства корпораций «ЭНСИ» и «Саенс памп», состоящих из двух камер разделённых диафрагмой (Komhyr, 1986). В каждой камере сенсора с электрохимической ячейкой имеется платиновый электрод, тогда как сенсор Брюера–Маста состоит из одной реакционной камеры, в которой находятся платиновый катод и серебряный анод.

На платиновом катоде происходит окисление йода согласно следующей формуле:

$$I + 2\,e^- <> 2\,I^- \qquad (16.6)$$

На аноде, представляющем собой отрезок серебряного провода, происходит окисление серебра йодидом:

$$2I^- + 2\,Ag <> AgI + 2\,e^- \qquad (16.7)$$

Поскольку AgI является стабильным соединением, он оседает на аноде и не участвует в каких-либо дальнейших реакциях.

Если между платиновой сеткой и серебряным проводом пропустить электрический ток напряжением в 410 мВ, между ними происходит компенсация напряжения поляризации. Перемещения электронов между анодом и катодом не наблюдается, а концентрация йода и йодида в ячейке достигает электрохимического равновесия. При попадании в раствор молекулы озона, она вступает в реакцию с йодидом следующим образом:

$$O_3 + 2\,H^+ + 2I^- > I_2 + H_2O + O_2 \qquad (16.8)$$

Это нарушает равновесие и вызывает перемещение двух электронов до восстановления равновесия. В случае завершённой реакции полного цикла, два свободных электрона выделяются для каждой молекулы озона. Полученный в результате этого ток представляет собой абсолютную меру содержания озона, вступающего в реакцию в барботёре в единицу времени.

Количество молекул озона N позволяет получить электрический заряд $Q = N \cdot 2 \cdot e$. Если применить уравнение состояния идеального газа ($p \cdot V = N \cdot k \cdot T$, где p – парциальное давление озона, V – объём, N – количество молекул озона, k – постоянная Больцмана, а T – абсолютная температура. Все эти аргументы установлены для заданного объёма воздуха), в результате получится:

$$p \cdot V = Q \cdot k \cdot T/(2 \cdot e) \qquad (16.9)$$

или, поскольку $Q = i \cdot t$, где i – измеренный ток, а t – время:

$$p = i \cdot k \cdot T/(2 \cdot e) \cdot t/V \qquad (16.10)$$

или:

$$p = 4{,}31 \cdot 10^{-3}\, i \cdot T \cdot t / V \qquad (16.11)$$

где p – парциальное давление озона (в миллипаскалях), i – измеренный ток (в μA), T – температура насоса (в Кельвинах), а V/t – это объём воздуха V, прокачанного через ячейку за время t (в 100 мл $с^{-1}$).

Озон атмосферной концентрации вызывает электрический ток, как правило, порядка нескольких микроампер. Интерфейс озонозонда преобразует ток в сигнал, который передаётся на радиозонд. Радио-зонд передаёт сигнал с информацией о содержании озона, а также метеорологические параметры, на наземную станцию, где все сигналы расшифровываются и записываются.

В отличие от прибора Добсона или лидара, у озонозондов есть индивидуальные характеристики. Несмотря на то, что перед запуском озонозонда он тщательно проверяется в лабораторных условиях, в ходе полёта его настройки могут сбиться, что в результате приведёт к неточным показаниям. Кроме того, практически невозможно поддерживать большое количество отдельных зондов в стабильном состоянии в течение длительного периода времени. По этой причине настоятельно рекомендуется нормировать результаты каждого зондирования. Это достигается посредством проведения калибровки вертикально интегрированного профиля зондирования в соответствии с почти полностью совпадающим значением общего содержания озона. Отношение измеренного значения общего содержания озона к значению вертикально интегрированного содержания озона, полученному при помощи зонда, составляет коэффициент корректировки. Данный коэффициент необходимо применить к каждому значению, имеющемуся в профиле озона. При этом, однако, в первичном профиле зондирования не должно быть значительных пробелов вплоть до значений изобарической поверхности свыше 17 гПа. Для достижения высокой аппроксимации значения необходимы дополнительные допущения, например, постоянство отношения смеси выше верхней точки измеренного профиля.

16.4.2.2 Измерения по методу обращения (Umkehr-метод)

Вертикальное распределение озона измеряется с земли с помощью дистанционного зондирования по Umkehr-методу. Это метод основан на том факте, что дифференциальное поглощение озоном солнечного УФ-излучения на двух длинах волн, проходящего через атмосферный озон и рассеиваемого на поверхность Земли небом в зените, зависит от вертикального распределения озона. Эта зависимость усиливается по мере того, как Солнце приближается к линии горизонта. Соотношение излучения ясного неба в зените на двух длинах волн в ультрафиолетовом диапазоне измеряется для зенитных углов Солнца от 60 до 90°. Логарифм этого соотношения наносится как функция зенитного угла; при каком-то конкретном зенитном угле направление наклона кривой меняется на обратное. Эта кривая называется Umkehr-кривой, что на немецком языке означает «поворот в обратном направлении» (эффект обращения).

Стандартный Umkehr-метод был разработан (Götz, Meetham and Dobson, 1934; Dütch, 1957; Dobson, 1957; Mateer, 1964; Mateer and DeLuisi, 1992) и внедрен в оперативную деятельность с целью анализа измерений, проведенных с помощью спектрофотометра Добсона. В 1992 году вышла обновлённая версия алгоритма. С тех пор версия алгоритма UMK92 используется для оперативной обработки данных Umkehr-измерений в Мировом центре данных об озоне и УФ-излучении (МЦДОУФ) в Торонто, Канада. Для извлечения значений вертикального распределения озона методом обращения, данные измерений излучения ясного неба в зените при нескольких зенитных углах Солнца от 60 до 90° сравниваются с результатами, полученными с помощью модели, учитывающей многократное рассеяние излучения («форвардная модель»). При этом предполагается, что вертикальное распределение озона не изменяется по горизонтали и остается постоянным в течение всего периода измерений. Репрезентативные результаты измерений общего содержания озона необходимы как часть входных данных. Анализ при этом основан на первом климатологическом приближении, и, таким образом, удается получить решение, используя метод последовательных приближений. Полученный в результате профиль сообщается в виде средних значений парциального давления для следующих девяти слоев:

Номер слоя	*Диапазон давления, гПа*
1	500–250
2	250–125
3	125–62,5
4	62,5–31,2
5	31,2–15,6
6	15,6–7,8
7	7,8–3,9
8	3,9–1,96
9	1,96–0,98

Алгоритм UMK92 был усовершенствован группой REVUE (Bojkov and others, 2002). Среди прочего, группа пересмотрела априорные профили, основываясь на новых климатологических заключениях в области озона (McPeters, Logan and Labow, 2003), а также внесла исправления и дополнения в форвардную модель. Последующие исследования, проведенные Petropavlovskikh, Bhartia and McElroy (2004), позволили осуществить дальнейшую оптимизацию извлечения, при помощи метода обращения, данных вертикального распределения озона для анализа трендов (алгоритм UMK04). Одно из основных изменений – в способе создания априорного профиля. При использовании алгоритма UMK92, априорные профили создаются на основе значений общего содержания озона в столбе, полученных в результате измерений одним и тем же прибором. Таким образом, недостаток алгоритма UMK92 состоит в том, что априорные профили отличаются друг от друга в зависимости от даты и года. При подобном варьировании априорных профилей сложно с уверенностью сказать вызваны ли долгосрочные изменения в извлечённых данных разницей в априорных профилях либо они отражают информацию, полученную в результате измерений.

Априорные профили были доработаны как для алгоритма REVUE, так и для алгоритма UMK04. Отличия между этими профилями наблюдаются в зависимости от времени года и широты, однако каждодневная и долгосрочная изменчивость данных устранена. В новой версии алгоритма (UMK04) применяется улученная форвардная модель. Инверсная модель была оптимизирована в целях сведения до минимума априорной зависимости при извлечении данных. Анализ информационного содержания данных, полученных в результате Umkehr-измерений, проводится методом «ядро усреднения», разработанным К. Д. Роджерсом. Исходя из результатов анализа информационного содержания методом «ядро усреднения», проведенного при помощи алгоритма UMK04, рекомендуется использовать восьмислойную структуру вертикального распределения озона, при которой совокупность значений содержания озона нулевого и первого слоёв представляет собой профиль изменения содержания озона в тропосфере, а совокупность значений содержания озона второго и третьего слоёв профиль изменения содержания озона в нижней стратосфере. Установлено, что информация о содержании озона в четвёртом слое схожа по своему информационному содержанию с информацией о содержании озона в слоях с пятого по восьмой. Таким образом, слои с четвёртого по восьмой следует рассматривать в качестве отдельных слоёв, преимущественно содержащих информацию независимого характера о распределении озона в стратосфере. В слоях с девятого и выше информации независимого характера не содержится, однако значения для этих слоёв можно объединить со значениями восьмого слоя, получая в итоге точные данные содержания озона в столбе при давлении свыше 4 гПа; данный оценочный подсчёт играет важную роль при сравнении данных о содержании озона, полученных посредством спутниковых и наземных измерений. Несмотря на то, что данный подход недостаточно точен для отслеживания краткосрочной изменчивости содержания атмосферного озона, он вполне пригоден для осуществления мониторинга долгосрочных изменений в среднемесячном содержании озона для семи либо восьми слоёв при умеренно некоррелированной погрешности и минимальном влиянии априорной информации.

«Укороченный» вариант метода обращения (short Umkehr) был разработан DeLuisi, Mateer and Bhartia (1985) для приборов Добсона, применён к приборам Брюера (McElroy, Hahn and Hare, 1998) и в настоящее время используется в некоторых местах. Для этого метода характерна та же точность, что и для стандартного метода обращения; к тому же он имеет несколько преимуществ при оперативном использовании, поскольку необходимый диапазон зенитного угла Солнца уменьшается до 80–90°. Поскольку период измерений значительно короче, выше вероятность того, что в период наблюдений небо будет свободно от облаков. Сезон наблюдения также распространяется дальше в высокие широты, поскольку в году больше дней, когда Солнце поднимается до высоты 10°. Кроме того, при более коротком периоде наблюдений меньше вероятность влияния изменений в распределении озона. При этом варианте в качестве входных данных по-прежнему необходимы данные измерений общего содержания озона.

16.4.2.3 Измерения с помощью лидара

Наземные измерения профиля озона производятся с помощью системы лидара (оптического радиолокатора). В направлении зенита выпускается короткий лазерный импульс с длиной волны в ультрафиолетовой части спектра поглощения озона. Затем измеряется рассеянное обратно излучение как функция времени, прошедшего с момента испускания импульса. Время поступления дает представление о высоте рассеяния, а изменение излучения как функции времени позволяет получить представление о степени поглощения озоном. При этом используются как минимум две длины волны. Излучение одной длины волны поглощается озоном, а другой – нет и эта вторая длина волны используется в качестве контрольной. Сравнение вернувшихся сигналов, отражённых от верхней и нижней кромок атмосферного слоя, а так же сравнение отражённых сигналов на двух длинах волн, позволяет установить значение поглощения озоном для определённого слоя и, соответственно, содержание озона в этом слое. Значительное преимущество этого дважды дифференциального (использует разницу в высоте и длине волны) метода измерений состоит в том, что он обладает самокалибровкой. Значения параметров приборов взаимно сокращаются в уравнениях. Из внешней информации требуется лишь сечение поглощения озона на двух длинах волн.

Результаты измерений содержания озона засоряются, в определённые периоды времени и для определённых высот, значительно возросшим содержанием аэрозолей, например, после крупных вулканических извержений. Однако этого можно избежать практически полностью, если вместо обычных отражённых сигналов упругого рэлеевского рассеяния использовать отражённые сигналы со смещением длины волны, вызванным колебательным комбинационным рассеянием Рамана от молекул азота. Применение метода с использованием лидара ограничено ночным временем и условием отсутствия значительного облачного покрова. Профиль определяется путем интегрирования результатов, полученных по большому числу лазерных импульсов за период примерно 4 часа.

16.4.2.4 Измерения с помощью микроволновых приборов

Распределение озона по высоте может определяться методом наземной микроволновой радиометрии. При помощи данного пассивного метода проводятся наблюдения за уширенными давлением линиями вращательного перехода для атмосферных молекул с постоянным дипольным моментом. Испускаемый сигнал находится в микроволновом диапазоне и на него не влияет облачность. Это позволяет проводить наблюдения практически при любых погодных условиях. Линии перехода, которые обычно применяются для отслеживания содержания озона, находятся на частотах 110,836 ГГц и 142,175 ГГц, однако большое количество таких линий, находится и на других частотах (Parrish and others, 1992). Для получения профиля распределения озона по высоте необходимо провести спектральный анализ обнаруженного сигнала. Для этого применяются различные спектрометры, например, акустооптический спектрометр, спектрометр на основе линейной частотной модуляции, автокоррелятор, блок фильтров и, с недавнего времени, цифровой спектрометр с преобразованием Фурье. Если оптимальным образом объединить информацию, полученную в результате спектральных измерений с априорной информацией о состоянии атмосферы (Rodgers, 1976; 1990), можно вывести профиль распределения озона по высоте для примерных значений высоты от 20 до 80 км. Создание профиля осуществляется с временным разрешением порядка минут, в зависимости от чувствительности прибора. При таком временном разрешении появляется возможность исследовать суточные колебания в содержании озона, например, в мезосфере (Zommerfelds and others, 1989; Connor and others, 1994).

Ряд групп используют микроволновые приборы во всём мире. Некоторые из этих групп предоставляют данные Сети определения изменения состава атмосферы (СОИСА) (см. http://www.ndacc.org). В рамках СОИСА проводятся регулярные наблюдения на станциях в Берне и Пайерне (Швейцария), на Шпицбергене (Норвегия), в Мауна Лоа (Гавайские острова) и Лаудере (Новая Зеландия).

16.4.2.5 Другие методы измерений

Для определения вертикального распределения озона используется и ряд других методов. Некоторые из этих новых методов всё чаще используются в качестве постоянного источника данных. Приборы устанавливаются на земле, на шарах-зондах, ракетах или спутниках. В число таких методов входят:

(a) локальная фотометрия поглощения УФ-излучения;
(b) дифференциальное поглощение солнечного УФ-излучения;
(c) инфракрасное тепловое излучение;
(d) микроволновое тепловое излучение;
(e) поглощение инфракрасного излучения.

Фотометр для определения локального поглощения УФ-излучения, используемый обычно для измерения приземного озона, был модифицирован для измерений озона с платформы шара-зонда. Концентрация озона измеряется как функция высоты по мере того, как прибор поднимается (или опускается) сквозь атмосферу.

В рамках метода определения дифференциального поглощения солнечного УФ-излучения общее содержание озона измеряется с поднимаемой платформы (шара-зонда или ракеты) как функция высоты. Профиль озона определяется из дифференциала общего содержания озона в сравнении с кривой высоты.

Инфракрасное и микроволновое тепловое излучение озона измеряется установленным на шаре-зонде или на спутнике прибором, сканирующим лимб земного шара. Сигнал об излучении как функции угла зрения может быть преобразован для получения вертикального распределения озона.

Измерения поглощения инфракрасного излучения производятся путем определения солнечного излучения при восходе или заходе солнца с платформы, установленной на шаре-зонде. Вертикальный профиль озона определяется путем преобразования соответствующего сигнала как функции тангенциального пути сквозь слои атмосферы, находящиеся ниже шара-зонда.

16.4.3 Ошибки при определении вертикального профиля озона

Ошибки, возникающие при определении профиля озона с помощью озонозондов, обусловлены рядом источников. В растворе йодистого калия могут находиться загрязняющие вещества, которые негативно влияют на чувствительность зонда к озону. Ошибка при измерении скорости потока воздуха, образующегося под воздействием насоса, может привести в результате к возникновению систематической ошибки при измерениях озона на всех уровнях. Кроме того, в ходе полета может изменяться коэффициент полезного действия насоса.

Абсолютная точность проинтегрированного вертикального распределения озона (общего содержания озона), полученного с помощью озонозонда, определяется абсолютной точностью наземных измерений общего содержания озона, поскольку приведение

Таблица 16.2. Ошибки в значениях содержания озона, полученных для восьми независимых слоёв путём проведения измерений прибором Добсона по методу обращения (Umkehr)

Номер слоя	8+	8	7	6	5	4	2+3	1+0
Ошибка сглаживания %	10,3	5,7	6,2	6,5	6,5	10,5	15,6	22,6
Погрешность измерения %	6,0	4,1	3,2	4,3	2,9	2,9	1,8	6,8
Общая погрешность %	11,9	7,0	6,9	7,8	7,1	10,9	15,7	23,6

проинтегрированного вертикального распределения проводится по данным измерений общего содержания озона. Погрешность при этом оценивается в 3–5 %. Погрешность измерения конкретной высоты в атмосфере изменяется как функция вертикального расстояния от среднего уровня моря. Погрешность измерений, как правило, оценивается в 10 % в тропосфере и в 5 % в стратосфере ниже уровня 10 гПа. Выше уровня 10 гПа возрастающие неопределенности эффективности работы насоса и скорости потока воздуха обусловливают увеличение ошибки до 15 % на уровне 5 гПа.

Ошибки при использовании метода обращения (Umkehr) связаны также с несколькими причинами. Ошибки возникают, когда в период измерений горизонтальное распределение озона не однородно или когда происходят изменения общего содержания озона или его вертикального распределения. На измерения по методу обращения оказывают влияние находящиеся в стратосфере аэрозоли, накапливающиеся после периода вулканической активности. Наличие ошибок в профиле распределения озона зависит от оптической глубины и высоты расположения аэрозольной нагрузки. Ошибка в определенном заранее вертикальном распределении по первому приближению ведет к возникновению систематического отклонения при окончательном преобразовании. Ошибки при извлечении значений (см. Таблицу 16.2) обусловлены сглаживанием мелкомасштабной изменчивости данных в профиле (первый ряд таблицы) и влиянием погрешности измерений (второй ряд таблицы). Предполагается, что дисперсия погрешности измерений увеличивается с увеличением солнечного зенитного угла от 0,3 до 1,6 единиц N-величины (на основе анализа случайных данных, проведенного за несколько лет двумя приборами Добсона на станции Ароса). Общая погрешность метода обращения (нижний ряд таблицы) по оценочным данным составляет 25 % для тропосферы (нулевой и первый слои), 15 % для нижней стратосферы (третий и второй слои), менее ±10 % для средней стратосферы (слои с четвёртого по шестой), менее 10 % для верхней стратосферы (седьмой и восьмой слои). Процент ошибок увеличивается для интегрированного совместного содержания озона в восьмом и более высоких слоях.

Погрешность определения профиля озона при измерениях с помощью лидара в присутствии фонового аэрозоля оценивается в 3 %, что в большей степени определяется неопределённостью в абсолютных значениях коэффициента поглощения озона. При повышенном содержании стратосферного аэрозоля, в случаях, когда не используются каналы комбинационного рассеяния Рамана, ошибки в значениях содержания озона могут составлять свыше 100 % для тех высот, на которых наблюдается повышенное содержание аэрозоля. Однако в нормальных условиях самым значительным источником неопределённости является статистическая случайная ошибка. Как правило, она составляет 2 % для высот до 30 км, а на высоте 45 км увеличивается до 18 %.

В отличие от прочих методов измерения, микроволновая радиометрия характеризуется относительно слабым высотным разрешением порядка 8–15 км (половина ширины ядра усреднения) в зависимости от высоты (Connor and others, 1995). Случайная погрешность составляет примерно 3–10 % от восстановленных значений содержания озона, в зависимости от высоты. Влияние априорной информации составляет менее 20 % при приблизительных значениях высоты 20–55 км, однако увеличивается на прочих высотах.

16.4.4 Сравнение, калибровка и обслуживание приборов для определения вертикального профиля озона

Процедуры для спектрофотометров и озонометров описаны в разделе 16.3.5. Озонозонды – это приборы одноразового использования. Как правило, они запускаются только один раз, хотя и могут быть восстановлены. Никаких требований в отношении поддержания стандартов калибровки отдельного зонда в течение продолжительного периода времени не существует, так же как не существует и эталонного озонозонда для калибровки других приборов. Установлены стандартные процедуры, которым необходимо следовать при подготовке конкретных озонозондов к полету. Такие процедуры подробно описаны в работе Komhyr (1986) для зонда с электрохимической ячейкой и в публикации ВМО (WMO, 1992) для зонда Брюера–Маста. Для установления отличий между озонозондами производства корпораций «ЭНСИ» и «Саенс памп», были проведены определённые исследования, в которых также были приняты во внимание качество работы насоса для нагнетания воздуха и различные концентрации

реакционного раствора. Подробная информация приведена в публикации ВМО (WMO, 2004*a*) и Johnson and others (2002). Стандартные процедуры работы для обоих видов озонозондов с электрохимической ячейкой в данный момент находятся в разработке.

Результаты наземных микроволновых наблюдений за содержанием озона тщательно проверялись в соответствии с прочими микроволновыми приборами и сверялись с данными, полученными при помощи прочих методов измерения, таких как лидар или приборы спутникового базирования (Tsou and others, 1995; Schneider and others, 2003). Кроме того, была исследован вопрос о том, возможно ли дополнить профили озона, составленные посредством зондирования с шаров-зондов, данными измерений, проведенных микроволновыми приборами (Calisesi and others, 2003).

16.5 ПОПРАВКИ К ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЯ ОЗОНА

Данные об общем содержании озона (измерения прямого солнечного, лунного излучения и излучения неба в зените) и вертикальном распределении озона (измерения по методу обращения, с помощью озонозондов и лидаров), полученные на станциях сети ГСА, направляются в МЦДОУФ в Торонто (Канада), где их вносят в архив и помещают на Web-сайт МЦДОУФ (http://www.woudc.org) в открытом доступе для пользователей. Ежегодные сводки данных также имеются в издании «Данные об озоне в мире» (Ozone Data for the World) (только на компакт-дисках). МЦДОУФ работает под руководством Министерства охраны окружающей среды Канады в сотрудничестве с ВМО. Прочими важными источниками данных об озоне являются база данных Норвежского института исследования воздуха (http://www.nilu.no/nadir), основная цель которой – быстрый сбор и распространение данных для проведения кампаний, а также, Web-сайт СОИСА (http://www.ndacc.org). Данные измерений приземного озона направляются в Мировой центр данных ВМО по парниковым газам (МЦДПГ), размещенном в Японском метеорологическом агентстве. Данные МЦДПГ доступны через Web-сайт (http://gaw.kishou.go.jp/wdcgg.html) и, также, издаются на компакт-дисках. МЦДОУФ и МЦДПГ также осуществляют сбор метаданных о наблюдениях и данных об озоне, хранящихся в центрах данных.

Характеристики конкретного прибора, которые влияют на измерение содержания озона (такие как константы калибровки, ответная реакция на изменения температуры и настройки приборов для местных географических и климатических условий) корректируются обычно в ходе процедуры наблюдений или при определении значений озона на основании показаний прибора. В некоторых случаях данные измерений общего содержания озона по прямому излучению Солнца корректируются относительно спектральных характеристик прибора, с тем чтобы расширить диапазон измерений при числе масс атмосферы более 3,2 (влиянием спектральных особенностей спектрофотометра обычно можно пренебречь при числе масс атмосферы меньше 3,2). Это характерно в основном для высоких широт в зимний сезон. Коррекция носит эмпирический характер и основана на данных, полученных в дни, когда данные измерений при большом числе масс атмосферы (до 5–6) могут быть сопоставлены с данными измерений, полученными при меньших значениях. Следует отметить, что измерения прибором Добсона по методу «солнце в фокусе» и измерения общего содержания озона новым прибором Брюера МК–III (с двойным монохроматором) можно проводить вплоть до значений $\mu = 6$.

Измерения, проводимые по Umkehr-методу, направляются в МЦДОУФ, где они обрабатываются для получения вертикальных распределений озона, которые затем публикуются вместе с первичными данными. Все другие виды данных обрабатываются на конкретной станции, и затем представляются результирующие данные об общем содержании и концентрации озона.

Данные измерений вертикального распределения озона с помощью озонозондов корректируются путем приведения его интеграла к данным наземных измерений общего содержания озона. При этом необходимы допущения относительно количества озона, находящегося в атмосфере выше измеренного профиля. Если данные измерений общего содержания озона отсутствуют, предполагается, что коэффициент поправки равен 1,0.

Каждая станция несет ответственность за правильность своих данных. Сомнительные данные в МЦДОУФ помечаются, с тем чтобы конкретная станция могла их проверить и при необходимости откорректировать. Данные, полученные по Umkehr-методу и обрабатываемые в МЦДОУФ, должны перед опубликованием проходить контроль качества. Станции предоставляется возможность откорректировать предыдущие данные и затем снова представить их для публикации в более поздний срок. Требование о коррекции представленных ранее данных обычно основано на получении новой информации относительно константы прибора либо связано с обнаружением ошибки или усовершенствованием процесса преобразования данных. Откорректированные данные публикуются в том же самом формате, однако обычно сопровождаются примечанием «откорректированы». Откорректированные данные помечаются

также и в ежегодном каталоге, в котором обобщаются все представленные данные.

16.6 НАБЛЮДЕНИЯ С ВОЗДУШНЫХ СУДОВ И СПУТНИКОВ

Содержание озона в атмосфере также измеряется при помощи приборов, установленных на борту воздушных судов и космических спутников. Наблюдения с воздушных судов обычно осуществляются при помощи контактных фотометров, которые берут пробы воздуха в тропосфере и нижней стратосфере во время полёта. Результаты измерений используются главным образом при проведении кампаний по исследованию химического состава атмосферы, таких как проекты МОЗАИК, КАРИБИК или СКОУТ.

Крупномасштабные наблюдения за содержанием атмосферного озона осуществляются при помощи приборов дистанционного зондирования, установленных на спутниках. Такого рода программы подразделяются в соответствии с продолжительностью работ на долгосрочные системы оперативного мониторинга, производящие обширные (в глобальном масштабе) ряды данных, использующихся для проведения анализа тенденций и оперативного отображения на карте содержания озона, а также на временные экспериментальные задания.

Приборы спутникового базирования подразделяются на несколько групп в соответствии с принципом обнаружения излучения, применяемым для определения содержания озона по методу ДОАС. В одну из групп входят приборы надирного наблюдения, которые осуществляют анализ рассеянного УФ-излучения специально для определения общего содержания озона. В другую – приборы, измеряющие вертикальное распределение озона во время солнечного, лунного или звёздного «затемнения» в различных областях спектра либо путём осуществления анализа микроволнового теплового излучения в атмосферном лимбе (WMO, 1998).

Наблюдения из космоса за содержанием озона впервые были проведены в 1978 году при помощи спектрометра для картирования общего количества озона (Heath, Krueger and Park, 1978). Значительный прогресс был достигнут с тех пор в области космического мониторинга содержания озона. С того времени в космос было запущено более десятка приборов долгого срока службы и экспериментальных приборов спутникового базирования, а в течение следующего десятилетия планируется запустить в космос ещё несколько таких приборов. Кроме того, технологии и параметры таких систем космического базирования были усовершенствованы в плане вертикального и горизонтального разрешения, спектрального разрешения, алгоритмов обработки данных наблюдений, а также, количества отслеживаемых атмосферных компонентов.

Спутниковый мониторинг содержания озона тесно связан с наземными наблюдениями, результаты которых используются, главным образом, для проверки достоверности данных наблюдений, полученных с помощью космических систем, и при крупномасштабной ассимиляции данных оперативных измерений содержания озона в модели численного картирования и прогнозирования концентрации озона. Стратегической задачей ВМО, космических агентств и прочих соответствующих научных групп, представляемых Комитетом по спутниковым наблюдениям за Землей, является укрепление и объединение систем наземного и спутникового мониторинга содержания озона. Устройство системы и сводная информация о недавно проведенных, проводящихся и запланированных к проведению в ближайшее время программах спутникового мониторинга содержания озона представлены в отчёте ВМО (WMO, 2001*b*), а в обновлённом виде в издании ВМО (WMO, 2004*b*). С подробным описанием текущих и запланированных проектов спутникового мониторинга содержания озона можно ознакомиться на их временных Web-сайтах.

ПРИЛОЖЕНИЕ 16.А

ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ ОБЩЕГО И ЛОКАЛЬНОГО СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА

Единица Добсона 1 Д. Е. = 1 миллиатмосантиметр (1матм-см)

= 10^{-5} м озона при нормальных давлении и температуре

= 2,141 4 мг $см^{-1}$

= 2,687· 1016 молекул $см^{-2}$

ТАБЛИЦА 16.А.1. Величины характеризующие локальное содержание озона, в единицах Международной системы, и интегральное его содержание в единичном вертикальном столбе атмосферы

Количественная характеристика	*Плотность*			*Концентрация относительно местного воздуха (отношение смеси)*		*Парциальное давление*
	Удельная плотность	*Плотность*	*Относительно нормальных температуры и давления (дифференцированное общее значение)*	*По массе*	*По объему*	
	$м^{-3}$	$кг \cdot м^{-3}$	нормальные температура и давление	/	/	Па
	n	ρ	s	m	v	P
Удельная плотность	////	$n \cdot \frac{\rho^o M}{L}$	$n \cdot \frac{1}{L}$	$n \cdot \frac{M}{L} \cdot \frac{T^*}{P^*}$	$n \cdot \frac{1}{L} \cdot \frac{T^*}{P^*}$	$n \cdot \frac{\rho^o}{L} \cdot T^*$
Плотность	$\rho \cdot \frac{L}{\rho^o M}$	////	$\rho \cdot \frac{1}{\rho^o M}$	$\rho \cdot \frac{1}{\rho^o} \cdot \frac{T^*}{P^*}$	$P \cdot \frac{1}{\rho^o M} \cdot \frac{T^*}{P^*}$	$P \cdot \frac{P^o}{\rho^o M} \cdot T^*$
Плотность относительно нормальных температуры и давления	$s \cdot L$	$s \cdot \rho^o M$	////	$s.M. \frac{T^*}{P^*}$	$s \cdot \frac{T^*}{P^*}$	$s \cdot P^o \cdot T^*$
Отношение смеси по массе	$m \cdot \frac{L}{M} \cdot \frac{P}{T^*}$	$m \cdot \rho^o \frac{P^*}{T^*}$	$m \cdot \frac{1}{M} \cdot \frac{P^*}{T^*}$	////	$m \cdot \frac{1}{M}$	$m \cdot \frac{P^o}{M} \cdot P^*$
Отношение смеси по объему	$v \cdot L \cdot \frac{P^*}{T^*}$	$v \cdot \rho^o M \cdot \frac{P^*}{T^*}$	$v \cdot \frac{P^*}{T^*}$	$v \cdot M$	////	$v \cdot P^o \cdot P^*$
Парциальное давление	$P \cdot \frac{L}{P^o} \cdot \frac{1}{T^*}$	$P \cdot \frac{\rho^o M}{P^o} \cdot \frac{1}{T^*}$	$P \cdot \frac{1}{P^o} \cdot \frac{1}{T^*}$	$P \cdot \frac{M}{P^o} \cdot \frac{1}{P^*}$	$P \cdot \frac{1}{P^o} \cdot \frac{1}{P^*}$	////
Типичная концентрация на высоте 25 км	$4{,}97 \cdot 10^{18}$	$3{,}96 \cdot 10^{-7}$	$1{,}85 \cdot 10^{-7}$	$10 \cdot 10^{-6}$	$6{,}03 \cdot 10^{-6}$	$1{,}51 \cdot 10^{-2}$
Интегрирование по высоте (z в метрах)	$\int n.\, dz = L.x$	$\int \rho.dz = \rho^o M.x$	$\int s.dz = x$	$\int m.dP = -Mg.x$	$\int v.dP = -g.$	$\int p.d(\ln P) = -g.x$

$P^* = P/P^o$, $T^* = T/T^o$	Приведенные к нормальным условиям локальные значения температуры и давления	
P^o, T^o	Нормальные давление и температура	$1{,}013\ 25 \cdot 10^5$ Па, 273,15 К
ρ_o	Плотность воздуха при нормальных давлении и температуре	1,293 кг м$^{-3}$
L	Число Лошмидта	$2{,}687 \cdot 10^{25}$ м$^{-3}$
g	Ускорение свободного падения	9,807 м с$^{-2}$
M	Отношение молекулярных масс озон /воздух	1,657
x	Общее содержание озона	единица: м (при нормальных давлении и температуре)
P, T	Локальные значения давления и температуры воздуха	единицы: Па, К

ТАБЛИЦА 16.A.2 Единицы, наиболее часто используемые для измерения локального озона, и их взаимный пересчет

Единица	*Плотность*			*Отношение смеси*		*Давление*
	(10^{11} мол. · см$^{-3}$)	*(мкг · м$^{-3}$)*	*(Д. Е. · км$^{-1}$)*	*(мкг · г–1)*	*(млн$^{-1}$ по объёму)*	*(гПа)*
10^{11} мол. · см$^{-3}$ [10^{17} мол. · м$^{-3}$]	–	7,97	0,371	$0{,}022\ 9\ \frac{T}{P}$	$0{,}013\ 8\ \frac{T}{P}$	$0{,}013\ 8\ T$
1 мкг · м$^{-3}$ [10^{-9} кг · м$^{-3}$]	0,125	–	0,046 7	$0{,}002\ 87\ \frac{T}{P}$	$0{,}001\ 73\ \frac{T}{P}$	$0{,}001\ 73\ T$
1 Д. Е. · км$^{-1}$	2,69	21,4	–	$0{,}061\ 4\ \frac{T}{P}$	$0{,}037\ 0\ \frac{T}{P}$	$0{,}037\ 0\ T$
1 мкг · г$^{-1}$ [10^{-6} по массе]	$43{,}7\ \frac{P}{T}$	$348\ \frac{P}{T}$	$16{,}3\ \frac{P}{T}$	–	0,603	$0{,}603\ P$
1 млн$^{-1}$ по объёму [10^{-6} по объёму]	$72{,}4\ \frac{P}{T}$	$578\ \frac{P}{T}$	$27{,}0\ \frac{P}{T}$	1,657	–	P
1 гПа [10^{-4} Па]	$72{,}4\ \frac{1}{T}$	$578\ \frac{1}{T}$	$27{,}0\ \frac{1}{T}$	$1{,}657\ \frac{1}{T}$	$\frac{1}{P}$	–

Примечание:

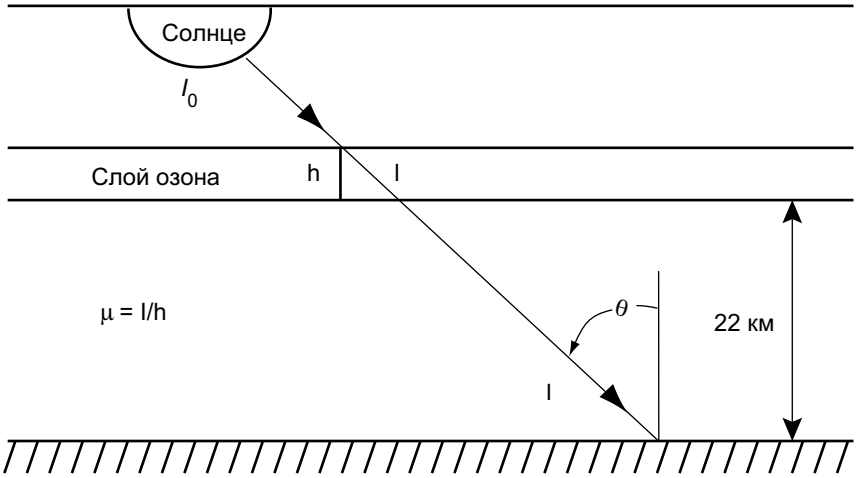
Давление (P) – в гектопаскалях.

Температура (T) – в Кельвинах.

Значения в квадратных скобках – эквивалентные значения Международной системы единиц (СИ).

ПРИЛОЖЕНИЕ 16.B

ТЕОРИЯ ИЗМЕРЕНИЙ



Измерения общего содержания озона с помощью спектрофотометра.

Геометрия пути солнечного света, проходящего сквозь слой озона в атмосфере Земли, представлена на рисунке. Интенсивность солнечного излучения (I_λ) с длиной волны λ, измеряемого у поверхности земного шара, описывается следующим соотношением:

$$\log(I_\lambda) = \log(I_{0\lambda}) - \alpha_\lambda X\mu - \alpha'_\lambda X'\mu' - \beta_\lambda m - \delta_\lambda \sec(\theta) \qquad (16.B.1)$$

где: I_0 интенсивность излучения на длине волны λ за пределами атмосферы Земли (внеатмосферное значение);

α_λ коэффициент поглощения озона на длине волны λ (нм);

X общее содержание озона в вертикальном профиле атмосферы (метры при нормальных давлении и температуре);

μ отношение наклонного пути излучения через слой озона к вертикальному пути (оптическая воздушная масса слоя озона);

α'_λ коэффициент поглощения диоксида серы на длине волны λ (нм);

X' общее содержание диоксида серы в вертикальном профиле атмосферы (метры при нормальных давлении и температуре);

μ' отношение наклонного пути излучения через слой диоксида серы к вертикальному пути (оптическая воздушная масса слоя диоксида серы);

β_λ коэффициент рэлеевского молекулярного рассеяния воздуха на длине волны λ;

m отношение наклонного пути излучения через всю атмосферу к вертикальному пути (оптическая воздушная масса всей атмосферы);

δ_λ коэффициент рассеяния частицами аэрозоля на длине волны λ;

θ истинный зенитный угол Солнца.

На практике точное измерение озона не может быть осуществлено путем измерения интенсивности излучения лишь на одной длине волны, поскольку трудно сохранять абсолютную чувствительность прибора в течение продолжительного периода времени. К тому же рассеяние частицами, обусловленное наличием в атмосфере аэрозолей и тонких облаков, оказывает значительное влияние на количество поступающего излучения.

Следовательно, необходимо измерять интенсивность излучения более чем на одной длине волны, и

затем определять общее содержание озона методом дифференциальной оптической абсорбционной спектроскопии (ДОАС). Измерения интенсивности излучения на N длинах волн описываются *N* уравнениями в форме (16.B.1) с различными значениями $I_{0\lambda}$, α_λ, α'_λ, β_λ и δ_λ. Эти *N* уравнений могут быть объединены на линейной основе в следующем виде:

$$\sum w_\lambda \log(I_\lambda) = \sum w_\lambda \log(I_{0\lambda}) - (\sum w_\lambda \alpha_\lambda) X_\mu - (\sum w_\lambda \alpha'_\lambda) X'\mu' - (\sum w_\lambda \beta_\lambda) m - (\sum w_\lambda \delta_\lambda) \sec(\theta) \qquad (16.B.2)$$

где $\sum$ обозначает суммирование от 1 до *N* и w_λ – совокупность значений, взвешенных по N, по одному для каждой длины волны.

Взвешенные значения для каждой длины волны (w_λ) выбираются для сведения к минимуму влияния других составляющих атмосферы, в основном аэрозолей. Использование взвешенных значений для измерений прибором Добсона излучения с длинами волн AD уменьшает влияние дымки. Влиянием диоксида серы на измерения озона с помощью прибора Добсона обычно пренебрегают, хотя присутствие диоксида серы в атмосфере дает на некоторых станциях около 1 % дополнительной ошибочной величины озона. Использование взвешенных значений для измерения общего содержания озона с помощью прибора Брюера сводит к минимуму влияние аэрозолей и диоксида серы. Длины волн для измерений на парах волн AD с помощью прибора Добсона и стандартных измерений с помощью прибора Брюера совместно с соответствующими значениями w_λ приведены в нижеследующей таблице.

Если влиянием диоксида серы и дымки пренебречь, то уравнение (16.B.2) может быть переписано в следующем виде:

$$F + \beta m = F_0 - \alpha X \mu \qquad (16.B.3)$$

где:
$F = \sum w_\lambda \log(I_\lambda)$
$F_0 = \sum w_\lambda \log(I_{0\lambda})$
$\beta = \sum w_\lambda \beta_\lambda$
$\alpha = \sum w_\lambda \alpha_\lambda$

Из уравнения (16.B.3) следует, что значение общего содержания озона выражается следующим уравнением:

$$X = \frac{(F_0 - F - \beta m)}{\alpha\mu} \qquad (16.B.4)$$

Здесь член *F* измеряется; F_0 – константа калибровки, равная значению *F* за пределами атмосферы Земли (внеатмосферная константа прибора); βm и $\alpha\mu$ – расчетные значения.

Для определения общего содержания озона необходимо знать значение F_0, которое уникально для каждого конкретного прибора. Эта постоянная определяется для большинства полевых приборов путем прямого взаимного сравнения с первичным или вторичным эталонным прибором (см. раздел 16.3.5.1).

Длины волн и действительные взвешенные значения, применяемые для измерений с помощью прибора Добсона и стандартных измерений содержания озона с помощью прибора Брюера

ИЗМЕРЕНИЯ ПРИБОРОМ ДОБСОНА НА ПАРЕ ДЛИН ВОЛН AD			*СТАНДАРТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПРИБОРОМ БРЮЕРА*	
Длина волны λ нм		*Взвешенное значение w_λ*	*Длина волны λ нм*	*Взвешенное значение w_λ*
305,5		1,0	310,1	1,0
	пара A			
325,4		–1,0	313,5	–0,5
317,6		–1,0	316,8	–2,2
	пара D			
339,8		1,0	320,0	1,7

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Всемирная Метеорологическая Организация, 1988: *Технический регламент*. Том I, ВМО-№ 49, Женева.

Всемирная Метеорологическая Организация, 1993: *Сорок четвертая сессия Исполнительного Совета. Сокращенный окончательный отчет с резолюциями.* ВМО-№ 780, Женева.

Asbridge A.I., K. Vanicek and M. Stanek, 1998: Application of Dobson zenith polynomials for different instruments, locations and seasons. *Proceedings of the Quadrennial Ozone Symposium* (R.D. Bojkov and G. Visconti, eds.) (L'Aquila, Italy, 12–21 September 1996), pp. 979–982.

Attmannspacher, W. and R. Hartmannsgruber, 1982: Intercomparison of instruments measuring ozone near the ground at Hohenpeissenberg Observatory, 1 October 1978–30 April 1979. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes*, No. 161, Offenbach am Main.

Bass, A.M. and R.J. Paur, 1985: The ultraviolet cross-sections of ozone: I. The measurements, II: Results and temperature dependence. *Atmospheric Ozone* (C.S. Zerefos and A. Ghazi, eds), Reidel, Dordrecht, pp. 606–616.

Bojkov, R.D., Fioletov, V.E. and A.M. Shalamjansky, 1994: Total ozone changes over Eurasia since 1973 based on reevaluated filter ozonometer data. *Journal of Geophysical Research*, 99, pp. 22985–22999.

Bojkov, R.D., E. Kosmidis, J.J. Deluisi, I. Petropavloskikh, V.E. Filetov, S. Godin and C. Zerefos, 2002: Vertical ozone distribution characteristics deduced from 44 000 re-evaluated Umkehr profiles (1957– 2000). *Meteorolgy and Atmosheric Physics*, 79, Issue 3–4, pp. 127–158.

Brion, J.A., A. Chakir, D. Daumont, J. Malicet and C. Parisse, 1993: High-resolution laboratory absorption cross-section of O3: Temperature effect. *Chemical Physics Letters*, 213, pp. 610–612.

Burrows, J.P., A. Richter, A. Dehn. B. Deters, S. Himmelmann, S. Voigt and J. Orphal, 1999: Atmospheric remote-sensing reference data from GOME: 2. Temperature-dependent absorption cross sections of O3 in the 231–794 nm range. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 61, pp. 509–517.

Calisesi, Y., R. Stübi, N. Kämpfer and P. Viatte, 2003: Investigation of systematic uncertainties in Brewer-Mast ozone soundings using observations from a ground based microwave radiometer. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 20, No. 11, pp. 1543–1551.

Connor, B.J., D.E. Siskind, J.J. Tsou, A. Parrish and E.E. Remsberg, 1994: Ground-based microwave observations of ozone in the upper stratosphere and mesosphere. *Journal of Geophysical Research*, 99, pp. 16757–16770.

Connor, B.J., A. Parrish, J.J. Tsou and M.P. McCormick, 1995: Error analysis for the ground-based microwave ozone measurements during STOIC. *Journal of Geophysical Research*, 100, pp. 9283–9291.

DeBacker, H., 1998: Zenith observations of total ozone in Uccle. *Scientific Publication No. 006*, Royal Meteorological Institute of Belgium, Brussels.

DeLuisi, J.J., C.L. Mateer and P.K. Bhartia, 1985: On the correspondence between standard Umkehr, short Umkehr, and solar backscattered ultraviolet vertical ozone profiles. *Journal of Geophysical Research*, 90, pp. 3845–3849.

DeMuer, D. and H. DeBacker, 1992: Revision of 20 years of Dobson total ozone data at Uccle (Belgium): Fictitious Dobson total ozone trends induced by sulfur dioxide trends. *Journal of Geophysical Research*, 97, pp. 5921–5937.

Dobson, G.M.B., 1930: Observations of the amount of ozone in the Earth's atmosphere and its relation to other geophysical conditions. Part IV, *Proceedings of the Royal Society* of London, A129, pp. 411–433.

Dobson, G.M.B., 1957: Observer's handbook for the ozone spectrophotometer. *Annals of the International Geophysical Year*, 5, pp. 46–89.

Dütsch, H.U., 1957: Evaluation of the Umkehr effect by means of a digital electronic computer. *Ozone and General Circulation in the Stratosphere*, Scientific Report No. 1, Arosa, Lichtklimatisches Observatorium.

Dütsch, H.U., 1959: Vertical ozone distribution from Umkehr observations. *Archives for Meteorology, Geophysics and Bioclimatology*, A11, pp. 240–251.

Evans, R.D., G. Carbaugh, B. Walsh, S. Oltmans, D. Quincy, M. O'Neil, M. Clark and V. Köhler, 2004a: Results of international Dobson spectrophotometer intercalibrations held since 2000. In: *Proceedings of the Quadrennial Ozone Symposium* (C.S. Zerefos, ed.), University of Athens, pp. 532–533.

Evans, R.D., G.L. Carbaugh, S.J. Oltmans, B. Walsh, D.M. Quincy, M. O'Neil and M. Clark, 2004b: Dobson calibration scales and application to network instruments. *Proceedings of the Quadrennial Ozone Symposium* (C.S. Zerefos, ed.), University of Athens, pp. 534–535.

Feister, U., 1991: Field performance of a Brewer spectrometer and filter ozonometer M-124 as compared to a Dobson spectrophotometer. *Zeitschrift für Meteorologie*, 4, pp. 291–305.

Fioletov, V.E., E.W. Hare and E.J. Carty, 2004: Recent advancements and developments at the WOUDC. *Proceedings of the Quadrennial Ozone Symposium* (C.S. Zerefos, ed), University of Athens, pp. 536–537.

Götz, F.W.P., A.R. Meetham, and G.M.B. Dobson, 1934: The vertical distribution of ozone in the atmosphere. *Proceedings of the Royal Society of London*, A145, pp. 416–446.

Gushchin, G.P., S.A. Sokolenko and V.A. Kovalyev, 1985: Total-ozone measuring instruments at the USSR station network. *Atmospheric Ozone* (C.S. Zerefos and A. Ghazi, eds), Reidel, Dordrecht, pp. 543–546.

Heath, D.F., A.J. Krueger and H. Park, 1978: The solar backscatter ultraviolet (SBUV) and total ozone mapping spectrometer (TOMS) experiment. In: C.R. Madrid, *The NIMBUS-7 User's Guide*. NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, pp. 175–211.

International Association of Meteorology and Atmospheric Physics (IAMAP), 1967: *Resolution of the International Ozone Commission of the International Association for Meteorology and Atmospheric Physics*. Fourteenth General Assembly of IAMAP, Lucerne, 4 October 1967.

Johnson, B.J., S.J. Oltmans, H. Vömel, H.G.J. Smit, T. Deshler and C. Kröger, 2002: Electrochemical concentration cell (ECC) ozonesonde pump efficiency measurements and tests on the sensitivity to ozone of buffered and unbuffered ECC sensor cathode solutions. *Journal of Geophysical Research*, 107, D19 doi: 10.1029/2001JD000557.

Kerr, J.B., C.T. McElroy and R.A. Olafson, 1981: Measurements of ozone with the Brewer ozone spectrophotometer. *Proceedings of the Quadren-nial Ozone Symposium* (J. London, ed.) (Boulder, Colorado, August 1980), pp. 74–79.

Kerr, J.B., I.A. Asbridge and W.F.J. Evans, 1988: Intercomparison of total ozone measured by the Brewer and Dobson spectrophotometers at Toronto. *Journal of Geophysical Research*, 93, pp. 11129–11140.

Kerr, J.B., C.T. McElroy and D.I. Wardle, 1998: The Brewer instrument calibration center 1984–1996. *Proceedings of the XVIII Quadriennial Ozone Symposium* (R.D. Bojkov and G. Visconti, eds), pp. 915–918.

Kerr, J.B., 2002: New methodology for deriving total ozone and other atmospheric variables from Brewer spectrophotometer direct sun spectra. *Journal of Geophysical Research*, 107(D23), 4731, doi: 10.1029/2001JD001227.

Klausen, J.C. Zelleweger, B. Buchmann and P. Hofer, 2003: Uncertainty and bias of surface ozone measurements at selected Global Atmosphere Watch sites. *Journal of Geophysical Research*, 108 (D19), 4622, doi: 10.1029/2003JD003710.

Köhler, U., 1999: A comparison of the new filter ozonometer MICROTOPS II with Dobson and Brewer spectrophotometers at Hohenpeissenberg. *Geophysical Research Letters*, 26, pp. 1385–1388.

Köhler U., H. Claude, K. Vanicek, M. Stanek and R. Evans, 2004: The Dobson instrument – still a backbone of ozone monitoring? *Proceedings of the Quadrennial Ozone Symposium* (C.S. Zerefos, ed.), University of Athens, pp. 121–122.

Komhyr, W.D., 1986: *Operations Handbook – Ozone Measurements to 40-km Altitude with Model 4A Electrochemical Concentration Cell (ECC) Ozonesondes*. NOAA Technical Memorandum ERL ARL-149.

Komhyr, W.D., 1997: *Instruction Manual of Model KZ-ECC Atmospheric Ozone Sounding System*. ENSCI-Corporation, Boulder, CO, USA.

Komhyr, W.D., R.D. Grass and R.K. Leonard, 1989: Dobson spectrophotometer 83: A standard for total ozone measurements, 1962–1987. *Journal of Geophysical Research*, D7, 94, pp. 9847–9861.

Komhyr, W.D., C.L. Mateer, and R.D. Hudson, 1993: Effective Bass-Paur 1985 ozone absorption coefficients for use with Dobson ozone spectrophotometers. *Journal of Geophysical Research*, 98, pp. 451–465.

Lamb, K., 2004: International Ozone Service, personal communication.

Mateer, C.L., 1964: *A Study of the Information Content of Umkehr Observations*. Ph. D. thesis, University of Michigan.

Mateer, C.L. and J.J. DeLuisi, 1992: A new Umkehr inversion algorithm. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 54, pp. 537–556.

McElroy, C.T., J.F. Hahn and E. Hare, 1998: Determining high-altitude trends in ozone from Brewer Umkehr observations made at Canadian stations. *Proceedings of the Quadrennial Ozone Symposium* (R. D. Bojkov and G. Visconti, eds), pp 25–28.

McElroy, C.T., V. Sevastiouk and K. Lamb, 2004: Calibrating the Brewer spectophotometers with the travelling standard. *Proceedings of the Quadrennial Ozone Symposium* (C.S. Zerefos, ed.), University of Athens, pp. 577–578.

McPeters, R.D., J.A. Logan and G.J. Labow, 2003: Ozone climatological profiles for Version 8 TOMS and SBUV retrievals, *EOS, Transactions, American Geophysical Union, 84*, Fall Meeting Supplement, Abstract A21D-0998.

Megie G.J., A.J. Miller and R.D. Bojkov, 1991: *Recommendations for Implementation of the Bass-Paur Ozone Absorption Coefficients*. Ozone Commission of the International Association of Meteorology and Atmospheric Physics (IAMAP), Geneva, 18 December 1991.

Molina, L.T. and M.J. Molina, 1986: Absolute absorption cross-sections of ozone in the 185- to 350-nm

wavelength range. *Journal of Geophysical Research*, 91, pp. 14501–14508.

Parrish, A., B.J. Connor, W.P. Chu, J.J. Tsou and I.S. McDermid, 1992: Ground-based microwave monitoring of stratospheric ozone. *Journal of Geophysical Research*, 97, pp. 2541–2546.

Paur, R.J. and F.F. McElroy, 1979: *Technical Assistance Document for the Calibration of Ambient Ozone Monitors*. EPA-600/4-79-57, United States Environmental Protection Agency.

Petropavlovskikh, I., P.K. Bhartia and T. McElroy, 2004: Assessment of information content of automated Dobson and Brewer Umkehr measurements. *Proceedings of the Quadrennial Ozone Symposium* (C.S. Zerefos, ed.), University of Athens.

Rodgers, C.D., 1976: Retrieval of atmospheric temperature and composition from remote measurements of thermal radiation. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 14, pp. 609–624.

Rodgers, C.D., 1990: Characterization and error analysis of profiles retrieved from remote sounding measurements. *Journal of Geophysical Research*, 95, (DS) pp. 5587–5595.

Schneider, N.O., O. Lezeaux, J. de la Noë, J. Urban and P. Ricaud, 2003: Validation of ground-based observations of stratomesospheric ozone. *Journal of Geophysical Research*, 108, (D17) 4540, doi: 10.1029/2002JD002925.

SCI-TEC, 1993: *The Brewer Ozone Spectrophotometer – Maintenance Manual*. SCI-TEC Instruments Inc., publication MM-BA-C05 Rev. J.

Shalamyansky, A.M., 2003: Personal communication with the WMO SAG-Ozone.

Staehelin, J., A. Renaud, J. Bader, R. McPeters, P. Viatte, B. Hoegger, V. Bugnion, M. Giroud and H. Schill, 1998: Total ozone series at Arosa, Switzerland: Homogenization and data comparison. *Journal of Geophysical Research*, 103, D5, pp. 5827–5842.

Tsou, J.J., B.J. Connor, A. Parrish, I.S. McDermid and W.P. Chu, 1995: Ground-based microwave monitoring of middle atmosphere ozone: Comparison to Lidar and stratospheric and gas experiment II satellite observations. *Journal of Geophysical Research*, 100, D2, pp. 3005–3016.

Vanicek K., 2003: *Calibration History of the Dobson 074 and Brewer 098 Ozone Spectrophotometers*. Publication of the Czech Hydrometeorological Institute, Prague.

Vanicek, K., M. Stanek and M. Dubrovsky, 2003: *Evaluation of Dobson and Brewer Total Ozone Observations from Hradec Kralove*, Czech Republic, 1961–2002. Publication of the Czech Hydrometeorological Institute, Prague.

Wardle, D.I., W.F.J. Evans, H. Fast, A.J. Forester, G.S. Henderson, J.B. Kerr and R.K.R. Vupputuri, 1987: *Stratospheric Ozone Science in Canada. An Agenda for Research and Monitoring*. Internal Report of the Atmospheric Environment Service No. ARD-87-3, Toronto.

World Meteorological Organization, 1980: Operations Handbook – *Ozone Observations with a Dobson Spectrophotometer* (W.D. Komhyr). WMO Global Ozone Research and Monitoring Project Report No. 6, Geneva.

World Meteorological Organization, 1982*a*: R*eview of the Dobson Spectrophotometer and its Accuracy* (R.E. Basher). WMO Global Ozone Research and Monitoring Projectc Report No. 13, Geneva.

World Meteorological Organization, 1982*b*: *The Stratosphere 1981 Theory and Measurements*. WMO Global Ozone Research and Monitoring Project Report No. 11, Geneva.

World Meteorological Organization, 1990: *Report of the International Ozone Trends Panel*: 1988. WMO Global Ozone Research and Monitoring Project Report No. 18, Geneva.

World Meteorological Organization, 1992: *Measurement of Atmospheric Ozone Profiles Using the Brewer/ Mast Sonde: Preparation, Procedure, Evaluation* (H Claude, R. Hartmannsgruber and U. Köhler). WMO Global Ozone Research and Monitoring Project Report No. 17, WMO/TD-No. 179, Geneva.

World Meteorological Organization, 1994: *Survey of WMO-sponsored Dobson Spectrophotometer Intercomparisons* (R.E. Basher). WMO Global Ozone Research and Monitoring Project Report No. 19, WMO/TD-No. 657, Geneva.

World Meteorological Organization, 1998: SPARC/*IOC/ GAW Assessment of Trends in the Vertical Distribution of Ozone* (N. Harris, R. Hudson and C. Phillips). WMO Global Ozone Research and Monitoring Project Report No. 43, WMO/TD-No. 935, Geneva.

World Meteorological Organization, 2001*a*: *Reports on WMO International Comparisons of Dobson Spectrophotometers: Part I: Arosa, Switzerland, 19–31 July 1999; Part II: Buenos Aires, Argentina, 19 November–12 December 1999; Part III: Pretoria, South Africa, 18 March-10 April 2000* (R. D. Evans). Global Atmosphere Watch Report No. 138, WMO/TD-No. 1016, Geneva.

World Meteorological Organization, 2001*b*: *WMO/ CEOS Report on a Strategy for Integrating Satellite and Ground-based Observations of Ozone*. Global Atmosphere Watch Report No. 140, WMO/ TD-No. 1046, Geneva.

World Meteorological Organization, 2002: *WMO GAW International Comparisons of Dobson Spectrophotometers at the Meteorological Observatory Hohenpeissenberg, Germany: 21 May–10 June 2000 and 23 July–5 August 2000; 10–23 June 2001 and 8–21 July 2001* (U. Köhler). Global Atmosphere Watch Report No. 145, WMO/TD-No. 1114, Geneva.

World Meteorological Organization, 2003: *Comparison of Total Ozone Measurements of Dobson and Brewer Spectrophotometers and Recommended Transfer Functions* (J. Staehelin, J. Kerr, R. Evans and K. Vanicek). Global Atmosphere Watch Report No. 149, WMO/TD-No. 1147, Geneva.

World Meteorological Organization, 2004*a*: *JOSIE-1998: Performance of ECC Ozone Sondes of SPC-6A and ENSCI-Z Type* (H.G.J. Smit and W. Straeter). Global Atmosphere Watch Report No. 157, WMO/TD-No. 1218, Geneva.

World Meteorological Organization, 2004*b*: *The Changing Atmosphere: An Integrated Global Atmospheric Chemistry Observation Theme for the IGOS Partnership*. Global Atmosphere Watch Report No. 159, WMO/TD-No. 1235, Geneva.

Zommerfelds, W.C. K.F. Kunzi, M.E. Summers, R.M. Bevilacqua and D.F. Strobel, 1989: Diurnal variations of mesospheric ozone obtained by ground-based microwave radiometry. *Journal of Geophysical Research*, 94, pp. 12819–12832.

ГЛАВА 17

ИЗМЕРЕНИЕ АТМОСФЕРНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ

17.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Основная цель настоящей главы – ознакомить специалистов по приборам с методами измерения различных компонентов атмосферы. При этом особое внимание будет уделено антропогенным компонентам, которые можно объединить под общим названием «загрязняющие вещества». Такие измерения часто сопровождаются измерением основных метеорологических параметров, о чем уже говорилось в предыдущих главах.

К числу основных задач, для решения которых проводятся эти измерения, относятся: изучение изменения климата, принятие мер для уменьшения негативного воздействия на окружающую среду и для непосредственной защиты здоровья человека. Для координирования проводимых странами-членами ВМО измерений загрязнения атмосферы в рамках ВМО была учреждена Глобальная служба атмосферы (ГСА).

Программа ГСА охватывает многие виды деятельности по мониторингу и научным исследованиям, включая изучение химических и физических свойств атмосферы. Она используется в качестве системы раннего обнаружения изменения содержания парниковых газов в атмосфере, и в озоновом слое, переноса на дальние расстояния загрязняющих атмосферу веществ, кислотности и токсичности дождей и содержания в атмосфере аэрозолей. ГСА была утверждена Исполнительным советом ВМО в июне 1989 г. и предназначалась для укрепления и координации деятельности ВМО в рамках программы сбора данных об окружающей среде, начатой в 50-х годах. ГСА объединила в себе Глобальную систему наблюдений за озоном (ГСНОЗ), сеть станций мониторинга фонового загрязнения воздуха (БАПМоН) и другие более мелкие сети. ГСА обеспечивает и разрабатывает структуру сети, стандарты, программу интеркалибровок и системы сбора данных для глобального мониторинга и оценки данных.

К основным определяемым параметрам атмосферы относятся следующие:

(a) парниковые газы: которые включают диоксид углерода, хлорфторуглеводороды, метан и закись азота;
(b) озон: включая приземное содержание озона, общее содержание озона, вертикальный профиль и газы-предшественники;
(c) радиация и оптическая плотность или прозрачность атмосферы: включая мутность, солнечную радиацию, излучение УФ-В диапазона, дальность видимость, общее содержание аэрозольных частиц в атмосфере и общее содержание водяного пара;
(d) химический состав выпадения: включая сухое и влажное выпадение соединений серы и азота и влажное выпадение тяжелых металлов (с атмосферными осадками);
(e) химически активные газы: включая диоксид серы и восстановленные соединения серы, оксиды азота и восстановленные соединения азота, моноксид углерода и летучие органические соединения;
(f) концентрация частиц аэрозоля и их состав
(g) радионуклиды: включая криптон-85, радон, тритий и изотопный состав выборочных веществ.

Приборы и методы, используемые для количественного и качественного определения состава атмосферы, весьма сложны, и работа с ними иногда вызывает затруднения. Поэтому для обеспечения получения точных и надежных данных измерений чрезвычайно важно помимо правильной эксплуатации регулярно проводить калибровку оборудования и следить за обеспечением качества. Получение хороших результатов по большинству описанных в настоящем документе видов измерений невозможно без активного привлечения квалифицированного персонала.

17.2 ИЗМЕРЕНИЕ АТМОСФЕРНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ

Точное оперативное измерение атмосферных составляющих атмосферы до сих пор остается трудной задачей, главным образом, из-за очень низкой концентрации химических веществ, представляющих наибольший интерес, необходимости частого проведения сложных измерений и составления протоколов анализа данных, а также из-за проблем, связанных с калибровкой необходимого оборудования. Большое значение имеет надлежащие размещение и установка датчиков/оборудования в соответствии с установленными разработанными правилами измерений. В приведенных ниже разделах кратко описываются процедуры измерения вариаций атмосферных составляющих. Более подробную информацию можно найти в публикации ВМО (WMO, 1993).

17.2.1 **Парниковые газы**

Увеличение содержания парниковых газов, особенно диоксида углерода (CO_2), создает угрозу изменения климата и погоды на земном шаре и может привести к постепенному глобальному потеплению в двадцать первом веке. Величина этого потепления и серьезность его последствий для будущего планеты будут зависеть от содержания парниковых газов в атмосфере. Поэтому мониторинг концентрации парниковых газов является чрезвычайно важным для будущего нашей планеты. К другим парниковым газам, мониторинг за которыми осуществляется в различных местах земного шара, относятся метан (CH_4), хлорфторуглероды (ХФУ) и закись азота (N_2O). Тропосферный озон также рассматривается в качестве одного из парниковых газов.

ВМО проводит мониторинг концентраций CO_2 с 1960-х годов, когда была создана всемирная сеть наблюдений парниковых газов, ставшая составной частью ГСА – основного для ВМО источника информации о химии атмосферы. Мировой центр ВМО по сбору данных по парниковым газам, расположенный в Токио, Япония, был основан в 1990 г. для сбора и архивации всех данных в целях комплексного мониторинга парниковых газов (WMO, 1995 a).

Диоксид углерода

Диоксид углерода – является одним из наиболее распространенных и важных малых газовых примесей в системе Земля–океан–атмосфера. Диоксид углерода имеет как естественные, так и промышленные источники. В рамках естественного цикла углерода CO_2 играет ключевую ролей в ряде биологических процессов. Учитывая значение CO_2 в качестве одного из наиболее важных парниковых газов, ученые предпринимают попытки понять его потенциальное воздействие на климат и глобальные изменения.

В настоящее время измерения фоновой концентрации CO_2 в атмосфере проводятся, главным образом, с помощью недисперсионных инфракрасных газоанализаторов (НДИР – NDIR). При применении тщательно откалиброванных эталонных газовых смесей, большинство приборов этого типа позволяют достигать требуемой точности (± 0,1 частей CO_2 на миллион (млн$^{-1}$) частей воздуха при измерении в диапазоне изменения фоновой концентрации 360–390 млн$^{-1}$. В газоанализаторах НДИР источник излучает радиацию в инфракрасном диапазоне, которая проходит как через кювету с калиброванной газовой смесью, так и рабочую кювету через которую прокачивается анализируемый воздух Разность сигналов, обусловленная разностью потоков радиации, прошедших через эти две кюветы и через оптический фильтр, который настроен на полосу поглощения CO_2 с центральной длиной волны 4,25 мкм, позволяет определить разность концентраций CO_2 между обеими газовыми смесями (калибровочной и воздушной), прокачиваемых одновременно через обе кюветы. В обычных условиях эталонные (калибровочные) газовые смеси с постоянной, однако, не обязательно точно известной концентрацией CO_2 прокачиваются через так называемую референтную кювету (референтный канал). Калибровочные газовые смеси (концентрации которых должны перекрывать диапазон реальных вариаций концентрации CO_2 в атмосфере),через определенные промежутки прокачиваются через рабочую кювету, чем обеспечивается калибровка сигнала газоанализатора. Все газы, прокачиваемые через референтную кювету и рабочую кювету предварительно тщательно осушаются, что позволяет представлять результаты измерений мольных долях CO_2 в сухом воздухе.

Для того, чтобы обеспечить глобальную сопоставимость данных измерений фоновой концентрации CO_2, была разработана методика калибровки шкалы, в которой используется система из трех концентраций эталонной (калибровочной) газовой смеси. Система включает в себя первичный, вторичный эталоны CO_2, а также рабочий эталон (калибровочные газовые смеси) CO_2 в сухом воздухе; при этом требуется обмен эталонными газовыми смесями между Центральной калибровочной лабораторией и лабораториями, действующими в рамках различных национальных программ. Калибровочная лаборатория размещается в Отделе глобального мониторинга (GMD) Научно-исследовательской лаборатории земных систем (ESRL) Национального управления по исследованию океана и атмосферы (НУОА, г. Боулдер, штат Колорадо, США). Наблюдения с помощью инфракрасных о газоанализаторов позволяют непрерывно контролировать концентрацию CO_2 в атмосфере, которые периодически сопоставляются с данными измерения калибровочной газовой смеси. Как минимум один раз в неделю проводится калибровочный тест в более широком диапазоне концентраций с использованием вторичного стандарта.

Альтернативный метод измерения CO_2 (обычно применяемый для многих малых газовых примесей) требует забора воздуха в специальные фляги, изготовленные из стекла или из нержавеющей стали. Эти фляги отсылаются в Центральную лабораторию, в которой концентрация CO_2 определяется с помощью НДИР газоанализаторов (Komhyr and others, 1989). Этот метод измерения используется рядом стран в качестве стандартного.

Хлорфторуглероды

Хлорфторуглероды (ХФУ), которые включают ХФУ-11 (CCl_3F) и ХФУ-12 (CCl_2F_2), представляют собой семейство химических соединений, источники которых отсутствуют в естественной среде. С начала их выпуска в 1930-х годах ХФУ использовались в качестве газов-хладагентов, растворителей в промышленном производстве и для сухой очистки, а также в качестве газов-распылителей в аэрозольных баллончиках. Поскольку эти вещества устойчивы к не разрушались в тропосфере, а их производство с течением времени все расширялось, содержание ХФУ в нижней атмосфере возрастало со скоростью примерно 4 процента в год. Ввиду введенных Монреальским протоколом ограничений на использование ХФУ содержание ХФУ-11 начало снижается примерно на 1 процент в год, однако, содержание ХФУ-12 все еще увеличивается примерно на 1 процент в год.

ХФУ вносят вклад в парниковый эффект. Однако они являются и источником атомарного хлора в атмосфере, который и приводят к разрушению озона, что особенно заметно проявляется над Антарктикой. ХФУ характеризуются продолжительным временем жизни в атмосфере.

Стандартный метод измерения концентрации ХФУ заключается в предварительной осушке от влаги и последующей инжекции в газовый хроматограф. Для измерения концентрации различных ХФУ используются электронозахватные детекторы. Для получения абсолютных значений концентрации газа в воздухе необходимо периодически выполнять измерения калибровочного газа. Альтернативой непрерывным измерениям концентрации газов на станциях является отбор проб воздуха в очищенные фляги из нержавеющей стали и их отправка в центральную лабораторию для анализа (Prinn and others, 1983).

Закись азота

Закись азота (N2O) – газ, как естественного, так и антропогенногое происхождениякоторый вносит свой вклад в усиление парникового эффекта (вклад N_2O составляет примерно 6 %). Время жизни этого газа в атмосфере очень велико (125 лет), а его концентрация возрастает со скоростью 0,8 частей на миллиард частей воздуха (млрд$^{-1}$) в год. К источникам этого газа относят океаны, процессы связанные со сгоранием ископаемых видов топлива и биомассы, а также почвы, используемые для сельскохозяйственных нужд. Закись азота инертна в тропосфере, а ее сток поглощение происходит в основном за счет фотохимической диссоциации в стратосфере.

Для измерения концентрации N_2O, как и ряда других малых газовых примесей (характеризующихся высоким сродством к электрону), используется газовый хроматограф, оборудованный электронозахватным детектором. Его концентрация определяется посредством сопоставления результата измерений пробы воздуха с результатами измерений калибровочных газовых смесей с известной концентрацией N_2O. Альтернативный метод мониторинга концентрации закиси азота заключается в отборе проб воздуха во фляги, которые отсылаются в центральную лабораторию для анализа (Elkins and others, 1996).

Метан

Метан (CH_4) – наиболее распространенный в атмосфере углеводород. В тропосфере он активно взаимодействует с гидроксильным радикалом (OH) и монооксидом углерода (CO). В стратосфере окисление CH_4 радикалом OH является основным источником водяного пара. Реакция CH_4 с атомами хлора является завершающим этапом в каталитическом разрушении озона хлором. Полоса сильного инфракрасного поглощения метана с центром на длине волны 7,66 мкм, где поглощение его диоксидом углерода (CO_2) и водяным паром (H_2O) является слабым, делает CH_4 эффективным парниковым газом. Однако, причины изменения скорости прироста CH_4 в атмосфере от приблизительно 1 процента в год до стабилизации его концентраций в период 1991–2006 гг., все еще остаются до конца не выясненными.

Большая часть измерений концентрации метана в атмосфере осуществляется с помощью газового хроматографа, оборудованного пламенно-ионизационным детектором. Газохроматографические (ГХ) приборы очень надежны и в техническом отношении более просты в обращении и обслуживании, чем оборудование, основанное на других методах. Обычно CH_4 отделяется от других компонентов в анализируемой воздушной смеси на колонке с молекулярным ситом при постоянной температуре. Предел обнаружения при использовании метода пламенной ионизации для CH_4 составляет менее 20 частей на миллиард по объему (1 млрд$^{-1}$ по объему, что соответствует одной молекуле газа на 109 молекул воздуха). Результаты измерений периодически сравниваются и с концентрацией стандартной смеси.

Для выполнения программы измерений чрезвычайно большое значение имеют стандартные газовые смеси, состоящие из CH_4, отношение смеси которого к сухому воздухе стабильно и точно определено. При исчерпании стандартных смесей CH_4 в сухом воздухе необходимо прокалибровать измерительную шкалу по новым рабочим стандартам.

Возможно применение процедур, обеспечивающих последовательный анализ нескольких проб воздуха В этом случае установка для анализа проб воздуха во флягах должна быть снабжена многоходовым краном-дозатором с автоматическим управлением для обеспечения введения поочередно в аналитическую установку проб воздуха, содержащихся во флягах и стандартного образца. Эту операцию можно выполнять и вручную. В случае полевых приборов для поочередного ввода в установку стандартных и анализируемых образцов воздушных смесей рекомендуется использовать автоматический многоходовой кран для управления потоками газов (воздух и калибровочная смесь).

Альтернативный метод измерения заключается в использовании перестраиваемого диодного лазера для определения концентрации CH_4 по поглощению инфракрасного излучения. Установка и эксплуатация оборудования, использующего этот метод , требует больших затрат и высокой технической квалификации персонала (Fried and others, 1993).

17.2.2 Озон

Хотя на долю озона (O_3) приходится менее 0,5 млн$^{-1}$ в общем составе атмосферы, радиационные и химические свойства этого газа делают его значимым компонентом атмосферы. Методы его измерения описаны в части I, глава 16.

17.2.3 Радиация и оптическая плотность атмосферы

Измерения различных характеристик солнечной радиации и оптической плотности атмосферы необходимы для многих исследований последствий загрязнения атмосферы. Методы соответствующих измерений описаны в Части 1, Глава 7.

17.2.4 Атмосферные выпадения

Некоторые компоненты атмосферы выпадают на поверхность Земли. В приведенных ниже разделах представлены принципы измерения компонентов влажного и сухого выпадения.

Влажные выпадения с дождем и снегом, являются хорошими накопителями химических составляющих и веществ в виде частиц, находящихся в атмосфере; для определения химического состава атмосферных осадков необходимо собирать и анализировать эти осадки. Сухое выпадение – это оседание и закрепление аэрозолей и газов на какой-либо поверхности; для его измерения требуется своя собственная система измерений. Данные измерений влажного и сухого выпадения применяются в различных исследованиях воздействий питательных веществ, кислот и токсических веществ и их переноса на большие расстояния.

17.2.4.1 Влажное выпадение

Определение химического состава атмосферных осадков дает возможность получить данные об обмене малыми составляющими между атмосферой и сушей/океанами и поэтому является важным звеном в углублении понимания химических циклов таких веществ, как сера, азот и других примесей.

При планировании проведения измерений для определения химического состава атмосферных осадков необходимо проявлять особую осторожность, чтобы исключить воздействия любых форм местного загрязнения, таких как пыль, либо следы жира или пота от прикосновений человека, поскольку это может привести к искажению результатов измерений. При этом необходимо строго придерживаться требований, предъявляемых к конкретному местоположению и правилам проведения оперативных действий. (Bigelow, 1987).

Мониторинг химического состава атмосферных осадков может быть подразделен на два основных этапа: отбор проб и лабораторный анализ В начале выпадения осадков (твердых или жидких) начинает действовать осадкосборник с автоматически открывающейся-закрывающейся крышкой или при условии использования ручного, пробоотборника с него снимается крышка. Количество атмосферных осадков регистрируется по национальному осадкомеру. Оптимальными периодами времени для сбора атмосферных осадков являются либо неделя, либо сутки в зависимости от имеющихся финансовых средств и персонала, а также от предназначения данных. Имеющийся опыт мониторинга позволяет считать, что наиболее целесообразным с научной точки зрения является ежесуточный отбор проб, когда пробоотборник проверяется в заданное время ежесуточно, поскольку в этом случае можно быстро обеспечить сохранность проб и предотвратить биологическое разложение неустойчивых соединений. Кроме того, суточными данными легче манипулировать при работе с моделями «источник–приемник». В рамках недельного протокола все случаи выпадений объединяются за семисуточный период, что может повлиять на измерения некоторых ионов, но при этом вполне определенно снижаются затраты на программу. В некоторых сетях кислотность (pH) и удельная проводимость определяются на месте, как часть контроля качества выполнения программы, а к пробам перед их отправкой в лабораторию добавляются биоциды (например, хлороформ или тимол) (Keene and Galloway, 1984; Gillett and Ayers, 1991).

Этап проведения анализа начинается после того, как проба поступает в лабораторию или на анализирующую установку. Для оптимизации результатов анализа и обеспечения высокого качества рекомендуется обращаться в центральную и/или национальные лаборатории, эффективность работы которых проверяется на регулярной основе в рамках программ ГСА по обеспечению качества. В этих лабораториях определяются основные ионы (сульфат (SO_4^{2-}), хлорид (Cl^-), нитрат (NO_3^-), водород (H^+(pH)), кальций (Ca^{2+}), магний (Mg^{2+}), натрий (Na^+), аммоний (NH_4^+) и калий (K^+)). Биогенные кислоты, такие как муравьиная и уксусная, являются важным источником свободной кислотности в чистых районах, и их следует измерять на фоновых станциях (Keene, Galloway and Holden, 1983). Удельная проводимость также обычно измеряется, как часть полной программы для обеспечения качества. В разных лабораториях используются самые разнообразные методы анализа, хотя для автоматизированного анализа предпочтительно применение таких методов, как ионная хроматография и атомно-абсорбционная спектрофотометрия (James, 1991).

17.2.4.2 Сухое выпадение

Понятие *«сухое выпадение»* обычно применяется к любому обмену химическими веществами между атмосферой и поверхностью, который происходит в периоды отсутствия атмосферных осадков. Однако этот термин может вводить в заблуждение, поскольку некоторые химические вещества постоянно находятся в процессе обмена с атмосферой. Обмен между атмосферой и поверхностью – сложный процесс, скорость которого определяется многими факторами, включая турбулентность и стратификацию атмосферы, химические и физические характеристики осаждающихся соединений, наличие и величину градиента концентрации химического компонента в атмосфере и на подстилающей поверхности, а также химические, физические (высота, площадь поверхности и т.д.) и биологические характеристики растительности подстилающей поверхности.

Сухое выпадение – это медленный, но постоянный поток на подстилающую поверхность загрязняющих веществ, находящихся в атмосфере. Он резко отличается от влажного выпадения, который представляет собой быстрый процесс доставки довольно сконцентрированных загрязняющих веществ с атмосферными осадками. К тому же в процесс сухого выпадения неизбежно вовлечены загрязняющие вещества, находящиеся в самых нижних слоях атмосферы, т.е. в воздухе, который контактирует с поверхностью. Значение сухого выпадения в большинстве районов земного шара никогда не было надлежащим образом изучено. Сухое выпадение является, как правило, гораздо более локальной проблемой, чем влажное выпадение. Тем не менее, в индустриально развитых районах сухое выпадение имеет большое значение в региональном масштабе, поскольку там существует большое число источников выбросов, обычно связанных с производством энергии. Во многих районах сухое выпадение является, как минимум, таким же важным, как и влажное.

Существует много методов для оценки сухого выпадения в каком-либо конкретном пункте. Ниже рассматриваются два общепринятых подхода, а именно, измерения вихревого потока и мониторинг сухого выпадения на основе улавливания. Другие методы, такие как измерение выпадений под пологом леса, а также накоплений в снежном покрове в настоящем Руководстве не рассматриваются.

Измерения соотношения вихревого потока применяются в отношении некоторых основных загрязняющих веществ (диоксида серы (SO_2), озона (O_3), оксидов азота (NO_x) и т.д.). При этом проводится прямое измерение при использовании быстро и медленно реагирующего метеорологического оборудования и быстро реагирующих (> 1 Гц) химических датчиков для сравнения с оценками улавливания. Надежные данные измерений потока можно получить используя микрометеорологические методики при условии, что пользователь работает в рамках довольно точно определенной общей теоретической схемы, которая в некоторой степени зависит от измеряемых малых газовых примесей или разновидностей частиц. Хороший обзор микрометеорологической теории и краткое обобщающее описание химических датчиков и микрометеорологических методов, используемых для измерения турбулентных потоков, приведены в работе Baldocchi, Hicks and Meyers (1988).

На станциях мониторинга сухого выпадения на основе улавливания используются регистраторы текущих данных и усредненные измерения метеорологических параметров, а также применяются наборы фильтров для взятия проб интегрированных по времени проб. В то время как метеорологические данные усредняются, как правило, за периоды в 30 мин, наборы фильтров заменяются раз в неделю. В настоящее время для регулярного использования применяются наборы фильтров нескольких конфигураций. В обычной конфигурации впереди устанавливается тефлоновый предфильтр для устранения частиц из потока воздуха, затем идут второй, нейлоновый фильтр для устранения азотной кислоты и третий фильтр из целлюлозы, пропитанной, например, карбонатом калия (K_2CO_3), для улавливания серы. Обычно K_2CO_3 применяется для очистки фильтров (перед их использованием), а

раствор гидроксида калия используется для пропитки целлюлозы. Другие методы включают использование барботеров, денудеров и пассивных пробоотборников; однако, в отличие от наборов фильтров, эти методы не нашли широкого применения в сетях измерений. В перечень необходимых метеорологических данных входят данные о скорости ветра, стандартном отклонении направления, приходящей коротковолновой солнечной радиации, температуре и влажности воздуха, влажности поверхности и количестве атмосферных осадков. Подробное описание методов измерений сухого выпадения на основе улавливания приведено в работе Hicks and others (1991).

17.2.5 Химически активные газы

В число химически активных газов, мониторинг которых осуществляет ГСА, входят CO, SO_2 и NO_x. Хотя эти газы не вносят непосредственного вклада в парниковый эффект, они могут влиять на химические процессы, происходящие в атмосфере между основными парниковыми газами и OH-радикалом в атмосфере. Кроме того, являясь загрязняющими газами, они оказывают большое влияние на состояние приземного слоя атмосферы. Например, SO_2 и NO_x вступают в фотохимические реакции и являются основными предшественниками кислотных дождей. Оксиды азота также играют чрезвычайно важную роль, влияя на концентрацию тропосферного O_3 в фотохимическом смоге в приземном слое атмосферы и масштабы заболачивания в прибрежных эстуариях.

17.2.5.1 Моноксид углерода

В тропосфере в отсутствие техногенного воздействия над не городскими районами CO часто является основным стоком OH. Он является одним из компонентов, участвующих в серии фотохимических реакций, в результате которых окисляются восстановленные соединения углерода, азота и серы из состава малых газовых примесей. Хотя CO непосредственно не вносит вклад в парниковый эффект, его влияние на концентрацию OH-радикала приводит к тому, что концентрации CO в атмосфере (с временем жизни несколько месяцев) воздействуют на климат, поскольку они косвенным образом влияют на концентрации многих парниковых газов.

Существует несколько аналитических методов, с помощью которых можно измерить концентрацию CO на разных уровнях в атмосфере. Измерения могут проводиться с помощью газового хроматографа, оборудованного пламенно-ионизационным, либо ртутным детектором (Peterson and Rosson, 1993). Может также быть использована и аппаратура, основанная на недисперсионном инфракрасном методе. При использовании метода газовой хроматографии применяются установленные друг за другом две колонки, в первой из которых с помощью силикагеля удаляются посторонние примеси, а во второй происходит разделение CO, водорода (H_2) и CH_4 на сорбенте типа «молекулярное сито». При использовании метода пламенной ионизации CO, прежде чем попасть в детектор сначала поступает на метанатор, который каталитически преобразует его в CH_4. В этом случае для измерения концентраций CH_4, и CO (а также и других углеводородов) может использоваться один и тот же газовый хроматограф. При этом легко достигается точность измерений 5–10 %. При использовании ртутного детектора, основанного на методе восстановления оксида ртути (HgO), продуваемый через реакционную камеру CO реагирует с нагретым до 260–300 °C (оксид ртути), одним из продуктов реакции которого с HgO являются пары ртути (Hg), концентрация которых определяется по поглощению ими УФ излучения на длине волны 254 нм. Этот метод позволяет измерять и концентрацию H_2 в воздухе Погрешность измерений составляет порядка 1–2 %. Детекторы на основе HgO в диапазоне вариаций концентраций CO в атмосфере не обеспечивают линейности сигнала; однако нелинейность можно свести к минимуму, используя несколько калибровочных стандартов. Методы, основанные на использовании газового хроматографа для определения концентрации CO в пробах воздуха требуют калибровки шкалы хроматографа по калибровочным стандартам (Novelli and others, 1994).

Спектроскопия, основанная на использовании перестраиваемого диодного лазера также позволяет измерять концентрации CO в окружающем воздухе по поглощению инфракрасного излучения. Недостатком этого метода являются более высокие, чем при использовании газовой хроматографии, первоначальные затраты, потребность в высококвалифицированном техническом персонале для его обслуживания, а также то, что они недостаточно приспособлены для дистанционного управления (Sachse and others, 1987).

Чрезвычайно важным для программ, в рамках которых для измерения CO используются газовая хроматография, газо-жидкостная хроматография, НДИР, или спектроскопия с использованием перестраиваемого диодного лазера, являются образцовые (калибровочные) газовые смеси оксида углерода в сухом воздухе с тщательно определенными значениями концентрации CO. В прошлом было довольно трудно получить стандарты CO, соответствующие вариациям его концентраций в атмосфере высокого качества, соответствующие диапазону его вариаций в атмосфере. ВМО поручила назначила Earth Systems Research Laboratory (ESRL) – Лаборатории исследования земных систем (Боулдер, штат Колорадо, Соединенные

Штаты Америки), выполнять функции Центральной калибровочной лаборатории по CO (держателя Первичного стандарта). ESRL работает в сотрудничестве с Институтом исследования атмосферы и климата (ранее входившего в институт Фраунгофера Гармиш-Партенкирхен, Германия), Швейцарской федеральной лабораторией по проверке и исследованию материало Empa (Дюбендорф, Швейцария) и группой по исследованию закиси азота и галогенсодержащих соединений (NOAA/ESRL, Соединенные Штаты Америки) с целью обеспечения научного сообщества высококачественными калибровочными смесями CO в сухом воздухе. Однако при сравнениях данных, полученных ранее различными лабораториями, для оценки изменений концентрации CO в пространстве и во времени все еще следует соблюдать осторожность. Это связано, прежде всего, с тем, что для калибровки могли быть использованы различные калибровочные шкалы, различие между которыми иногда могло достигать 30 % (Weeks and others, 1989). Кроме того, низкие концентрации калибровочной смеси CO в баллонах высокого давления, могут медленно изменяться со временем.

Существенные проблемы могут возникают при измерении концентрации CO в пробах воздуха, содержащихся во флягах при их недостаточной очистке от загрязнений. Пробы воздуха, содержащиеся во флягах, анализируются обычно с использованием метода газовой хроматографии. Концентрация моноксида углерода может в значительной степени изменяться (увеличиваться или уменьшаться) за период от нескольких дней до нескольких недель во флягах различных типов. Поэтому до того как начать полевые измерения необходимо очень тщательно проверить качество очистки фляг и подводящих рабочих магистралей (трубок) на загрязнения.

17.2.5.2 Диоксид серы

Источниками диоксида серы (SO_2) в атмосфере являются: моря, вулканическая деятельность, антропогенные выбросы и процессы разложения биомассы. Срок существования диоксида серы составляет обычно от нескольких часов до нескольких суток. Концентрация диоксида серы в отдаленных районах может составлять менее 0,05 млрд$^{-1}$ по объему, в то время как в городских районах она может превышать 10 млрд$^{-1}$ по объему. Концентрации SO_2 в шлейфах дымовых труб электростанций и вулканических извержений могут достигать 1000 млрд$^{-1}$ по объему. Диоксид серы относится к парниковым газам, поскольку поглощает инфракрасное излучение. Однако в связи с тем, что содержание диоксида серы в атмосфере существенно ниже по сравнению с содержанием других парниковых газов, он относится к малозначащим парниковым газам.

Диоксид серы – малая газовая примесь, которая активно влияет на климат. Это происходит вследствие того, что в атмосфере диоксид серы вступает в фотохимические реакции (газофазные реакции) и реакции с находящимися в воздухе частицами (гетерогенные реакции), в результате которых образуются сульфаты. Находящиеся в атмосфере частицы сульфатов являются активными ядрами конденсации способствующими образованию облачности. Увеличение числа облачных ядер конденсации в глобальном масштабе может привести к повышению альбедо облаков (Charlson and others, 1987). Увеличение числа частиц сульфатов в стратосфере может привести к увеличению масштабов отражения коротковолнового излучения обратно в космос (Charlson and others, 1991). Диоксид серы (газ) играет также значительную роль в образовании кислотных осадков. Из него образуются частицы сульфатов. Эти частицы возвращаются на поверхность Земли в процессе сухого осаждения или осадков Оба процесса создают повышенную кислотность на участках, где происходит осаждение или выпадение осадков, что может причинить ущерб чувствительным к кислотам экосистемам.

Содержание SO_2 можно измерять непрерывно, используя либо импульсный флуоресцентный анализатор, либо пламенно-фотометрический анализатор. Постоянная времени флуоресцентного датчика импульсов достаточно большая , однако, простота его калибровки, надежность, точность и приспособленность для измерений SO_2 делают его использование предпочтительным (Luke, 1997; Kok and others, 1990). Существуют также и более чувствительные методы с использованием газового хроматографа. Эти методы требуют достаточно высокой технической экспертизы и регулярного внимания. Концентрация SO_2 может измеряться также с использованием фильтров, что позволяет получать потенциально более точные результаты. Этот метод требует использования дополнительной техники и требует регулярного внимания, а затраты на анализы с помощью фильтров высоки.

Поскольку время существования SO_2 в атмосфере невелико, то для понимания цикла серы необходимо данные об ее источниках стоках. Желательно, чтобы частота отбора образцов воздуха при этом не превышала 1 ч. Таким образом, для долгосрочного мониторинга содержания SO_2 лучше всего подходит комбинированное использование флуоресцентного анализатора импульсов и анализ проб воздуха с помощью фильтров. Пробы воздуха для анализа с помощью фильтров должны отбираться в течение определенных интервалов времени, однако достаточно часто, для того чтобы обеспечить возможность контроля качества измерений для непрерывно работающего анализатора.

Поскольку срок существования SO_2 в атмосфере невелик, для понимания цикла серы необходимо получить данные об его источниках и стоках Желательно, чтобы частота отбора образцов воздуха при этом не превышала 1 ч. Таким образом, для продолжительного мониторинга содержания SO_2 лучше всего подходит комбинированное использование флуоресцентного анализатора импульсов и анализ проб воздуха с помощью фильтров. Пробы воздуха для анализа с помощью фильтров должны отбираться через определенные интервалы времени, однако достаточно часто, для того чтобы служить средством контроля качества для постоянно действующего анализатора.

Диоксид серы является химически активным газом. Он может сорбироваться стенками всасывающих патрубков или окисляться внутри капель воды, сконденсировавшейся на стенках трубок. Поэтому всасывающие трубки должны изготавливаться из инертных материалов, например, из нержавеющей стали, быть как можно короче и иметь термостатический подогрев на случай возникновения конденсации влаги. Измерение с использованием фильтра типа PEA Teflon допускается после проведения соответствующих тестов, чтобы предотвратить потери SO_2 от ненадлежащих фильтровых материалов.

Краткое описание методов приводится в специальном выпуске *«Journal of Geophysical Research» («Журнал геофизических исследований»)*, в котором рассматривается эксперимент «Gas-Phase Sulfur Intercomparison Experiment» (GASIE) (Эксперимент по сравнениям методов измерений газообразной серы (ГАСИЕ)), начиная с обзора эксперимента в [Stecher and others, 1997].

17.2.5.3 Оксиды азота

Оксиды азота (NO_x) образуют большое семейство малых газовых примесей, которые распространены повсеместно в тропосфере Земли. Они образуются в ходе как антропогенных (сжигание топлива), так и естественных (сгорание биомассы, воздействие молний, деятельность микроорганизмов почвы) процессов; одним из источников NO_x также считается перенос оксидов азота из стратосферы. Оксиды азота NO_x оказывают определяющее влияние на концентрацию озона в воздухе и вносят значительный вклад в образование кислотных осадков, особенно в Северной Америке. Хотя потребность в сведениях о содержании этих соединений бесспорна даже при концентрациях порядка нескольких частей на триллион по объему (что соответствует одной частице NO_x на 10^{12} молекул воздуха), в настоящее время имеется очень мало данных наблюдений за пределами урбанизированных районов ввиду отсутствия высокочувствительного оборудования, трудности точного измерения NO_x и потребности в высокой квалификации персонала и их подготовке, необходимых для надежного измерения NO_x при таких низких концентрациях. Наиболее важными среди них являются: оксид азота (NO), диоксид азота (NO_2) (сумма этих двух соединений часто обозначается как NO_x), азотная кислота (HNO_3), аэрозольный нитрат и пероксиацетилнитрат (ПАН). NO и NO_2 являются первичными соединениями, в то время как другие из перечисленных выше соединений представляют собой продукты их химических превращений в атмосфере. Особый случай представляет закись азота (N_2O); которая в отличие от других соединений имеет низкую химическую активность в тропосфере. Поведение этого соединения в значительной степени отличается от поведения всех других оксидов азота чрезвычайной инертностью в тропосфере. Это соединение рассматривается в разделе 17.2.1 в качестве одного из парниковых газов.

При измерении концентрации этих газов следует иметь в виду, что химические реакции с участием этих соединений происходят, как правило, быстро, а наиболее качественные данные по NO_x часто относятся к сумме всех соединений (за исключением N_2O), часто обозначаемой как общий химически активный азот (NO_y). При проведении измерений необходимо принимать меры предосторожности, с тем, чтобы предотвратить влияние человека на результаты измерений. Поскольку концентрации NO_x являются очень низкими даже в наименее удаленных районах, то необходимо проявлять большую осторожность, чтобы свести к минимуму возможное загрязнение от любого вида моторизованного транспорта, являющегося одним из основных источников NO_x (а также CO и SO_2) (United States Environmental Protection Agency, 1996).

Оксид азота и диоксид азота

Надежные измерения содержания оксида азота (NO) и диоксида азота (NO_2) на фоновых уровнях можно проводить с помощью приборов, основанных на хемилюминесценции NO (при взаимодействии с O_3) или NO_2 (косвенно используя хемилюминесценцию после преобразования его в NO). Содержание NO_2 можно также измерять непосредственным образом, используя раствор люминола. Однако коммерческие приборы этого типа недостаточно чувствительны. Для измерения малых концентраций требуются детекторы исследовательского класса или специально модифицированные детекторы.

Метод, основанный на хемилюминесценции O_3 – это метод непрерывных измерений, основанный на детектировании фотонов, высвобождающихся при реакции O_3 с NO. Окружающий воздух засасывается в

реакционную камеру при контролируемой скорости его потока, создаваемого с помощью механического вакуумного насоса и устройства, контролирующего массу прокачиваемого воздуха. Озон вырабатывается самим прибором при пропускании потока чистого сухого кислорода через высоковольтный электрод, после которого полученный в результате электролиза O_3 направляется в реакционную камеру, в которой он реагирует с NO поступающего с прокачиваемым в потоком воздуха, в результате чего образуется NO_2. Молекулы NO_2 переходят в электронно-возбужденное состояние, и часть молекул испускает фотон по мере перехода обратно в основное состояние. Для определения спектра эмиссии применяется чувствительный к красному свету фотоэлектронный умножитель. Как упомянуто выше, NO_2 должен быть преобразован в NO до процесса его детектирования. Обычно преобразование всех химически активных соединений азота NO_y в NO осуществляется с помощью нагретых молибденовых или золотых поверхностей. Фотолитическое преобразование – наиболее селективный метод измерения концентрации NO_2, но для него характерны незначительные помехи со стороны азотистой кислоты (HONO), нитратов (NO_3) и ПАН.

Приборы, подходящие для градиентных измерений (метод измерений сухого осаждения), можно приобрести на коммерческой основе. Изготовленные по специальному заказу приборы применялись при различных исследованиях, основанных на методе корреляции вихревых потоков NO из почв (Luke and Valigura, 1997).

Содержание диоксида азота может быть непосредственно измерено и при хемилюминесцентной реакции с люминолом ($C_8H_7N_3O_2$). Раствор люминола пропускается с контролируемой скоростью вниз по фитилю из ткани перед фотоэлектронным умножителем, при этом в результате хемилюминесценции испускаются фотоны голубой. области света. Существуют коммерческие варианты этого прибора; данный метод позволяет проводить измерения быстро при хорошей чувствительности, однако к его недостаткам относится нелинейность сигнала при концентрациях NO_2 ниже 2–3 млрд$^{-1}$ по объему; кроме того, для этого метода характерны незначительные помехи со стороны O_3 и значительные помехи со стороны ПАН (Luke and Valigura, 1997). Приборы нужно часто корректировать для учета обусловленного температурой дрейфа калибровки и смещения в нулевой линии.

Пероксиацетилнитрат

Пероксиацетилнитрат (ПАН) присутствует повсеместно в тропосфере и обычно в большом количестве в загрязненном воздухе над городскими районами, что связано с химической активностью многих углеводородов антропогенного происхождения. ПАН может переноситься на большие расстояния при низких температурах и может наблюдаться и в высоких широтах. Исследований, посвященных ПАН, сравнительно мало, однако это вещество может играть важную роль вследствие своей фитотоксичности и распространенности над городскими районами. Подробный обзор источников, стоков и химического поведения ПАН в атмосфере приведен в работе Roberts (1990).

ПАН обычно измеряется с помощью автоматического газового хроматографа оборудованного либо электронозахватным детектором, либо устройством для термического разложения с последующим детектированием NO_2 за счет хемилюминесценции люминола. Недостатком применения детектора с использованием люминола заключается в его чувствительности к NO_2. Основная проблема при измерениях ПАН заключается в недостоверности калибровки.

Азотная кислота и аэрозольные нитраты

Первичным антропогенным азотным соединением, выбрасываемым в атмосферу, является NO, который быстро преобразуется в NO_2 и затем в несколько этапов, главным образом, в азотную кислоту (HNO_3), которая активно осаждается на земную поверхность в результате действия механизма сухого и влажного осаждения (в виде осадков). Более подробную информацию о процессе осаждения см. в разделе 17.2.4.1.

Мониторинг содержания азотной кислоты и аэрозольных нитратов можно проводить с помощью фильтров. При этом для стандартной процедуры требуется использовать последовательно ряд фильтров: первый фильтр, тефлоновый, предназначен для захвата аэрозольных частиц, включая аэрозольные нитраты; затем следует нейлоновый фильтр или фильтр со специальной пропиткой основания для захвата кислых газов, включая HNO_3. Эти фильтры обычно устанавливаются на несколько часов на пути потока воздуха, прокачиваемого со скоростью в несколько литров в минуту через камеру с фильтрами. . Потом фильтры транспортируются в лабораторию, где проводится экстрагирование от других примесей, а затем анализ на содержание ионов нитрата с помощью ионной хроматографии. В целях получения точных данных о количестве отобранного воздуха, необходимо постоянно контролировать скорость потока воздуха. Наиболее серьезная проблема, связанная с применением метода использования набора фильтров, заключается в потенциальной возможности получения искаженных результатов из-за накопления и возгонки частиц аммониевой селитры (NH_4NO_3). Этих проблем можно

в значительной степени избежать, если установить более короткое время для отбора воздуха на фильтры. (Anlauf and others, 1985; Luke and Valigura, 1997).

Для измерения HNO_3 существуют и другие альтернативные методы. Иногда используются денудеры с целью удаления летучих компонентов, однако их применение не столь широко распространено, как применение метода осаждения на фильтры, поскольку соответствующая процедура весьма трудоемка (Luke and Valigura, 1997). Существуют также методы с использованием камеры для туманообразования, которые были разработаны в качестве альтернативы методу с использованием фильтров. В работе Klemm and others (1994) представлены результаты проверок этой методологии в условиях канадской тайги в ходе осуществления последней полевой программы.

Общее содержание химически активного азота

В совокупности набор оксидов азота известен как общий химически активный азот (NO_y) и выглядит следующим образом:

$$NO_y = NO + NO_2 + NO_3 + HONO + HNO_3 + HO_2NO_2 + 2[N_2O_5] + PAN + RONO_x + NO_3^- + ...$$

Где: NO_x представляет собой сумму NO и NO_2. Каждое из этих соединений ведет себя по-разному в атмосфере и осаждается с разной скоростью. Многие из этих соединений присутствуют в ничтожном количестве, и их трудно преобразовать количественно для измерения в качестве эквивалента NO. NO_y измеряется после преобразования каждого из этих соединений в NO, и измерения концентрации этих соединений, как это было описано выше. Это преобразование проводят путем пропускания потока воздуха через золотую трубку конвертера, в которой поддерживается температура примерно 300 °C, вместе с небольшим количеством либо чистого CO, либо водорода (Luke and Valigura, 1997). Также могут использоваться нагретые молибденовые экраны, проволоки или трубки (температура ~ 300–350 °C) без необходимости добавления CO и водорода.

17.2.6 Химические свойства твердых частиц в атмосфере

Химический состав твердых частиц в атмосфере может оказывать разностороннее воздействие на окружающую среду. Токсичные аэрозольные частицы, содержащие такие тяжелые металлы (например, свинец (Pb), кадмий (Cd) или мышьяк (As)), или частицы полулетучих органических загрязняющих соединений (например, полихлордифенил), обладают широким спектром негативного воздействия на животных и человека, включая воздействия на репродуктивную, нервную, иммунную и эндокринную системы, а также на деятельность ферментов в организме (United States Environmental Protection Agency –EPA), 1997). Гигроскопичные аэрозоли, например, состоящие из частиц морской соли, сульфатов и нитратов, являются активными ядрами конденсации для образования облачности, определяя их концентрацию и распределение по размерам капель в облаках и, влияя т.о. на продолжительность существования облаков, их количество и альбедо, а конечном счете и на климат (Parungo and others, 1992). Гидрофобные аэрозоли, состоящие, например, из частиц почвенной пыли и продуктов разложения биологических останков, могут служить в качестве ядер для образования снега, и таким образом, управлять количеством атмосферных осадков. В целях улучшения наших знаний о тенденциях и масштабах воздействий аэрозолей на глобальные климатические изменения важно путем измерений определять пространственную и временную изменчивость химических свойств аэрозолей.

Самым простым методом отбора проб является отбор частиц на фильтры. Пробы могут отбираться в одну стадию единовременно для общего анализа или процесс осаждения их на фильтр может быть разбит на несколько последовательных этапов для селекции частиц по размерам. Эти фильтры с частицами аэрозоля затем направляются в центральную лабораторию для проведения химических анализов. Растворимые аэрозольные частицы могут быть экстрагированы с помощью воды; после чего ионным хроматографом определяется концентрация в них катионов и анионов. Нерастворимые частицы подвергаются, для определения состава входящих в них элементов с помощью таких методов, как инструментальный нейтронный активационный анализ, индуцированное протонами рентгеновское излучение или снятие масс-спектрограммы индуктивно связанной плазмы для определения элементного состава. Анализ полулетучих компонентов проводится обычно с помощью газового хроматографа, обоудованного детектором захвата электронов, либо объединенного с масс-спектрометром (Parungo and others, 1992; Baker, 1997).

Все виды отбора на фильтры, процедуры отбора и проведения анализов должны быть стандартизированы таким образом, чтобы они были идентичны для всех мест, в которых они проводятся. Однако трудно установить идентичные режимы отбора частиц на фильтры для широкого круга веществ, отличающихся как по химическим характеристикам, так и обладающих значительной пространственной и временной изменчивостью, особенно при сравнении атмосферы над городскими и

удаленными от промышленных центров районами. Для многих городских и сельских районов отбор частиц на фильтры в течение 12 часов несколько раз в неделю должен обеспечить адекватное понимание процессов формирования концентрации веществ, в то время как для районов, удаленных от урбанизированных территорий, возможно, следует проводить отбор частиц за более продолжительные интервалы времени. В случаях, когда данные о концентрациях веществ, полученные с помощью фильтров, необходимо объединить с данными, полученными на основе моделей источник-сток, частоту отбора проб, по-видимому, следует устанавливать в соответствии с конкретными метеорологическими условиями (Harris and Kahl, 1990).

17.2.7 Радиоактивные газы

Радиоактивные газы присутствуют в атмосфере в виде малых газовых примесей, которые могут иметь как естественное, так и антропогенное происхождение. В последнем случае радиоактивные газы образуются в основном в результате работы атомных электростанций и ряда других процессов промышленного производства, а также в результате испытаний ядерного оружия. Содержание разных компонентов в атмосфере весьма различно; в достаточно высоких концентрациях радиоактивные газы могут оказывать негативное влияние на человека.

Поведение радиоактивных загрязняющих веществ в атмосфере определяется их химическими и физическими свойствами. В отношении динамики переноса, диффузии, осаждения и конденсации эти вещества похожи на их нерадиоактивные аналоги. Одно возможное исключение из этого общего правила заключается в том, что радиоактивные частицы вызывают ионизацию окружающего воздуха и оставляют заряды на частицах; это может привести к изменению процессов, которые зависят от влияния зарядов. Радиоактивные свойства отдельных радиоизотопов или конкретной смеси радиоизотопов играют важную роль в определении количества и свойств радиоактивных веществ, достигающих приемника, а также результирующей дозы радиации (Slade, 1968).

17.2.7.1 Радон

Радон – это инертный газ, образующийся в результате альфа-распада радия с периодом полураспада, равным 3,82 суток. Поскольку потоки радона от почвы обычно в 100 раз превышают потоки радона от океана, этот газ может использоваться в качестве трассера для определения тех воздушных масс, которые недавно прошли над сушей. Исследования, проводимые в лаборатории Мауна Лоа на Гавайях, позволили определить суточные вариации содержания радона из местных источников и переносимого с воздушными массами с отдаленных континентов. В совокупности с данными других измерений данные о радоне полезны для оценки моделей атмосферного переноса и для определения стандартных атмосферных условий. Вследствие непродолжительности существования радона в атмосфере и больших различий в масштабах эманации с поверхности интерпретация данных измерений радона в высшей степени специфична для каждого конкретного места (Liu, McAfee and Cicerone, 1984; Hansen and others, 1990).

Радон-222 в процессе распада через пять вторичных частиц превращается в свинец-210, который является относительно стабильным и имеет период полураспада, равный 22 годам. Две из этих вторичных частиц проходят стадию альфа-распада. Продукты радиоактивного распада являются химически активными и быстро образуют многоатомные гидратные ионы, которые легко прикрепляются к частицам и поверхностям.

В типичном приборе, предназначенном для мониторинга радона, воздух пропускается через фильтр, на котором собираются все дочерние ядра, но который позволяет свободно проходить инертному газу радону. Затем радон поступает в большую камеру, в которой он находится в течение времени, достаточного для образования его вторичных частиц. Эти частицы собираются на втором фильтре, и их альфа-активность измеряется с помощью сцинтилляционного детектора. Чувствительность этого прибора зависит от ряда факторов, таких как скорость потока, геометрия камеры, эффективность захвата вторичных частиц, интервал времени между отбором образцов и эффективность счетчика. Обычно частота отбора образцов составляет один-два образца в час (Thomas and LeClare, 1970).

17.2.7.2 Криптон-85

Криптон-85 (^{85}Kr) – это радиоактивный инертный газ с периодом полураспада 10,76 года, который излучает, главным образом, бета-частицы со средней энергией в 251 кэВ. Основными источниками ^{85}Kr являются установки по переработке ядерного топлива и различные ядерные реакторы. Примерно 5 % общего содержания ^{85}Kr в атмосфере обусловлено испытаниями ядерного оружия в период между 1945 и 1963 гг.; роль же естественных источников настолько незначительна, что ими можно пренебречь. Радиоактивный распад – практически единственный механизм удаления ^{85}Kr из атмосферы. Современная фоновая концентрация ^{85}Kr в атмосфере составляет примерно 1 Бк/м^3, каждые 20 лет

она удваивается. На этом уровне ^{85}Kr не представляет опасности для человека, однако обусловленная распадом ^{85}Kr ионизация воздуха может повлиять на электрические свойства атмосферы. Если уровни содержания ^{85}Kr в атмосфере будут по-прежнему возрастать, то могут произойти изменения таких атмосферных процессов и свойств атмосферы как электропроводность, ионный ток, состояние магнитного поля Земли, образование ядер конденсации облаков и аэрозолей и частота возникновения молний, а это, в свою очередь, может нарушить тепловой баланс Земли и структуру атмосферных осадков. Возможность возникновения таких последствий повышения содержания ^{85}Kr требует проведения мониторинга ^{85}Kr (WMO, 1995b).

В целях измерения содержания ^{85}Kr отбор образцов воздуха проводят с использованием ловушки с активированным углем, которая погружена в контейнер с жидким азотом. Образцы подготавливаются хроматографически и охлаждаются до криогенных температур; они прогоняются через концентратор и затем десорбируются потоком гелия. После хроматографа смесь направляется в ловушку, охлаждаемую жидким воздухом. Затем проводится радиометрический анализ с использованием сцинтилляционного детектора (Novichkov, 1997).

Необходимая точность измерения содержания ^{85}Kr зависит от целей применения данной информации. При изучении изменений климата интерес представляет лишь порядок величины содержания ^{85}Kr в атмосфере. В этом случае приемлемой будет точность измерений с погрешностью примерно 10 %. Если же ^{85}Kr используется в качестве трассера при изучении процессов переноса и перемешивания воздушных масс, то погрешность должна составлять примерно 1 %. Измерения содержания ^{85}Kr обеспечивают хорошее средство для проверки или даже калибровки моделей переноса в глобальном масштабе и характеристик смешивания (Novichkov, 1997).

17.3 ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА

Основная цель системы обеспечения качества ГСА состоит в том, чтобы данные, передаваемые в Мировые центры данных, были согласованными, удовлетворяли рекомендациям ГСА по обеспечению качества данных и поддерживались полными метаданными. Система обеспечения качества базируется на Quality Assurance/Science Activity Centers (QA/SAC) (Центрах обеспечения качества/активной научной деятельности), которые, как предполагается, среди прочих задач, будут проводить критический просмотр данных, предоставляемых в Центры отдельными станциями. Это будет достигнуто за счет строгого соблюдения стандартных оперативных процедур, рекомендуемых ГСА. В соответствии с решением группы экспертов Исполнительного Совета комиссии рабочей группы (КАН) (Executive Council Panel of Experts/CAS) по вопросам загрязнения окружающей среды и химии атмосферы в 1999 г. (WMO, 1999), QA/SAC должны нести ответственность за определенные атмосферные параметры в глобальном масштабе. Процедуры обеспечения качества ГСА должны касаться не только качества выполнения измерений, но также всего процесса обеспечения качества, начиная с подготовки персонала станции и заканчивая Мировыми Центрами Данных, в которых содержатся данные требуемого качества.

Рекомендуемые принципы обеспечения качества ГСА для обеспечения сопоставимости и согласованности измерений заключаются в следующем (WMO, 2001):

(a) Принятие и использование признанных на международном уровне методов и терминологии, касающихся неопределенности измерений, как описано Международной организацией по стандартизации (ISO, 1993; 1995);

(b) Использование согласованных методов измерений на основе стандартных оперативных процедур на всех станциях. Стандартная оперативная процедура – это письменный документ, который официально утвержден соответствующей Научно-консультативной группой и в котором подробно описан метод выполнения определенной операции, анализ и программа действий по тщательному выполнению предписанных методик и этапов;

(c) Регулярные проверки выполнимости и систематичности измерений. В рамках ГСА под аудитом выполнимости понимается добровольная проверка соответствия измерения, в котором критерием для аудита, является обеспечение качества данных для измеряемого параметра. В отсутствие формальных данных по обеспечению качества объекта, по крайней мере, должен включать обеспечение отслеживаемости данных измерений относительно стандарта. Аудит системы в более общем смысле определяется как проверка общего соответствия станции принципам ГСА системы по обеспечению качества. Стандарт обеспечение соответствия станции будет претерпевать изменения по мере развития системы обеспечения качества ГСА.

Согласно ВМО (2001) общие цели системы обеспечения качества заключаются в следующем:

(a) обоснование целей обеспечения качества данных и стандартных оперативных процедур

для всех параметров в соответствии с рекомендациями Научно-консультативных групп;

(b) определение и учреждение QA/SAC (Центров обеспечения качества/активной научной деятельности, World Calibration Centers (Мировых калибровочных центров) и калибровочных стандартов там, где это необходимо;

(c) согласование процедур обеспечения качества ГСА;

(d) повышение частоты калибровок и международных сравнений;

(e) создание объединений между и внутри глобальных и региональных станций (научно-техническое сотрудничество, двусторонние связи), а также налаживание двусторонних связей между отдельными лицами (ученые и персонал станций).

Согласно ВМО (2001 г.) текущая реализация заключается в следующем:

Задача 1: Разработка первоочередного перечня параметров, для которых срочно требуется решение задачи обеспечения качества данных;

Задача 2: Определение и учреждение QA/SAC для N_2O и CFCs (хлорфторуглерода);

Задача 3: Определение и там, где это возможно, учреждение Мировых калибровочных центров и первичных стандартов для остальных параметров;

Задача 4: Разработка стандартных оперативных процедур для остальных параметров;

Задача 5: Разработка руководящих документов по аудиту станций ГСА;

Задача 6: Определение и учреждение там, где это необходимо, Regional Calibration Centers (Региональных калибровочных центров), которые должны обеспечивать калибровку и международные сравнения для станций ГСА в регионе.

Задачи, связанные с обеспечением качества различных компонентов ГСА, также охватываются Мировыми и Региональными калибровочными центрами. Эти центры выполняют необходимую функцию по содействию в обеспечении надлежащего качества данных, поступающих в Мировые центры данных ГСА. Их деятельность заключается в следующем:

(a) тщательная калибровка приборов при посещении станций;

(b) кампании по международным сравнениям и калибровке приборов;

(c) международные сравнения данных измерений циркулирующих между лабораториями эталонных газовых смесей и эталонных образцов;

(d) систематические и частые проверки калибровок мировых стандартов.

Хотя эта непосредственная деятельность по калибровке необходима для поддержания требуемой сопоставимости измерений в ходе посещения станций, Центры Калибровки ГСА также обеспечивают подготовку кадров и экспертные консультации на местах, чтобы помочь персоналу станций обеспечивать требуемое качество данных. Семинары проводятся также в ходе кампаний по международным сравнениям и калибровке. Менее опытным сотрудникам, работающим на новых станциях, оказывается помощь персоналом, работающим на надежных и технически хорошо оборудованных станциях. Кроме того, учебные центры ГСА спонсируют частые тренинги для персонала станций, особенно станций, которые расположены в развивающихся странах. Эти мероприятия по наращиванию потенциала приобретают все большее значение, поскольку многие станции ГСА введены в эксплуатацию в развивающихся странах. По сообщению ВМО (2001) создание системы обеспечения качества ГСА все еще не завершено. В настоящее время подготовлено очень немного руководящих документов по обеспечению качества и стандартным оперативным процедурам для программы ГСА, и не имеется никаких отчетов ГСА по аудиту систем наблюдений. Более подробная информация о стратегии текущего осуществления программы ГСА предоставлена на веб-сайте ВМО (http://www.wmo.int, “Глобальная служба атмосферы” в разделе “Topics” “Темы”).

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Anlauf, K.G., P. Fellin, H. Wiebe, H. Schiff and G. Mackay, R. Braman and R. Gilbert, 1985: A Comparison of three methods for measurement of atmospheric nitric acid and aerosol nitrate and ammonium. *Atmospheric Environment*, 19, pp. 325–333.

Baker, J.E. (ed.), 1997: *Proceedings from a Session at the SETAC Fifteenth Annual Meeting* (30 October–3 November 1994, Denver, Colorado), SETAC Press, Pensacola, Florida, pp. 347–377.

Baldocchi, D.D., B.B. Hicks and T. P. Meyers, 1988: Measuring biosphere-atmosphere exchanges of biologically related Gases with micrometeorological methods. *Ecology*, Volume 69, Number 5, pp. 1331–1340.

Bigelow, D.S., 1987: *Siting and Sampling Characteristics of the National Atmospheric Deposition Program and the National Trends Network: Regional Influences*. EMEP Workshop on Data Analysis and Presentation (Cologne, Federal Republic of Germany, 15–17 June 1987), EMEP/CCC-Report 7/87, Norwegian Institute for Air Research, Lillestrom, Norway, December 1987, pp. 149–160.

Charlson, R.J., J.E. Lovelock, M.O. Andreae and S.G. Warren, 1987: Oceanic phytoplankton, atmospheric sulphur, cloud albedo and climate. *Nature*, 326, pp. 655–661.

Charlson, R. J., C.B. Leovy, S.G. Warrend, J. Langner and H. Rodhe, 1991: Perturbation of the northern hemisphere radiative balance by backscattering from anthropogenic sulfate aerosols. *Tellus*, 43AB, pp. 152–163.

Dlugokencky, E.J., *L.P. Steale,* P.M. Lang and K.A. Masarie, 1995: Atmospheric methane at the Mauna Loa and Barrow observatories: Presentation and analysis of in situ measurements. *Journal of Geophysical Research*, Volume 100, (D11), pp. 23103–23113.

Elkins, J.W., and others, 1996: Airborne gas chromatograph for in situ measurements of long-lived species in the upper troposphere and lower stratosphere. *Geophysical Research Letters*, Volume 23, Issue 4, pp. 347–350.

Fried, A., H. Bruce and J.R. Drummond, 1993, Tunable diode laser ratio measurements of atmospheric constituents by employing dual fitting analysis and jump scanning. *Applied Optics*, 32 (6), pp. 821–827.

Gillett, R.W. and G.P. Ayers, 1991: The use of thymol as a biocide in rainwater samples. *Atmospheric Environment*, Volume 25, Number 12, pp. 2677–2681.

Hansen, A.D.A., R.S. Artz, A.A.P. Pszenny and R.E. Larson, 1990: Aerosol black carbon and radon as tracers for air mass origin over the North Atlantic Ocean. *Global Biogeochemical Cycles*, 4(2), pp. 189–199.

Harris, J.M. and J.D. Kahl, 1990: A descriptive atmospheric transport climatology for the Mauna Loa observatory, using clustered trajectories. *Journal of Geophysical Research*, Volume 95, Issue D9, pp. 13651–13667.

Hicks, B.B., R.P. Hosker, T.P. Meyers and J.D. Womack, 1991: Dry deposition inferential measurement techniques – I: Design and tests of a prototype meteorological and chemical system for determining dry deposition. *Atmospheric Environment*, Volume 25A, Number 10, pp. 2345–2359.

International Organization for Standardization, 1993: International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology. Second edition, Geneva.

International Organization for Standardization, 1995: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. First edition, Geneva.

James, K.O.W., 1991: *Quality Assurance Report*. NADP/NTN Deposition Monitoring, Laboratory Operations, Illinois State Water Survey, Champaign, Illinois.

Keene, W.C. and J.N. Galloway, 1984: Organic acidity in precipitation of North America. *Atmospheric Environment*, Volume 18, Number 11, pp. 2491–2497.

Keene, W.C., J.N. Galloway and J.D. Holden, 1983: Measurement of weak organic acidity in precipitation from remote areas of the world. *Journal of Geophysical Research*, 88C(9), pp. 5122–5130.

Klemm, O., R.W. Talbot, D.R. Fitzgerald, K.I. Klemm and B.L. Lefer, 1994: Low to middle tropospheric profiles and biosphere/troposphere fluxes of acidic gases in the summertime Canadian Taiga. *Journal of Geophysical Research*, 99, pp. 1687–1698.

Kok, G.L., A.J. Schanot, P.F. Lindgren, P.K. Dasgupta, D.A. Hegg, P.V. Hobbs and J.F. Boatman, 1990: An airborne test of three sulfur dioxide measurement techniques. *Atmospheric Environment*, 24A, pp. 1903–1908.

Komhyr, W.D., T.B. Harris, L.S. Waterman, J.F.S. Chin and K.W. Thoning, 1989: Atmospheric carbon dioxide at the Mauna Loa Observatory. 1: NOAA global monitoring for climatic change measurements with a nondispersive infrared analyzer, 1974–1985. *Journal of Geophysical Research*, 94 (D6), pp. 8533–8547.

Liu, S.C., J.R. McAfee and R.J. Cicerone, 1984: Radon 222 and tropospheric vertical transport. *Journal of Geophysical Research*, Volume 89 (D5), pp. 7291–7297.

Luke, W.T., 1997: Evaluation of a commercial pulsed fluorescence detector for the measurement of low-level SO2 concentrations during the Gas-Phase Sulfur Intercomparison Experiment. *Journal of Geophysical Research*, Volume 12, (D13), pp. 16255–16265.

Luke, W.T. and R.A. Valigura, 1997: Methodologies to estimate the air-surface exchange of atmospheric nitrogen compounds. In: Atmospheric deposition of contaminants to the Great Lakes and coastal waters (J.E. Baker, ed.). *Proceedings from a Session at the SETAC Fifteenth Annual Meeting* (30 October–3 November 1994, Denver Colorado), SETAC Press, Pensacola, Florida, pp. 347–377.

Novelli, P.C., J.E. Collins, R.C. Myers, G.W. Sachse and H.E. Scheel, 1994: Reevaluation of the NOAA/CMDL carbon monoxide reference scale and comparisons with CO reference gases at NASA-Langley and the Fraunhofer Institut. *Journal of Geophysical Research*, Volume 99 (D6), pp. 12833–12839.

Novichkov, V., 1997: *Measurement Content of Krypton-85 in Earth Atmosphere and Validation of Global Model of Atmospheric Transport*. IGAC-SPARC-GAW Conference on Global Measurement Systems for Atmospheric Composition (Toronto, Canada, 20–22 May 1997).

Parungo, F.B. Kopcewicz, C. Natgamoto, R. Schnell, P. Sheridan, C. Zhu and J. Harris, 1992: Aerosol particles in the Kuwait oil fire plumes: Their morphology, size distribution, chemical composition, transport, and potential effect on climate. *Journal of Geophysical Research*, Volume 97, (D14), pp. 15867–15882.

Peterson, J.T. and R.M. Rosson, 1993: *Climate Monitoring and Diagnostics Laboratory*. Summary Report 1992, No. 21, Environmental Research Laboratories, Boulder, Colorado.

Prinn, R.G., P.G Simmonds, R.A. Rasmussen, A.J. Crawford, R.D. Rosen, F.N. Alyea, C.A. Cardelino, D.M. Cunnold, P.J. Fraser and J.E. Lovelock, 1983: The atmospheric lifetime experiment. 1: Introduction, instrumentation, and overview. *Journal of Geophysical Research*, Volume 88, (C13), pp. 8353–8367.

Roberts, J.M., 1990: The atmospheric chemistry of organic nitrates. *Atmospheric Environment*, 24A, pp. 243–287.

Sachse, G.W. G.F. Hill, L.O. Wade and M.G. Perry, 1987: Fast-response, high-precision carbon monoxide sensor using a tunable diode laser absorption technique. *Journal of Geophysical Research*, Volume 92 (D2), pp. 2071–2081.

Slade, D.H. (ed.), 1968: *Meteorology and Atomic Energy*. United States Atomic Energy Commission, Office of Information Services.

Smith, R.A., 1872: *Air and Rain: The Beginnings of a Chemical Climatology*. Longmans, Green and Co., London.

Stecher, H.A. and others, 1997: Results of the Gas-phase Sulfur Intercomparison Experiment (GASIE): Overview of experimental setup, results and general conclusions. *Journal of Geophysical Research*, 102, D13, pp. 16219–16236.

Thomas, J.W. and P.C. LeClare, 1970: A study of the two-filter method for radon-222. *Health Physics*, 18(2), pp. 113–122.

United States Environmental Protection Agency, 1996: *National Air Quality and Emissions Trends Report, 1995*. EPA-454/R-96-005, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina.

United States Environmental Protection Agency, 1997: *Deposition of Air Pollutants to the Great Waters: Second Report to Congress*. EPA-453/R-97-011, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina.

Weeks, I.A., I.E. Galbally, P.J. Fraser and G. Mathews, 1989: Comparison of the carbon monoxide standards used at Cape Grim and Aspendale. *Baseline Atmospheric Program 1987* (B.W. Forgan and G.P. Ayers, eds). Australian Government Department of Science and Technology, Canberra, Australia, pp. 21–25.

World Meteorological Organization, 1993: *Global Atmosphere Watch Guide*. Global Atmosphere Watch Report No. 86, WMO/TD-No. 553, Geneva.

World Meteorological Organization, 1995*a*: *Report of the Meeting of Experts on the WMO World Data Centres* (E.W. Hare). Global Atmosphere Watch Report No. 103, WMO/TD-No. 679, Geneva.

World Meteorological Organization, 1995*b*: *Report of an Expert Consultation on 85Kr and 222Rn: Measurements, Effects and Applications*. Global Atmosphere Watch Report No. 109, WMO/TD-No. 733, Geneva.

World Meteorological Organization, 1999: *Report of the Sixth Session of the EC Panel of Experts/CAS Working Group on Environmental Pollution and Atmospheric Chemistry.* Global Atmosphere Watch Report No. 135, WMO/TD-No. 1002, Geneva.

World Meteorological Organization, 2001*: Strategy for the Implementation of the Global Atmosphere Watch Programme* (2001–2007): A Contribution to the Implementation of the WMO Long-term Plan. Global Atmosphere Watch Report No. 142, WMO/TD-No. 1077, Geneva.

ЧАСТЬ II

СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЙ

ЧАСТЬ II. СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЙ

СОДЕРЖАНИЕ

Стр

ГЛАВА 1. ИЗМЕРЕНИЯ НА АВТОМАТИЧЕСКИХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ СТАНЦИЯХ II.1–1

1.1 Общие сведения II.1–1
1.2 Аппаратное обеспечение автоматических метеорологических станций II.1–4
1.3 Програмное обеспечение автоматических метеорологических станций II.1–12
1.4 Соображения относительно места расположения автоматических метеорологических станций II.1–20
1.5 Обработка данных центральной сети II.1–20
1.6 Техническое обслуживание и ремонт II.1–21
1.7 Калибровка II.1–23
1.8 Обучение персонала II.1–23
Справочная и дополнительная литература II.1–25

ГЛАВА 2. ИЗМЕРЕНИЯ И НАБЛЮДЕНИЯ НА АВИАЦИОННЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ СТАНЦИЯХ II.2–1

2.1 Общие сведения II.2–1
2.2 Приземный ветер II.2–3
2.3 Видимость II.2–4
2.4 Дальность видимости на взлетно-посадочной полосе II.2–6
2.5 Текущая погода II.2–11
2.6 Облачность II.2–11
2.7 Температура воздуха II.2–12
2.8 Точка росы II.2–13
2.9 Атмосферное давление II.2–13
2.10 Прочая важная для аэродромов информация II.2–15
2.11 Автоматизированные системы метеорологических наблюдений II.2–16
2.12 Радиолокатор II.2–17
2.13 Датчик льда II.2–17
2.14 Обнаружение молний II.2–17
2.15 Другие сопутствующие наблюдения II.2–18
Справочная и дополнительная литература II.2–19

ГЛАВА 3. САМОЛЕТНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ II.3–1

3.1 Общие положения II.3–1
3.2 Давление и число Маха II.3–2
3.3 Температура воздуха II.3–4
3.4 Направление и скорость ветра II.3–6
3.5 Турбулентность II.3–7
3.6 Относительная влажность II.3–9
3.7 Обледенение II.3–10
3.8 Действующие оперативные системы II.3–10
3.9 Будущие системы AMDAR II.3–11
Справочная и дополнительная литература II.3–12

Стр

ГЛАВА 4. МОРСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ II.4–1

4.1 Общие сведения II.4–1
4.2 Наблюдения с судов II.4–2
4.3 Заякоренные буи II.4–20
4.4 Автоматические плавучие маяки II.4–25
4.5 Вышки и платформы II.4–25
4.6 Дрейфующие буи II.4–26

Приложение 4.A. Региональные центры морских приборов ВМО-МОК (РЦМП) II.4–28

Приложение 4.B. Описания осадков для использования судовыми наблюдателями II.4–30

Справочная и дополнительная литература II.4–32

ГЛАВА 5. СПЕЦИАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ПРОФИЛИРОВАНИЯ АТМОСФЕРНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ И ТРОПОСФЕРЫ II.5–1

5.1 Общие сведения II.5–1
5.2 Методы дистанционного зондирования с поверхности земли II.5–1
5.3 Контактные методы измерений II.5–7

Справочная и дополнительная литература II.5–12

ГЛАВА 6. РАКЕТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ В СТРАТОСФЕРЕ И МЕЗОСФЕРЕ II.6–1

6.1 Общие сведения II.6–1
6.2 Измерение ветра II.6–1
6.3 Измерение температуры путем термометрии в ходе спуска II.6–3
6.4 Измерение температуры с помощью надувной спускающейся сферической оболочки II.6–5
6.5 Расчет других аэрологических параметров II.6–6
6.6 Сети станций и сравнения данных II.6–7

Справочная и дополнительная литература II.6–8

ГЛАВА 7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ ИСТОЧНИКОВ АТМОСФЕРИКОВ II.7–1

7.1 Общие сведения II.7–1
7.2 Пеленгационная система определения координат молний II.7–4
7.3 Примеры систем определения координат молний по времени поступления сигналов II.7–7
7.4 Сравнения сетей пеленгаторов и устройств, определяющих время поступления сигнала II.7–9
7.5 Объединение методов пеленгования и определения времени поступления сигналов II.7–10
7.6 Представление и распространение данных о молниях II.7–10

Справочная и дополнительная литература II.7–11

ГЛАВА 8. СПУТНИКОВЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ II.8–1

8.1 Общие сведения II.8–1
8.2 Оперативные спутниковые системы II.8–3
8.3 Метеорологические наблюдения II.8–10
8.4 Средства обеспечениЯ II.8–32

Приложение 8.A. Каналы усовершенствованного радиометра очень высокого разрешения II.8–36

Приложение 8.B. Прибор ТАЙРОС для оперативного вертикального зондирования (ТОВС) каналы ик-зонда с высокой разрешающей способностью (ХИРС) II.8–37

Справочная и дополнительная литература II.8–38

Стр

ГЛАВА 9. РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ II.9–1

9.1 Общие сведения II.9–1
9.2 Технология радиолокационных наблюдений II.9–5
9.3 Распространение и рассеяние радиолокационных сигналов II.9–13
9.4 Измерения скорости II.9–15
9.5 Источники ошибки II.9–17
9.6 Оптимизация характеристик радиолокатора II.9–18
9.7 Установка радиолокаторов II.9–21
9.8 Калибровка и обслуживание II.9–23
9.9 Измерения осадков II.9–24
9.10 Применение радиолокаторов в области обнаружения опасных явлений погоды и создания краткосрочного прогноза погоды II.9–29
9.11 Высокочастотные радиолокаторы для исследования поверхности океана II.9–31

Приложение. Руководящие указания ВМО по взаимосогласованному размещению метеорологических радиолокаторов (метеорадаров) и ветроэнергетических установок II.9–32

Справочная и дополнительная литература II.9–34

ГЛАВА 10. МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ШАРЫ-ЗОНДЫ II.10–1

10.1 Оболочки II.10–1
10.2 Свойства оболочек II.10–2
10.3 Обращение с оболочками II.10–3
10.4 Дополнительное снаряжение для подъема шаров II.10–5
10.5 Газы для наполнения оболочек II.10–6
10.6 Использование водорода и меры предосторожности II.10–7

Справочная и дополнительная литература II.10–11

ГЛАВА 11. МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ В ГОРОДАХ II.11–1

11.1 Общие сведения II.11–1
11.2 Выбор места и площадки для размещения городской станции II.11–8
11.3 Установка приборов II.11–10
11.4 Метаданные II.11–23
11.5 Оценка оказываемых городом воздействий II.11–26
11.6 Резюме ключевых пунктов для городских станций II.11–26

Справочная и дополнительная литература II.11–28

ГЛАВА 12. МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ НА ДОРОГАХ II.12–1

12.1 Общие сведения II.12–1
12.2 Создание дорожной метеорологической станции II.12–2
12.3 Наблюдаемые переменные II.12–2
12.4 Выбор оборудования для дорожной метеорологической станции II.12–5
12.5 Кодирование сообщений II.12–7
12.6 Центральный компьютер управления и сбора данных II.12–7
12.7 К вопросу о связи II.12–8
12.8 Обработка сигналов датчика и формирование тревожных сообщений II.12–8
12.9 Контроль качества измерений II.12–9
12.10 Техническое обслуживание дорожной метеорологической станции II.12–9
12.11 Подготовка кадров II.12–10

Справочная и дополнительная литература II.12–11

ГЛАВА 1

ИЗМЕРЕНИЯ НА АВТОМАТИЧЕСКИХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ СТАНЦИЯХ

1.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

1.1.1 Определение

Автоматическая метеорологическая станция (АМС) определяется как «метеорологическая станция, на которой выполняются наблюдения и их данные передаются автоматически» (ВМО, 1992*a*).

На АМС приборные измерения считываются или принимаются центральным блоком сбора данных. Данные, собранные с автономных измеряющих устройств, могут обрабатываться непосредственно на АМС или в другом месте, например на центральном процессоре сети (ВМО, 1989*a*). Автоматические метеорологические станции могут быть сконструированы в соответствии с комплексной концепцией разных измерительных устройств в сочетании с блоками для сбора и обработки данных. Подобная комбинированная система приборов, интерфейсов и блоков для обработки и передачи данных обычно именуется автоматизированной метеорологической системой наблюдения (АМСН) или автоматизированной наземной системой наблюдения (АНСН). Обычной практикой стала ссылка на подобную систему как на АМС, хотя это не является «станцией», полностью соответствующей данному определению. Тем не менее во всей этой главе АМС может означать именно подобную систему.

1.1.2 Назначение

Автоматические метеорологические станции используются для повышения количества и надежности данных наземных наблюдений. Они достигают это за счет:

(a) увеличения плотности существующей сети путем получения данных с новых мест и с мест, которые являются труднодоступными и неблагоприятными для работы наблюдателей;
(b) обеспечения данными обслуживаемых станций сверх обычных часов работы;
(c) повышения надежности измерений посредством использования сложной технологии и новых цифровых методов измерений;
(d) обеспечения однородности сетей путем стандартизации методов измерений;
(e) удовлетворения новых потребностей в наблюдениях и новых требований;
(f) уменьшения ошибок персонала;
(g) снижения оперативных расходов благодаря уменьшению числа наблюдателей;
(h) проведения измерений и представления информации с высокой частотой или постоянством.

1.1.3 Метеорологические требования

Общие требования, типы, местоположение и состав, частота и сроки наблюдений изложены в документах ВМО (1988a; 2003*a*).

Принимая во внимание, что АМС в целом рассматриваются как метеорологические станции, которые обеспечивают получение данных, точность которых сопоставима с точностью традиционных станций, к АМС могут также применяться в случае необходимости требования в отношении точности, изложенные в главе 1 части I настоящего Руководства.

Руководящие указания, содержащиеся в этой главе, необходимо использовать в сочетании с положениями глав, посвященных измерениям различных метеорологических переменных, содержащихся в части I, и, в частности, с положениями глав, посвященных контролю качества (глава 1), выборке данных (глава 2) и приведению данных (глава 3), содержащихся в части III.

Разработка и установка АМС должны быть результатом определенного скоординированного плана по предоставлению данных пользователям в требуемом формате. Для достижения этого необходимо в первую очередь провести обсуждения с пользователями, с тем чтобы подготовить перечень всех функциональных требований и подготовить практические средства для их выполнения.

Кроме того, не всегда можно полагаться на поставщиков оборудования в оценке оперативных потребностей. Комиссия по приборам и методам наблюдений (КПМН) дает следующую рекомендую странам-членам ВМО и соответственно любым службам, проводящим метеорологические измерения.

При рассмотрении вопроса о внедрении новых АМС метеорологическим службам следует:[1]

---

[1] Рекомендовано Комиссией по приборам и методам наблюдений на ее двенадцатой сессии (1998 г.), рекомендация 2 (КПМН-XII).

(a) вводить в эксплуатацию только такие системы, которые сопровождаются необходимым объемом технической документации, с тем чтобы обеспечить достаточную информацию об их возможностях, характеристиках и любых используемых алгоритмах и адекватное понимание этой информации;
(b) сохранять и развивать достаточные возможности для технической экспертизы, с тем чтобы иметь возможность самостоятельно формулировать технические требования к системам и оценивать приемлемость технических возможностей и характеристик подобных систем и используемых в них алгоритмов;[2]
(c) в полной мере изучать потребности пользователей и привлекать пользователей к разработке систем АМС;
(d) привлекать пользователей к проверке и оценке новых автоматизированных систем;
(e) привлекать промышленных производителей к оценке систем и потребностей в совершенствовании технических характеристик;
(f) разрабатывать подробные руководства и документацию по системам для оказания поддержки всем пользователям;
(g) разрабатывать адекватные программы для оказания поддержки, связанной с техническим обслуживанием и калибровкой АМС;
(h) консультироваться и сотрудничать с пользователями, такими как авиационные ведомства, на протяжении всего данного процесса от конструирования, введения в эксплуатацию и оперативного использования АМС;
(i) разрабатывать и применять методы предоставления информации для использования на национальном уровне с целью согласования данных наблюдений, полученных как традиционными, так и автоматизированными системами.

В отношении автоматизации традиционных визуальных и субъективных наблюдений и будущих изменений в коде сообщений метеорологическим службам следует улучшить их определение потребностей, касающихся:
(a) областей применения, в которых данные более не требуются;
(b) областей применения, для которых необходимы иные или новые данные;
(c) приоритетных потребностей в данных, которые должны предоставляться АМС.

[2] Рекомендовано Комиссией по приборам и методам наблюдений на ее двенадцатой сессии (1998 г.), рекомендация 2 (КПМН-XII).

В отношении автоматизации традиционных визуальных и субъективных наблюдений и будущих изменений в коде сообщений метеорологическим службам следует улучшить их определение потребностей, касающихся:[3]
(a) областей применения, в которых данные более не требуются;
(b) областей применения, для которых необходимы иные или новые данные;
(c) приоритетных потребностей в данных, которые должны предоставляться АМС.

При рассмотрении вопроса о разработке и применении алгоритмов для АМС метеорологическим службам следует:[4]
(a) поощрять разработчиков приборов и систем к тесной работе с соответствующими пользователями с целью полного понимания потребностей и проблем пользователей;
(b) проводить совместную работу с разработчиками систем по опубликованию и распространению для широкого использования и возможной стандартизации описаний алгоритмов обработки данных, используемых в их системах для выведения метеорологических переменных;
(c) проводить тщательные испытания и оценку внедряемых новых алгоритмов и систем и распространять результаты испытаний в форме характеристик среди пользователей данных наблюдений;
(d) тщательно оценивать посредством полевых испытаний и взаимосравнения связь новых алгоритмов и систем с прежними методами и устанавливать функции перехода между ними для обеспечения непрерывного получения и однородности данных, и распространять эти данные среди пользователей.

1.1.4 Климатологические требования[5]

В тех случаях, когда задачей предлагаемой метеорологической станции является обеспечение данными для климатологических записей, важное значение для целостности, однородности и полезности комплектов климатических данных имеет учет следующих вопросов для принятия соответствующих мер (см. ВМО, 1993):

[3] Рекомендовано Комиссией по приборам и методам наблюдений на ее двенадцатой сессии (1998 г.), рекомендация 5 (КПМН-XII).

[4] Рекомендовано Комиссией по приборам и методам наблюдений на ее двенадцатой сессии (1998 г.), рекомендация 2 (КПМН-XII).

[5] Рекомендовано Комиссией по приборам и методам наблюдений на ее двенадцатой сессии (1998 г.), рекомендация 3 (КПМН-XII).

(a) в тех случаях, когда АМС заменяет неавтоматизированную наблюдательную систему, которая эксплуатировалась в течение долгого времени, необходимо обеспечить достаточное перекрытие в работе наблюдательных систем, с тем чтобы содействовать сохранению однородности исторических данных.[6] Время перекрытия зависит от разных измеряемых переменных и от климатического региона. В тропических регионах и на тропических островах время перекрытия может быть меньшим по сравнению с внетропическими и горными регионами. Для обеспечения достаточного оперативного перекрытия между существующими и новыми автоматизированными системами предлагаются следующие общие руководящие указания:
   (i) скорость и направление ветра: 12 месяцев
   (ii) температура, влажность, солнечное сияние, испарение: 24 месяца
   (iii) осадки: 60 месяцев
   (Часто предпочтительным будет наличие омброметра, функционирующего одновременно с автоматическим дождемером.)
   Полезным компромиссным вариантом был бы период перекрытия продолжительностью в 24 месяца (т.е. два сезонных цикла);
(b) точные метаданные должны сохраняться для каждой установленной АМС;[7]
(c) следует стандартизировать процедуры для обеспечения качества и обработки данных с АМС (см. раздел 1.3.2.8);
(d) существующие и будущие требования пользователей климатических данных должны быть точно определены и учитываться при подготовке заявлений о требованиях в отношении автоматизированных наблюдений, осуществляемых АМС;[8]
(e) пользователей климатических данных необходимо обучать наиболее эффективному пользованию данными АМС;[9]
(f) следует разработать спецификации для стандартизированной климатологической АМС, которые будут регистрировать базовый набор таких климатических переменных, как температура, осадки, давление и ветер. Следует включить унифицированные измерения водяного пара ввиду значимости этого параметра в исследованиях изменения климата. Экстремальные величины всех переменных следует точно и последовательно регистрировать таким способом, который может быть точно соотнесен с более старыми данными наблюдений, полученными вручную.[10]

1.1.5 Типы автоматических метеорологических станций

Автоматические метеорологические станции используются для удовлетворения различных потребностей, начиная от простого дополнения к комплекту средств наблюдений на обслуживаемых станциях и кончая заменой наблюдателей на полностью автоматизированных станциях. АМС можно классифицировать в несколько функциональных групп; однако эти группы часто перекрывают друг друга, и такая классификация нарушается. Обычно АМС подразделяются на станции, которые обеспечивают поступление данных в масштабе реального времени (оперативные), и станции, которые регистрируют данные для неоперативного применения или автономного анализа. Однако зачастую обе эти функции могут выполняться одной и той же АМС.

Оперативная АМС. Станция, которая обеспечивает пользователей данными метеорологических наблюдений в оперативном режиме, как правило, в заранее запрограммированные сроки, а также в критических условиях или по запросу извне. Типичное оперативное использование – это обеспечение синоптическими данными и мониторинга опасных явлений, таких, как ураганы, а также уровней рек или приливов.

Неоперативная АМС. Станция, которая наряду с возможным отображением текущих данных регистрирует данные на внутренние или внешние устройства хранения данных. Для передачи накопленных данных удаленному пользователю требуется вмешательство наблюдателя. К типичным станциям этой группы относятся климатологические станции и станции, являющиеся вспомогательными в работе наблюдателя.

Оба типа станций можно по выбору оснастить средствами для ручного ввода или редактирования данных визуальных или объективных наблюдений, которые еще нельзя полностью автоматизировать, таких, как текущая и прошедшая погода, или наблюдений, которые связаны с большими расходами, таких, как высота нижней границы облаков и видимость. Такую станцию можно назвать частично автоматизированной или полуавтоматической.

---

6 Примите к сведению также документ ВМО (1989a), раздел 3.2.1.4.4.4c) «один год параллельных измерений является недостаточным; три года являются минимумом, а пять лет – это предпочтительный срок».

7 См. часть I, глава 1, раздел 1.1.3.

8 См. часть I, глава 1, приложение 1.B.

9 Например, см. ВМО (1997), особенно часть II – «Соображения относительно осуществления и обучения пользователей».

10 Там же.

Поскольку стоимость АМС может быть весьма высокой, ее возможности можно также использовать с целью удовлетворения общих и специальных нужд и требований нескольких применений, таких, как синоптическая, авиационная и сельскохозяйственная метеорология, гидрология и климатология. Их можно также использовать для специальных целей, таких, как безопасность ядерной энергетики, качество воздушной и водной сред, метеорологические условия на дорогах. Таким образом, некоторые АМС являются многоцелевыми автоматизированными метеорологическими станциями.

1.1.6 Объединение станций в сети

АМС обычно являются частью сети метеорологических станций, при этом каждая станция с помощью различных средств передает свои обработанные данные в центральную систему обработки данных сети. Поскольку задачи, выполняемые этой центральной системой, тесным образом связаны и зачастую дополняют задачи АМС, то необходимо очень хорошо координировать функциональные и технические требования как к центральной системе, так и к АМС.

При планировании установки и работы сети АМС важное значение имеет рассмотрение различных проблем, связанных с эксплуатацией и калибровкой средств, их организацией, а также с подготовкой и обучением технического персонала. Вопросы плотности сети не рассматриваются в настоящем Руководстве, поскольку их решение определяется конкретными применениями. Тем не менее оптимальное территориальное размещение и расположение датчиков станций оказывают важное влияние на достижение ожидаемых от АМС результатов и поэтому должны быть изучены перед установкой станций.

1.2 АППАРАТНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АВТОМАТИЧЕСКИХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

АМС может состоять из интегрированной АМСН (и системы сбора данных) или комплекта автономных измерительных устройств, подключенных к блоку для сбора и передачи данных. Компоновка АМС обычно включает следующее:

(a) для стандартного района наблюдений – желательно размером не менее чем 25 м x 25 м (часть I, глава 1, и ВМО, 1989a) – ряд автоматизированных датчиков, установленных на рекомендованных позициях и подключенных к одному или нескольким блокам сбора данных при помощи интерфейсов; или в случае АМНС – набор датчиков, установленных в тесной комбинации, но не мешающих друг другу и напрямую соединенных с центральным процессорным блоком (ЦПБ) с помощью экранированных кабелей, линий оптико-волоконной связи или радиосвязи;

(b) ЦПБ для сбора данных от датчиков и преобразования в читаемый компьютерный формат, необходимой обработки данных при помощи основанной на микропроцессоре системы в соответствии с определенными алгоритмами, временного хранения обработанных данных и их передачи удаленным пользователям метеорологической информации;

(c) периферийное оборудование, такое как источник постоянного питания, обеспечивающий энергией различные части станции, часы реального времени, а также встроенное тестирующее оборудование для автоматического мониторинга состояния жизненно важных частей станции. Для конкретных применений к станции добавляются местные терминалы для ручного ввода и редактирования данных, дисплеи, принтеры и регистраторы.

Возрастающее взаимодействие между обществом и атмосферой приводит к изменению и росту потребностей, таких, как необходимость большего числа станций и большего числа измеряемых переменных, передача их через все более короткие временные интервалы, новые форматы и лучшие характеристики. Вследствие этого необходимо адаптировать существующее аппаратное и программное обеспечение АМС к новым требованиям. Это можно осуществить лишь в том случае, если АМС хорошо спроектирована на модульной основе. Обычно настройка и испытания оказываются более сложными, чем ожидалось. Хорошо спроектированная АМС включает элементы, прошедшие предварительные испытания, позволяющие выполнять изменения конфигурации и параметров системы. К числу других желательных элементов относятся резервный источник питания, свободное место в консолях для установки приборов, резервные интерфейсы связи, резервные мощности для обработки и гибкое программное обеспечение. Руководство по подготовке функциональной спецификации для системы АМС имеется в части I публикации ВМО (1997).

1.2.1 Датчики

Метеорологические требования к датчикам, применяемым в АМС, не сильно отличаются от требований, предъявляемых к датчикам на неавтоматизированных станциях наблюдений. См. также рекомендации в соответствующих главах части I настоящего

Руководства. Поскольку измерения на большинстве АМС контролируются с дальних расстояний, эти датчики должны быть надежными в эксплуатации, достаточно нетребовательными в плане технического обслуживания и должны характеризоваться отсутствием любых характерных погрешностей или неопределенности в технологии выполнения измерений соответствующих переменных. Как правило, подходят все датчики с электрическим выходом. Имеется большое число датчиков с различными характеристиками и качеством (и ценой), которые пригодны для использования в автоматических системах сбора данных. Часто появляются новые разработки, при этом некоторые из них улучшают характеристики существующих датчиков, а другие нередко основаны на новых физических принципах. В зависимости от их выходных характеристик датчики можно классифицировать как аналоговые, цифровые и «интеллектуальные».

Аналоговые датчики: сигнал на выходе датчика обычно представляется в виде напряжения, тока, заряда, сопротивления или емкости. Благодаря стандартизации сигнала эти базовые сигналы превращаются в сигналы напряжения.

Цифровые датчики: это датчики с выводами цифровых сигналов, при этом информация хранится в виде бита или группы битов, а также датчики с импульсным или частотным выходом.

«Интеллектуальные» датчики/преобразователи: это датчики, содержащие микропроцессор, осуществляющий сбор основных данных и функции обработки и обеспечивающий получение на выходе результатов измерений в виде сообщений в цифровой форме.

Что касается метеорологических датчиков, то в части I дается полное описание общих аспектов, типов датчиков, методов измерения, единиц, масштабов, экспозиции, источников ошибок, калибровки и технического обслуживания. КПМН оказывает странам-членам помощь в форме регулярной организации международных взаимных сравнений приборов. Результаты могут быть весьма существенными для оценки различных подходов к измерениям. Начиная с 1968 г. КПМН использует вопросники для получения информации по разработке приборов и каждые четыре года публикует доклад под названием *Instrument Development Inquiry* (Сбор материалов по разработке приборов). В докладах содержится информация как о приборах, находящихся в разработке, так и об уже используемых приборах. Информацию о новых разработках и об опыте использования можно найти в трудах национальных симпозиумов, в журналах и газетах, а также в трудах технических конференций, регулярно организуемых КПМН. Эти технические конференции сопровождаются выставками метеорологических приборов, на которых изготовители представляют свои последние разработки. Результаты взаимных сравнений КПМН, доклады *Instrument Development Inquiry* (Сбор материалов по разработке приборов), а также труды технических конференций КПМН публикуются ВМО в сериях докладов «Приборы и методы наблюдений». Другим рекомендуемым путем получения информации является непосредственный обмен опытом между операторами сетей АМС, особенно между теми, которые эксплуатируют станции в сходных условиях окружающей среды.

Некоторые особые соображения, касающиеся датчиков АМС, приводятся в следующих разделах. Достигаемая оперативная точность наблюдений приводится в приложении 1.B[11] главы 1 части I Руководства. По мере получения экспериментальных результатов эти оценки будут, в случае необходимости, обновляться КПМН. Точность калибровки датчика (в лаборатории) должна быть по меньшей мере вдвое выше, с тем чтобы иметь возможность линеаризации функций реагирования. Разрешающая способность датчика должна быть примерно втрое лучше по сравнению с заявленным требованием (которое включает характеристику интерфейса).

Атмосферное давление. Существует большое разнообразие приборов, основанных главным образом на использовании анероидной коробки, вибрирующего провода или кварцевого кристалла, которые обеспечивают электрический выход в аналоговой или цифровой форме. Информация о цифровых датчиках дается в публикации ВМО (1992*b*). Основными проблемами, которые конструктор или разработчик АМС должны тщательно рассматривать, являются отрицательные воздействия температуры, долговременное отклонение, вибрация и условия экспозиции. Влияние температуры является очень сильным, и его не всегда можно полностью компенсировать с помощью встроенных средств компенсации температуры. Для датчиков давления АМС характерно значительное с течением времени отклонение в точности, обычно от менее 0,2 до 0,3 гПа за шесть месяцев, и поэтому требуется их регулярная калибровка. Влияние вибрации и механических ударов на выходные характеристики датчиков давления представляется особенно важным при применении в морских АМС. Учитывая, что большинство датчиков давления уязвимо к

[11] Заявлена совещанием группы экспертов по требованиям к оперативной точности (1991 г.) и утверждена 44-й сессией Исполнительного Совета (1992 г.) для включения в настоящее Руководство.

воздействиям внешней среды, датчик давления обычно помещают в герметизированный и термостабильный небольшой контейнер внутри ЦПБ. В некоторых странах датчик соединяют трубкой, выходящей из этого контейнера и имеющей головку, воспринимающую статическое давление. В случаях авиационных применений или на удаленных станциях, где требуется высокая степень точности и надежности, в станцию монтируют два датчика давления и более. В главе 3 части I приводятся руководящие указания по использованию цифровых барометров на АМС.

Температура. Наиболее общими типами термометров, которые используются на АМС, являются простые металлические термометры сопротивления или термисторы. Платиновый термометр сопротивления (100 Ом при 0 °С) имеет очень хорошую долговременную стабильность и может считаться предпочтительным типом датчика. Электрические термометры обычно имеют небольшую постоянную времени и при проведении измерений при помощи быстродействующих электронных схем показываемый ими результат отражает высокочастотные, низкоамплитудные колебания местной температуры. Эту проблему можно избежать, используя датчики с большой постоянной времени, искусственно подавляя такое реагирование с помощью подходящей схемы, с тем чтобы увеличить постоянную времени выходного сигнала, или путем цифрового осреднения измеряемых результатов в ЦПБ. Резисторные термометры требуют линеаризации. Ее можно осуществить с помощью соответствующих схем в модулях формирования сигнала или с помощью алгоритмов программного обеспечения. Настоятельно рекомендуется линеаризовать характеристики термисторов. Большую озабоченность вызывает надлежащая защита датчика от воздействий радиации. В АМС широко используются радиационные экраны, согласованные с размерами датчика, которые заменяют обычные, естественно вентилируемые будки Стивенсона. Для получения точных измерений радиационные экраны должны искусственно вентилироваться со скоростью воздуха примерно 3 м/с, однако следует принимать предосторожности для предотвращения попадания аэрозолей и мелкого дождя, с тем чтобы не допустить эффектов влажного термометра.

Влажность. Весьма полный обзор датчиков влажности для использования в АМС можно найти в публикации ВМО (1989*b*).

Несмотря на широкое использование в АМС сравнительно недорогих резистивных и емкостных датчиков для прямых измерений относительной влажности, у них все еще наблюдается ухудшение их работы и требуются специальные защитные фильтры. Взаимные сравнения показывают, что для измерения при температуре ниже 0 °С необходимо применять дополнительные коррекции, даже если датчики имеют схемы компенсации температуры, и что в условиях насыщения возникают проблемы гистерезиса.

В АМС также используются измерители точки росы, такие, как подогреваемый хлористолитиевый датчик и датчик с охлаждаемым зеркалом. Основной недостаток хлористолитиевых датчиков состоит в их чувствительности к перебоям в питании; после таких перебоев требуется вмешательство на месте. Наиболее удачным датчиком считается оптический измеритель точки росы, однако необходимо провести дальнейшие исследования, с тем чтобы разработать хорошее автоматическое устройство для очистки зеркала.

Проблемы, связанные с малой постоянной времени многих датчиков влажности, являются более значительными по сравнению с проблемами датчиков температуры. Как и при измерениях температуры, все типы датчиков необходимо помещать в соответствующие радиационные экраны. Предпочтение следует отдавать радиационным экранам с наддувом или хорошей вентиляцией. Экраны могут быть похожи по своей конструкции на те экраны, которые используются для измерений температуры. Большие ошибки могут возникать из-за проблем, связанных с наддувом и чисткой.

Ветер. Использование традиционных чашечных или пропеллерных анемометров с импульсным или частотным выходом является широко распространенным и не вызывает никаких технических проблем, связанных с обледенением в суровых условиях. Это осложнение можно преодолеть посредством подогрева датчика в условиях умеренного обледенения, однако оно приводит к значительному увеличению потребления электроэнергии. Рекомендуется, чтобы у новых чашечных и пропеллерных анемометров путь синхронизации был меньше 5 м и чтобы в новых цифровых системах частота отсчетов была сопоставима с параметрами используемой фильтрации. В случае использования счетных устройств это означает, что число импульсов, приходящееся на один интервал отсчетов, принимается за одно измерение.

На АМС также широко применяются традиционные аналоговые приборы, снабженные потенциометром для измерений направления ветра. Получают все большее распространение флюгеры с устойчивым естественным цифровыми устройствами кодирования угла, обычно в той или иной форме кода Грея.

Рекомендуется использование флюгеров с путем стабилизации менее 10 м и коэффициентом затухания между 0,3 и 0,7. Для флюгеров с цифровыми кодирующими устройствами требуется минимальное разрешение, равное 7 битам.

КПМН также рекомендует, чтобы в новых системах имелась возможность сообщений о стандартных отклонениях скорости и направления ветра с разрешением 0,1 м/с и 10° соответственно.

Типичным примером интеллектуального датчика является система измерения параметров ветра с последовательным выводом цифровых данных и одним или несколькими цифровыми дисплеями, обеспечивающими непосредственное визуальное отображение оперативных переменных (пиковая величина ветра, средние значения скорости ветра за 2 минуты и 10 минут, направление ветра и экстремальные величины).

Осадки. Наиболее часто на АМС для измерения осадков используется дождемер с опрокидывающимся сосудом. Дождемеры быстро наполняются мусором – листьями, песком или птичьим пометом; поэтому необходимо следить за такими АМС, которые длительное время используются без обслуживания. Для измерения количества жидких и твердых осадков при температуре ниже 0 °C требуется подогрев различных частей дождемера. Это может вызвать серьезные проблемы с электроснабжением, особенно на АМС, работающих от батарей. Необходимо иметь в виду, что при подогреве дождемера могут появляться ошибки из-за потерь на испарение. Точность наблюдений 5 – 10 % считается отличной. Улучшить точность можно путем ограждения дождемера от воздействий ветра (например, защита Нифера) (для сравнений датчиков осадков см. публикацию WMO, 1994).

Солнечное сияние. Для измерения продолжительности солнечного сияния существует целый ряд датчиков с электрическим выходом. См. публикацию WMO (1989*c*). ВМО приняла в качестве порогового значения, соответствующего наличию солнечного сияния, плотность потока лучистой энергии, равную 120 Вт/м^2, разрешив таким образом давнишнюю проблему. К недостаткам датчика солнечного сияния, работающего длительное время без обслуживания, относится накопление грязи на диафрагме прибора, что приводит к заметным отклонениям от порогового значения.

Радиация. Большинство датчиков, используемых на традиционных станциях, могут быть подключены к автоматической системе. Основная техническая проблема состоит в том, что эти датчики обычно представляют собой аналоговые устройства, имеющие выходной сигнал в виде очень малого непрерывно меняющегося напряжения. Это напряжение сильно подвержено электромагнитным помехам при передаче их по кабелю, и необходимо проводить адекватные измерения. Проблема загрязнения входной диафрагмы при радиационных измерениях (которые представляют собой абсолютные измерения) является более серьезной, чем при измерениях солнечного сияния. Считается, что отложение пыли на неочищенной поверхности стеклянных защитных полусферических колпаков пиранометра приводит к потере точности в 2 % (исключая дни с инеем и росой). Вследствие этого трудно предвидеть эффективное использование радиационных измерений на станциях, которые не обслуживаются в течение нескольких дней. Достижимая погрешность измерений (среднесуточных значений) составляет около 5 %.

Высота нижней границы облаков. Измерение высоты нижней границы облаков на АМС в настоящее время осуществляется главным образом с помощью облакомеров (лазерных). Для оценки существующих систем можно обратиться к публикации ВМО (1988*b*). Все еще встречаются трудности при обработке сигналов от датчиков в автоматическом режиме, с тем чтобы получить точные измерения высоты нижней границы облака во всем диапазоне встречающихся природных условий, в частности в случае дождя и снега. Еще одна трудность состоит в том, что датчики измеряют высоту нижней границы облака только на небольшой площади небосвода, расположенной непосредственно над прибором. Такая информация, выданная пользователю, удаленному от пункта наблюдения, особенно для обслуживания авиации, будет представлять сильно искаженную картину состояния неба или покрытия его облаками. Этот недостаток можно преодолеть посредством использования алгоритмов для оценки облачного покрова в течение 30-минутного интервала обработки. В некоторых странах облакомер является только вспомогательным средством для наблюдателя, имеющего в поле зрения весь небосвод. Облакомеры обычно требуют значительных затрат электроэнергии и могут использоваться лишь при наличии энергопитания от сети. Более того, их эксплуатационные характеристики ухудшаются или искажаются из-за накопления снега, пыли или других загрязняющих веществ на окошке выходной и входной диафрагмы для оптического или инфракрасного луча.

Видимость. Для измерения метеорологической дальности видимости на АМС имеется большое количество разнообразных приборов. Для справки можно обратиться к публикации ВМО (1990*a*).

Можно указать на различие между трансмиссометрами и измерителями дальности видимости. Высокоточные трансмиссометры обычно используются в аэропортах, в то время как измерители с более низкой точностью (и менее дорогостоящие), основанные на обратном, прямом или интегральном рассеянии, чаще используются на прочих АМС. Оба типа имеются в таких вариантах исполнения, которые обеспечивают питание от батарей, и поэтому могут использоваться в удаленных точках, в которых нет первичных сетей переменного тока или электроснабжения. Однако они потребляют все же значительное количество электроэнергии, и поэтому при отсутствии на отдаленных АМС дополнительных источников питания срок их действия без замены батарей составляет несколько недель.

1.2.2 Центральный процессорный блок

Ключевым элементом автоматической метеорологической станции является ЦПБ. Конфигурация его аппаратного обеспечения зависит от сложности и общего объема функций, возложенных на станцию, и поэтому существует множество вариантов решения аппаратного обеспечения. Как правило, основные функции ЦПБ заключаются в сборе, обработке, хранении и передаче данных.

На большинстве существующих АМС все эти функции выполняются одной микропроцессорной системой, установленной в защищенном от воздействий погоды месте по возможности ближе к датчикам или в закрытом помещении. Когда устройство располагается вблизи датчиков, обработка данных производится на месте, что позволяет уменьшить количество передаваемых данных и представлять эти данные в форме, пригодной для непосредственной подачи в обычные каналы связи. Однако в этих случаях ЦПБ уязвим к отказам в энергоснабжении и обычно должен быть защищен от влияний внешней среды, в которой он должен работать. Если блок располагается в помещении, то, как правило, его можно подсоединить к сети электропитания и эксплуатировать в обычных комнатных условиях. Однако подобная конфигурация требует большого числа длинных сигнальных кабелей и соответствующих формирователей сигналов.

В зависимости от местных условий и требований различные функции ЦПБ могут также выполняться разными устройствами. В таких случаях каждое устройство имеет свой собственный микропроцессор и соответствующее программное обеспечение, может располагаться в различных местах станции и связываться между собой посредством надежных межпроцессорных линий и процедур передачи данных. Они работают по схеме главный–подчиненный, при этом устройство обработки данных является главным устройством. Примером могут быть устройства сбора данных, установленные в районе, близком к датчикам, и соединенные с устройством обработки или передачи данных ЦПБ одной или несколькими телефонными линиями, использующими цифровую передачу данных. Эти устройства могут состоять из одного датчика (например, интеллектуальный датчик, такой, как лазерный облакомер), ряда аналогичных датчиков (например, термометров) или ряда различных датчиков.

Быстрое технологическое развитие современных промышленных систем сбора данных и контроля обработки открывает новые пути для метеорологических применений. Высокая степень модуляции сигнала на входе/выходе и гибкости, все возрастающие скорости работы микропроцессоров и особенно наличие специального программного обеспечения сбора, обработки, контроля и передачи данных позволяют разрабатывать АМС, которые могут удовлетворять различные потребности и требования разных пользователей. Поэтому любое описание АМС через короткий промежуток времени устаревает и может использоваться с определенными оговорками. В связи с этим в следующих разделах дается общее описание достижений в этой области.

1.2.2.1 Сбор данных

Как правило, аппаратное обеспечение для сбора данных включает:

a) аппаратное обеспечение формирования сигнала, предотвращающее нежелательные помехи от внешних источников, искажающие первичные сигналы датчика, защиту оборудования ЦПБ и приведение сигналов к форме, пригодной для дальнейшей обработки данных;
b) электронное оборудование для сбора данных с аналоговым и цифровым входными каналами и портами, аппаратурой сканирования и преобразования данных для ввода сигналов в память ЦПБ.

Формирование сигнала

Формирование сигнала является важной функцией в процессе получения данных и начинается с выбора соответствующих кабелей и соединений для подключения датчика к электронным устройствам сбора данных. Далее оно осуществляется с помощью различных аппаратных модулей. Будучи заимствованными из области управления промышленным процессом, несколько функций формирования в настоящее время воспроизводятся в одном сменном модуле. Наиболее подходящим и удобным, а отсюда и наиболее обычным местом расположения этих

модулей являются оконечные платы кабелей датчика в том же самом водонепроницаемом кожухе, что и устройство сбора данных. В зависимости от датчика и местных условий имеются различные методы формирования сигнала.

Кабели датчика. Электрические сигналы от датчиков, входящие в систему сбора данных, могут содержать нежелательный шум. Мешает ли этот шум, зависит от отношения сигнала к шуму и от конкретного применения. Цифровые сигналы практически невосприимчивы к шуму в связи с их дискретным (и высокоуровенным) характером. Аналоговые сигналы, в отличие от цифровых, подвергаются помехам даже сравнительно невысокого уровня. Основными путями передачи шума являются емкостные и индуктивные соединения. С целью снижения ошибок, возникающих из-за емкостного соединения, используют экранированные кабели, в которых электропроводящий экран (с потенциалом земли) размещается между сигнальными кабелями и источником помех. Для снижения индуктивной связи эффективным средством является использование дополнительных скрученных пар проводов.

Защита от перенапряжения. В случаях, когда АМС может подвергаться случайным всплескам высокого напряжения, обязательной является установка защиты, с тем чтобы избежать возможного повреждения аппаратуры. Высокое напряжение может возникать от магнитных полей, статического электричества и особенно от грозовых разрядов.

Двухпроводные передатчики. Иногда необходимо предварительно усилить низкоуровенные сигналы вблизи датчика, с тем чтобы сохранить максимальное отношение сигнала к шуму. Одним из способов выполнения такого рода формирования сигнала является использование двухпроводного передатчика. Эти передатчики не только усиливают входной сигнал, но и обеспечивают изоляцию и преобразование в сигнал с более высоким уровнем тока (обычно от 4 до 20 мА). В настоящее время обеспечивается передача сигналов на расстояние около 1500 м.

Цифровая изоляция. Электрические модули используются для получения входных цифровых сигналов с одновременным разрывом гальванического соединения между источником сигнала и измерительной аппаратурой. Эти модули не только изолируют, но также трансформируют входные сигналы в стандартные уровни напряжения, которые можно считывать с помощью оборудования для сбора данных.

Аналоговая изоляция. Модули аналоговой изоляции используются для защиты оборудования от контактов с высокими напряжениями, разрыва заземленных замкнутых цепей и устранения значительных синфазных помех. В настоящее время широко используются три типа аналоговой изоляции: недорогие емкостные соединения или «летающий конденсатор», оптические соединения с хорошими характеристиками и умеренной ценой и трансформаторное соединение с высокими изоляционными свойствами и точностью, но значительно большей стоимостью.

Низкочастотное фильтрование. Фильтры используются для отделения желаемых сигналов от нежелательных помех. К нежелательным помехам относятся: шум, наводки со стороны линии переменного тока, помехи от радио- и телевизионных станций и сигналы с частотами выше 1/2 частоты основного сигнала. Обычно для подавления нежелательных источников ошибки используется низкочастотный фильтр, исключающий ту часть частотного спектра, в которой не бывает желаемых сигналов.

Усилители. Сигналы аналогового датчика могут изменяться по амплитуде в широком диапазоне. Аналого-цифровой (А/Ц) преобразователь, однако, требует сигнала высокого уровня, с тем чтобы получить наилучшие характеристики. Во многих случаях усилительный модуль используется для усиления возможных сигналов низкого уровня до желательной амплитуды. Усилительные модули используются также для стандартизации выходного напряжения всех датчиков и приведения к обычному напряжению постоянного тока, например 0 – 5 В.

Сопротивления. Специальные модули используются для преобразования сопротивлений, например платиновых термометров, в линейное выходное напряжение сигнала и обеспечения необходимых токов для такого преобразования. Следует отметить, что преобразование в линейный сигнал может вносить неточности, которые могут быть значительными для некоторых применений.

Функция сбора данных

Функция сбора данных заключается в сканировании выходов датчиков или формирующих модулей датчиков с заранее заданной скоростью и преобразовании сигналов в форму, пригодную для считывания компьютером.

Для размещения метеорологических датчиков различных типов аппаратное обеспечение этой функции состоит из входных/выходных каналов различных типов, рассчитанных на все возможные электрические выходные характеристики датчиков или модулей формирования сигнала. Общее

количество каналов каждого типа зависит от выходных характеристик датчиков и определяется типом применения.

Аналоговые вводы. Число аналоговых каналов обычно заключено в пределах от 4 и до 32. В целом базовую конфигурацию можно расширить за счет дополнительных модулей входных каналов. Особое значение имеют аналоговые входные каналы, поскольку большинство обычно используемых метеорологических датчиков, таких как датчики температуры, давления и влажности, дают сигнал напряжения либо непосредственно, либо прошедший через формирующие модули датчика.

Задачи сбора данных состоят в сканировании каналов и переводе из аналоговой формы в цифровую. Сканирующее устройство – это просто устройство переключения, которое позволяет обслуживать несколько каналов аналогового ввода с помощью одного А/Ц преобразователя. С помощью программного обеспечения можно управлять этими переключениями, с тем чтобы выбрать один канал для обработки в определенное время. А/Ц преобразователь преобразует первоначальную аналоговую информацию в данные, пригодные для считывания компьютером (цифровые, в двоичном коде). Разрешение А/Ц преобразователя выражается в битах. Разрешение А/Ц преобразователя 12 бит соответствует примерно 0,025 %, 14 бит – 0,006 %, а 16 бит – 0,0015 % полного диапазона или шкалы А/Ц преобразователя.

Параллельный цифровой ввод/вывод. Общее количество отдельных каналов в большинстве случаев группируется в блоки от 8 до 16 бит с возможностью расширения. Они используются для отдельного бита или состояния измерения или для подключения датчиков с параллельным цифровым выводом (например, флюгеры с выводом в коде Грея).

Импульсы и частоты. Обычно количество каналов ограничивается 2 или 4. Типичными датчиками являются датчики измерения скорости ветра и дождемеры (с опрокидывающимся сосудом). Используются счетчики с низкой и высокой скоростью, накапливающие импульсы в памяти ЦПБ. Система, которая регистрирует импульсы или состояние преобразователя «включено–выключено», известна под названием регистратора событий.

Последовательные цифровые порты. Это отдельные асинхронные последовательные вход/выход (Вх./Вых.) каналы для связи с интеллектуальными датчиками. Порты обеспечивают протокольную связь между устройствами на короткие (RS232, несколько метров) и длинные (RS422/485, несколько километров) расстояния. На одной и той же линии и входном порте могут быть различные датчики или измерительные системы, и каждый из датчиков поочередно опрашивается с помощью кодовых слов.

1.2.2.2 Обработка данных

Аппаратное обеспечение обработки данных является центральной частью ЦПБ, а его основные функции заключаются в центральном управлении вводом/выводом данных в ЦПБ и из него и в осуществлении должной обработки всех входящих данных с помощью соответствующего программного обеспечения.

Работой аппаратного обеспечения управляет микропроцессор. Микропроцессоры не изменяют принципов метеорологических измерений и методик наблюдений, но они позволяют конструктору приборов реализовать технические функции новым способом, с тем чтобы можно было производить измерения удобнее, быстрее и более надежным способом и обеспечить прибору более высокие технические возможности, особенно при обработке данных. Применение микропроцессоров значительно снижает стоимость аппаратного обеспечения для ряда применений. Необходимо, однако, отметить, что слишком сложные задачи, которые ставятся перед этим устройством, приводят к быстрому возрастанию стоимости разработки программного обеспечения, что часто недооценивается.

Существующие АМС оборудованы 8-битовыми микропроцессорами и имеют ограниченную память (32 – 64 кбайт). Стандартными становятся новые системы, использующие 16-битовые и даже 32-битовые микропроцессоры, поддерживаемые твердотельными запоминающими устройствами с большим объемом памяти (до 1 Мбайт). Эти АМСН обеспечивают большие возможности для входа/выхода и работы на значительно более высоких скоростях обработки и способны выполнять сложные вычисления. Вместе с новым аппаратным обеспечением применяется сложное программное обеспечение, которое несколько лет назад имелось только для миникомпьютерных систем. Устройство может быть снабжено различными типами памяти, такими, как запоминающее устройство с произвольной выборкой (ЗУПВ) для данных и хранения программы, программируемое постоянное запоминающее устройство (ППЗУ) для хранения программ (программы вводятся посредством программатора ППЗУ) и электрически стираемое программируемое ПЗУ (ЭСППЗУ), используемое в большинстве случаев для хранения постоянных, которые могут изменяться непосредственно программой. На

большинстве станций ЗУПВ снабжается резервной батареей, с тем чтобы не терять данные в случае прерывания энергопитания. Данные неоперативных станций без средств их передачи можно хранить на внешних запоминающих устройствах. Используемые для этой цели в течение многих лет механические устройства с лентами в настоящее время заменяются платами памяти (ЗУПВ с резервной батареей, ЭСППЗУ и т. п.), которые имеют более высокую надежность.

1.2.2.3 Передача данных

Часть, касающаяся передачи данных ЦПБ, формирует связь с внешней средой, которой может быть местный наблюдатель или обслуживающий персонал, центральная система сетевой обработки национальной метеорологической и гидрологической службы или даже непосредственно потребители метеорологической информации. Подключение аппаратуры к ЦПБ производится обычно с использованием последовательных и параллельных портов ввода/вывода. Выбор наиболее подходящих средств передачи данных зависит главным образом от рассматриваемого места и имеющейся передающей аппаратуры. Нельзя рассматривать какое-то одно решение как наилучшее, и иногда для передачи требуется использование нескольких средств (см. раздел 1.3.2.10).

1.2.3 Периферийное оборудование

Энергообеспечение. Конструкция и технические возможности АМС в значительной мере зависят от используемого способа энергопитания. Наиболее важной характеристикой энергообеспечения АМС является работа с высокой устойчивостью и без помех. С учетом безопасности, широкого распространения и доступности аккумуляторных автомобильных батарей в 12 В следует уделить внимание использованию источника энергии постоянного тока в 12 В. Там, где имеется питание от сети, 12-вольтные аккумуляторы могут находиться в режиме непрерывного подзаряда от сети. Преимуществом такой системы является автоматическое резервирование энергопитания в случае отказа электросети. Автоматические метеорологические станции, расположенные в удаленных местах, где нет электросети, должны обходиться аккумуляторами без зарядки или с зарядкой от дополнительного источника питания, такого, как дизельный, ветровой или водяной генератор или солнечные батареи. Однако такие системы с недостаточным питанием, как правило, не могут обеспечивать работу более сложных датчиков, например датчиков измерения высоты нижней границы облаков и видимости, для которых требуется большое количество энергии. Более того, АМС с дополнительным оборудованием, таким, как подогреватели (в анемометрах, дождемерах) и вентиляторы, могут также потреблять значительное количество энергии, что соответственно ограничивает установку АМС теми местами, где имеется сетевое электроснабжение. Если же только питание от сети многоцелевых и сложных систем может обеспечить их функционирование по полной программе, то необходимо предусмотреть резервное энергопитание, по крайней мере для часов системы, процессора и какого-либо запоминающего устройства, где могут содержаться последние данные, необходимые для перезапуска станции на автоматический режим.

Часы реального времени. Важной частью блока обработки данных являются круглосуточно функционирующие часы реального времени, работающие от аккумулятора и обеспечивающие отсчет времени даже в случае отказа энергопитания. Обеспечение точности часов на АМС требует особого внимания для гарантирования правильного считывания показаний приборов, интервалов измерения и отметок времени. На некоторых АМС используются устройства для синхронизации часов с сигналами времени, транслируемыми по радио, или с Глобальной системой определения местоположения.

Встроенное контрольное оборудование. В состав важнейших частей АМС часто входят компоненты, неправильное функционирование или выход из строя которых серьезно искажают или делают бесполезными выходные данные. Эффективным средством постоянного контроля характеристик во время работы этих компонентов является включение блоков автоматического контроля. К ним относятся, например, устройство слежения за прерыванием энергопитания, которое перезапускает процессор и обеспечивает продолжение работы АМС после прерывания энергоснабжения; контрольный таймер для контроля работы микропроцессоров; и тестовые цепи для мониторинга работы подсистем станции, таких, как напряжение аккумулятора и работа зарядного устройства, вентиляторов (защита от влияния температуры и влажности), преобразователи переменного тока в постоянный, обогреватели и т.д. Информацию о состоянии можно автоматически вывести на экран на месте или же ввести в ЦПБ для контроля качества и для целей обслуживания.

Местные дисплей и терминалы. Зачастую предусматривается ввод или редактирование вручную данных наблюдений, например на полуавтоматических метеорологических станциях. В зависимости от потребностей и конструкции станции для этой цели используются различные типы местных

терминалов, такие, как простой цифровой светодиодный дисплей (СДД) с клавиатурой, являющийся неотъемлемой частью ЦПБ, экран с клавиатурой или даже небольшой персональный компьютер, установленный на некотором удалении, но в пределах местного помещения. Для цели обслуживания иногда используют специальные переносные терминалы, которые можно подключать непосредственно к станции. Для конкретных применений, таких, как АМС в аэропортах или простые станции в помощь наблюдателю, цифровые дисплеи соединяются для отображения данных в одном или нескольких местах площадки. По запросу к станции можно добавить печатающее устройство или графопостроители.

1.3 ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АВТОМАТИЧЕСКИХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

При конструировании АМС или подготовке спецификации на нее руководящим принципом является то, что одним из самых крупных дорогостоящих элементов будет разработка и тестирование программного обеспечения. Сложное программное обеспечение вскоре становится негибким и трудным для использования, если не проявить большой осмотрительности при его начальной разработке и не обеспечить строгой дисциплины при кодировании. Небольшие изменения к требованиям, например, часто вызванные необходимостью в новом датчике, изменения в коде или в критериях контроля качества, нередко могут повлечь за собой серьезные и весьма дорогие пересмотры программного обеспечения.

В целом можно провести различие между прикладным программным обеспечением, состоящим из алгоритмов для должной обработки данных в соответствии со спецификациями пользователей, и системным программным обеспечением, неотъемлемо связанным с конфигурацией микропроцессора и включающим все программное обеспечение, необходимое для разработки и отладки прикладного программного обеспечения.

Рекомендации по разработке алгоритмов для АМС даны выше в разделе 1.1.3. Подготовка алгоритмов для синоптических АМС рассматривается в публикации ВМО (1987), а для обработки данных о приземном ветре – в публикации ВМО (1991). Для получения более подробной информации, касающейся выборки, приведения данных и контроля качества, следует обращаться к соответствующим главам части III.

1.3.1 Системное программное обеспечение

Программное обеспечение для многих существующих АМС разрабатывается изготовителем в соответствии с требованиями пользователя и вводится в запоминающее устройство ЦПБ в формате, который пользователь не может считывать (так называемое микропрограммное обеспечение), что делает ЦПБ своего рода черным ящиком. Пользователь может выполнять только заранее определенные команды и вследствие этого полностью зависит от изготовителя в случае неисправностей или модификаций.

К счастью, возрастающий спрос на системы сбора данных для управления промышленными процессами открыл новые возможности. Пользователи могут теперь разрабатывать свое собственное программное обеспечение для применений (или предоставить это компании, занимающейся разработкой программного обеспечения, или даже поручить это изготовителю станции), используя языки программного обеспечения, такие, как Basic, Pascal или, в частности, C, и легкодоступные пакеты утилит для сбора данных, статистической информации, хранения и передачи. В результате этого пользователь получает больший доступ к управлению и контролю за различными процессами и становится вследствие этого менее зависимым от изготовителя станции.

В современных системах все больше используются хорошо зарекомендовавшие себя системы, работающие в режиме реального времени со многими задачами/многими пользователями, которые в прошлом были доступны лишь для миникомпьютеров. Они работают в масштабе реального времени, поскольку все операции запускаются аппаратными прерываниями или прерываниями программного обеспечения, являются мультипрограммными, так как способны решать различные задачи квазисинхронно в соответствии с заранее заданной приоритетностью, и рассчитаны на несколько пользователей, поскольку различные пользователи почти одновременно могут иметь доступ к этой системе. Разработчики программного обеспечения могут полностью сосредоточить свое внимание на разработке прикладных программ, выбирая язык программирования по собственному усмотрению и оставляя решение очень трудных и сложных задач по управлению оперативной системой.

1.3.2 Прикладное программное обеспечение

Функции обработки, которые должны выполняться ЦПБ, внешними датчиками, или вместе теми и другими, зависят от типа автоматической

метеорологической станции и цели, для которой она используется. Обычно требуются все следующие операции или часть из них: инициализация, контроль выхода датчика, преобразование выходных сигналов датчика в метеорологические данные, линеаризация, осреднение, ручной ввод данных наблюдений, контроль качества, приведение данных, форматирование и проверка сводки, хранение данных, передача данных, отображение данных на дисплее. Последовательность выполнения этих функций является приблизительной. Контроль качества можно осуществлять на различных уровнях: сразу же после проверки, после получения метеорологических переменных или после ручного ввода данных и форматирования сводки. Если отсутствует контроль качества данных и содержания сообщений, то данные АМС будут содержать, вероятно, невыявленные ошибки. Несмотря на то что линеаризация может являться неотъемлемой частью функции датчика или модуля формирования сигнала, ее всегда следует проводить до расчета среднего значения.

Выполнение прикладной программы определяется блоком оперативного управления, контролирующим, когда и какие задания следует выполнять. Обзор прикладного программного обеспечения АМС в следующих разделах ограничивается некоторыми практическими аспектами, касающимися АМС.

1.3.2.1 Инициализация

Инициализация – это процесс, который подготавливает все запоминающее устройство, устанавливает все оперативные параметры и начинает исполнение прикладной программы. Для того чтобы начать нормальную работу, для программы прежде всего требуется наличие ряда конкретных параметров: параметров станции (кодовый номер, высота, широта и долгота); даты и времени; физического адреса датчика в разделе сбора данных; типов и характеристик модулей согласования датчиков; коэффициентов преобразования и линеаризации для преобразования выходных данных датчика в метеорологические величины; границ абсолютных значений и скорости изменения величин для целей контроля качества данных; места файла буферизаций данных и т.п. В зависимости от станции все или часть из этих параметров можно вводить на месте или изменять по усмотрению пользователя с использованием интерактивных меню на терминале. В последнем поколении АМС инициализацию можно проводить даже дистанционно, например, с помощью центральной системы сети обработки или удаленного персонального компьютера. Кроме полной инициализации, следует запрограммировать частичную инициализацию. Она автоматически восстанавливает обычную работу без каких-либо потерь накопленных данных после временного отключения, вызываемого установкой часов реального времени, обслуживанием, поверкой или выходом из строя энергоснабжения.

1.3.2.2 Выборка и фильтрация

Выборку можно определить как процесс получения хорошо упорядоченной пространственной последовательности измерений переменной. Для обработки сигналов метеорологического датчика в цифровой форме возникает вопрос, как часто следует делать выборку выходных данных датчика. Важно обеспечить, чтобы последовательность выборок адекватно представляла существенные изменения измеряемой атмосферной переменной. Общепринятым неписаным правилом является один отсчет на временном интервале, равном постоянной времени датчика. Однако в связи с тем, что некоторые метеорологические переменные имеют высокую изменчивость, сначала производят необходимое фильтрование или сглаживание посредством подбора датчиков с подходящей постоянной времени или с помощью методов фильтрации и сглаживания в модулях формирования сигнала (см. часть III, глава 2).

Учитывая необходимость взаимозаменяемости датчиков и однородности данных наблюдений, рекомендуется:[12]

(a) чтобы отсчеты, выполняемые для расчета средних, получали в равные интервалы времени, которые:
   (i) не превышают постоянную времени датчика; или
   (ii) не превышают постоянную времени аналогового низкочастотного фильтра после линеаризации выхода датчика малой инерционности; или
   (iii) достаточны по количеству, с тем чтобы обеспечить приведение неопределенности среднего из отсчетов к приемлемому уровню, например, менее требуемой точности осреднения;

(b) чтобы отсчеты, используемые при оценке экстремальных величин флуктуации, производились по меньшей мере в четыре раза чаще, чем определено в (i) или (ii) выше.

1.3.2.3 Преобразование необработанных данных

Преобразование необработанных данных датчика состоит в трансформировании электрических

[12] Рекомендовано Комиссией по приборам и методам наблюдений на ее десятой сессии (1989 год), рекомендация 3 (КПМН-X).

выходных величин от датчиков или от модулей формирования сигнала в метеорологические единицы. Процесс связан с применением алгоритмов преобразования, использующих коэффициенты и соотношения, полученные во время процедур калибровки.

Важно учитывать то, что некоторые датчики являются по своему существу нелинейными, т. е. их выходные сигналы не являются прямо пропорциональными измеряемым атмосферным переменным (например, термометр сопротивления), что в ряде случаев результаты измерений включают в себя компоненты нелинейного воздействия других переменных (например, некоторые датчики давления и влажности подвержены влиянию температуры) и что, хотя сам датчик может быть линейным или включать в себя цепи линеаризации, непосредственно измеряемые переменные и измеряемая атмосферная переменная находятся в нелинейной зависимости (например, сигнал с выхода датчика высоты облаков с качающимся лучом, имеющего фотодетектор и устройство измерения угла наклона луча в момент максимума потока рассеянного назад света, находится в нелинейной связи с высотой нижней границы облаков). Поэтому необходимо включать поправки на нелинейность в алгоритмы преобразования, а если это не делать, то использовать модули формирования сигнала. Линеаризация является особенно важной в тех случаях, когда необходимо рассчитывать средние величины за какой-то период времени. Действительно, когда сигнал датчика не является постоянным в течение всего периода осреднения, последовательность действий «осреднить, затем линеаризировать» может привести к результатам, отличающимся от результатов при последовательности «линеаризировать, затем осреднить». Правильная процедура заключается в осреднении только линейных переменных.

1.3.2.4 Мгновенные значения метеорологических величин

Вследствие естественной мелкомасштабной изменчивости атмосферы, введения шума в процесс измерения электронными устройствами, и в частности использование датчиков с малыми постоянными времени приводит к тому, что осреднение является наиболее желательным процессом в целях снижения неопределенности сообщаемых данных.

В целях стандартизации алгоритмов осреднения рекомендуется:[13]

(a) чтобы данные об атмосферном давлении, температуре воздуха, влажности воздуха, температуре поверхности моря и дальности видимости сообщались как средние значения за интервалы времени, выбранные в пределах от 1 до 10 минут, которые получают после линеаризации выхода датчика;

(b) чтобы данные о ветре, за исключением порывов ветра, сообщались как средние за 2 или 10 минут, которые получают после линеаризации выхода датчика.

Эти осредненные значения условно принимаются за «мгновенные» значения метеорологических переменных, использующихся в большинстве оперативных применений и их не следует путать с необработанными выборками мгновенных значений с датчика или с осредненными за более длительные периоды времени значениями, которые требуются для некоторых применений. В качестве «мгновенных» значений для большинства переменных предлагается использовать среднее за одну минуту, насколько это возможно. Исключениями являются измерения параметров ветра (см. (b) выше) и волнения (средние за 10 или 20 минут). Учитывая несовпадение данных о порывах ветра, измеренных ветроизмерительными системами с различными динамическими характеристиками, рекомендуется подбирать фильтрационные характеристики ветроизмерительной цепи такими, чтобы сообщаемые данные о порывах представляли собой среднее значение за три секунды. Сообщать следует о наибольших значениях средней за три секунды. На практике это осуществляется обработкой серии отсчетов с выхода датчика, при которой скользящая средняя за три секунды рассчитывается по меньшей мере от одного до четырех раз в секунду.

Некоторые конкретные количественные величины, требующие преобразования и осреднения перед преобразованием, приводятся в части III, глава 2.

1.3.2.5 Ручной ввод данных наблюдений

Ряд приложений требует разработки интерактивных терминальных процедур, позволяющих наблюдателю вводить и редактировать результаты визуальных или иных субъективных наблюдений, для которых на станции не предусматриваются автоматические средства. Обычно сюда относят характеристики текущей и прошедшей погоды, состояние поверхности земли и другие, а также атмосферные явления.

1.3.2.6 Приведение данных

Кроме мгновенных метеорологических данных, непосредственно получаемых из выборок данных

[13] Рекомендовано Комиссией по приборам и методам наблюдений на ее девятой сессии, 1985 г., рекомендация 6 (КПМН-IX).

после соответствующего преобразования, необходимо вычислить связанные с ними другие оперативные метеорологические величины и статистические характеристики. Для большинства из них используются сохраняемые мгновенные значения, в то время как другие данные получают при более высокой скорости замеров, например при расчетах порыва ветра. Примерами приведения данных являются расчет величин температуры точки росы по результатам исходных измерений относительной влажности, а также приведения давления к среднему уровню моря. К статистическим данным относятся экстремальные значения за один срок и более (например, температуры), суммарные значения (например, количества осадков) за определенные периоды времени (от минут до суток), средние за различные сроки (климатологические данные) и интегрированные значения (радиация). Эти переменные или количественные характеристики можно рассчитать на АМС или в центральной системе обработки данных сети с обычно большими вычислительными мощностями обработки.

КПМН занимается широкой программой обзора и стандартизации алгоритмов для всех переменных. Результаты будут опубликованы в публикации ВМО Instruments and Observing Methods Reports (ВМО, 2003*b*) (Отчеты по приборам и методам наблюдений).

Существуют официальные рекомендации, касающиеся расчета барической тенденции[14] и количественных характеристик влажности[15] (приложение 4.B, глава 4, часть I).

ВМО изучила методы приведения давления, используемые странами-членами в 1952 году (ВМО, 1954), и пришла к выводу о том, что на практике применяются «международная формула» (использующая формулу таблиц Лапласа или Ангота) или некоторые «упрощенные» методы (например, станции «низкого уровня»[16]; см. часть I, глава 3). В результате этого изучения было проведено исследование по стандартизации методов приведения, и в качестве стандарта было рекомендовано общее уравнение приведения давления[17] (ВМО, 1964). Однако несмотря на этот рекомендованный метод, до сих пор обычной практикой является применение «международной формулы» и методов на основе упрощенных формул (ВМО, 1968).

1.3.2.7 Кодирование сообщений

Функциональные требования зачастую предусматривают кодирование метеорологических сообщений в соответствии с публикацией ВМО (1995). В зависимости от типа сообщения и кодируемых элементов этот процесс может быть проведен в автоматическом или в полуавтоматическом режиме. Подготовка сообщения в автоматическом режиме предполагает, что все кодируемые элементы являются измеряемыми величинами, в то время как полуавтоматический режим предполагает вмешательство наблюдателя для ввода результатов визуальных или иных наблюдений, таких, как текущая и прошедшая погода, состояние поверхности земли и тип облачности. Алгоритмы кодирования сообщений не нужно недооценивать; не только их разработка, но и обновление при изменении форматов в соответствии с международными, региональными и национальными правилами требуют значительных усилий. Они также требуют значительной части ресурсов памяти, что может быть решающим фактором для небольших станций. Следует также отметить, что результаты наблюдений могут передаваться в центральную систему обработки данных сети, где для кодирования сообщений обычно имеются более мощные вычислительные средства.

1.3.2.8 Контроль качества

Цель контроля качества на АМС – свести к минимуму количество неправильных наблюдений в автоматическом режиме и количество пропущенных наблюдений путем использования соответствующего аппаратного обеспечения, а также программных операций. Достижение обеих целей обеспечивает процесс, при котором результат каждого наблюдения получается из достаточно большого числа прошедших контроль качества выборок данных. Таким образом, выборки с крупными случайными ошибками можно изолировать и исключить, и обработка может далее продолжаться без этой выборки.

Контроль качества обеспечивает гарантированное качество и согласованность выходных данных. Это достигается благодаря тщательно разработанному набору процедур, предназначенных для должного техобслуживания, ремонта, калибровки и проверок качества данных. В настоящее время отсутствует какой-либо набор процедур или стандартов для различных компановок АМС. Следует разработать и докуметально оформить подобный набор процедур.

---

[14] Рекомендовано Комиссией по приборам и методам наблюдений на ее девятой сессии, 1985 г., рекомендация 7 (КПМН-IX).

[15] Рекомендовано Комиссией по приборам и методам наблюдений на ее десятой сессии, 1989 г., рекомендация 7 (КПМН-X).

[16] Рекомендовано Комиссией по приборам и методам наблюдений на ее первой сессии, 1953 г., рекомендация 13 (КПМН-I), и принято ИС-IV.

[17] Основано на рекомендациях рабочего комитета II КПМН-I по «Приведению давления», (ВМО, 1954, часть 2).

В современных АМС результаты процедур контроля качества данных от датчиков, выявляющих причины, по которым измерение является сомнительным или ошибочным, и результаты самоконтроля аппаратного обеспечения посредством встроенных средств контроля находятся в соответствующих устройствах хранения информации о состоянии станции. Визуализация этих показателей состояния представляет собой очень удобное средство при эксплуатации АМС. Ценным возможным подходом к эксплуатации и техническому обслуживанию метеорологического оборудования может являться передача содержимого устройств хранения информации о состоянии станций либо в виде приложения к обычным наблюдательным сводкам, либо в качестве запрограммированного или запрашиваемого от сети АМС сообщения в центральную сетевую систему обработки.

Для контроля качества данных АМС настоятельно рекомендуются процедуры в масштабе реального времени, и подробные рекомендации содержатся в части III, глава 1, а основные процедуры по контролю качества в публикации ВМО (1993). Ниже рассматриваются практические аспекты этих рекомендаций.

Проверки внутри датчика

Проверки внутри датчика – это проверки каждой выборки от датчика на самой ранней стадии обработки с учетом динамических характеристик датчика и формирования сигнала для вероятного значения величины и вероятной скорости ее изменения.

Вероятная оценка - это общая проверка того, что измеряемое значение величины находится в пределах абсолютных границ ее изменений. Эти границы обусловлены характером метеорологической переменной или явления, но зависят также от диапазона измерений отдельных датчиков и аппаратного обеспечения для получения данных. Могут также применяться дополнительные проверки по границам диапазона изменения, которые являются функциями географического района, сезона и времени года. Предлагаемые границы для этих дополнительных проверок представлены в таблицах 6.3 – 6.9 главы 6 публикации ВМО (1993). Эти проверки в результате предоставляют информацию об ошибочных или сомнительных значениях.

Вероятная скорость изменения – это проверка на вероятную скорость изменения от предшествующего приемлемого уровня. Результативность такой проверки зависит от временной однородности, или устойчивости, данных, и ее эффективность проявляется в отношении данных с высоким временным разрешением (высокая скорость выборки), поскольку с возрастанием скорости выборки повышается корреляция между соседними выборками. Одной из очевидных трудностей является определение того, насколько быстро может изменяться сама метеорологическая величина, поскольку имеется влияние динамической характеристики датчика. Можно проводить дополнительные проверки временной однородности, сравнивая данные двух последовательных сводок. В публикации ВМО (1993) представляются допуски на результаты проверки для различных временных периодов синоптического масштаба (1, 2, 3 , 6, 12 часов) для температуры воздуха, точки росы и барической тенденции.

Проверки согласованности датчиков

Можно провести контроль внутренней согласованности переменной с другими переменными, основываясь на определенных физических или метеорологических принципах. Вот некоторые из примеров: точка росы не может превышать температуру окружающей среды; осадки над местом наблюдения или только что прошедшие над ним при отсутствии облаков маловероятны; ненулевая скорость ветра при отсутствии колебаний направления ветра предполагает проблему с датчиком направления ветра; и нулевая средняя скорость ветра при ненулевых колебаниях направления (дисперсия) предполагают неисправность датчика скорости ветра.

Данные наблюдений, вводимые вручную

В тех случаях, когда в АМС вводятся вручную количественные данные наблюдений, можно проводить сравнение между самими датчиками и внешними устройствами, которые упоминаются выше. Некоторые специальные проверки на совместимость информации предлагаются в публикации ВМО (1993) относительно текущей погоды с дальностью видимости; текущей погоды с облачным покровом; облачного покрова, информации о погоде и облачности; текущей погоды с температурой воздуха; текущей погоды с температурой точки росы; высоты облаков с типом облаков; и состояния моря со скоростью ветра.

Проверки аппаратного обеспечения

Характеристики АМС ухудшаются в ходе ее эксплуатации в связи со старением компонент аппаратного обеспечения, влиянием неисследованных ранее ситуаций, плохим обслуживанием, выходом из строя изделия и т. п. Поэтому важно осуществлять и периодически автоматически проводить операции по внутренней самопроверке с использованием средств контроля, встроенных в аппаратуру АМС, для предоставления результатов этих проверок в распоряжение соответствующего персонала или для хранения

результатов в накопителях информации о состоянии станции. Можно изучать содержание этих накопителей, а информацию о состоянии станции использовать для классификации измерений как правильных, ошибочных или сомнительных.

Проверка сообщений

Для АМС с программным обеспечением для кодирования сообщений и передачи сообщений по Глобальной системе телесвязи важнейшее значение имеет выполнение всех вышеуказанных проверок с особой тщательностью. Кроме того, следует также контролировать соответствие правилам, касающимся знаков, чисел, форматов и т. п. В случае, когда величины оцениваются как сомнительные, следует предусматривать проведение соответствующих мер.

1.3.2.9 **Хранение данных**

Обработанные данные или данные наблюдений, введенные вручную, включая контроль качества информации о состоянии (данные о состоянии станций), следует накапливать или хранить в течение какого-то времени на АМС. Это связано с обновлением в масштабе реального времени соответствующей базы данных. Количество ячеек базы данных и требуемую память следует определить, исходя из максимально возможного количества датчиков, промежуточных данных, расчетных значений величин и необходимой автономности станции. Обычно структура оперативной памяти предусматривается такой, чтобы обеспечить замену устаревших данных новыми входящими данными по истечении заранее заданного периода времени. Структура базы данных должна обеспечивать легкий и свободный доступ с помощью алгоритмов перемещения данных и их передачи.

В зависимости от требований к наблюдениям и типа станции перемещение данных можно осуществлять в регулярные интервалы времени из основной памяти АМС в другие виды устройств хранения, такие, как сменные блоки памяти.

1.3.2.10 **Передача данных**

С учетом оперативных требований и средств связи передачу данных от АМС местным пользователям или центральной сетевой системе обработки можно осуществлять с помощью следующих различных режимов работы:

(a) наиболее известным основным режимом является реакция на внешние команды, поскольку она позволяет осуществлять контроль станции в наибольшей степени, т. е. инициализацию, установку и регулировку часов реального времени, удаление неисправных датчиков, передачу отдельной базы данных и т. п. После получения и передачи управления внешней команде выбирается соответствующая задача из списка или подпрограмма в зависимости от команды;

(b) в определенные интервалы времени, задаваемые программным таймером АМС;

(c) в чрезвычайных для АМС условиях, когда превышаются определенные метеорологические пределы

Общедоступные пакеты программного обеспечения для передачи данных можно в целом использовать для должного преобразования и контроля данных и для передачи по протоколам связи. Поскольку на средства передачи данных оказывают влияние различные источники помех, следует обратить особое внимание на адекватные методы предотвращения ошибок кодирования, такие, как проверка битов на четность и использование цикличных кодов с избыточностью. Ниже следует краткий обзор некоторых вариантов телесвязи для создания сети АМС.

Односторонняя связь

Простая сеть АМС могла бы использовать одностороннюю связь в тех случаях, когда удаленные станции функционируют с рассчитанным по времени циклом для сканирования каналов датчиков, или в иных случаях, когда создается аварийная ситуация, чтобы установить связь по телефонным линиям с управляющим и осуществляющим сбор данных компьютером, а после установления связи – для передачи их блоков данных. Каждая АМС могла бы иметь последовательный интерфейс с аналоговым модемом, и передача данных будет происходить, например, со скорость 9 600 бит в секунду (бит/сек) с использованием звуковых сигналов. Преимущества этой двухточечной системы связи заключаются в том, что она использует надежную и простую технологию, а также обычные телефонные линии речевого диапазона. Расходы, которые должны быть умеренными, зависят от тарифных расценок, учитывающих расстояние и время соединения. Недостатками является то, что защита данных является лишь посредственной; объемы данных должны быть относительно небольшими; невозможность использования каких-либо мощных сетевых архитектур; и возможность того, что телекоммуникационные компании ограничат будущий доступ к этим сетям аналоговых данных, поскольку технология неуклонно движется в направлении использования широкополосных цифровых сетей.

Двусторонняя связь

Более мощная сеть обладает двусторонней связью, и поэтому центральный компьютер может опрашивать сетевые станции не только в синоптические

периоды или ежечасно, но и на основе выборочного доступа, когда прогнозист или гидролог желает получить текущее обновление информации о метеорологических условиях в конкретном месте или местах. Удаленные станции будут инициировать данную процедуру для направления своих собственных тревожных сообщений в режиме реального времени. Наличие двусторонней связи также позволяет удаленной станции посылать командные сообщения для изменения своей методики работы и для получения нового оперативного программного обеспечения, загружаемого в свой процессор.

Создание сети АМС

Сеть могла бы использовать наземную линию связи или радиосвязь (особенно для весьма удаленных мест) или сочетание того или другого. Преимущество использования поставщика телекоммуникационных услуг состоит в том, что вся ответственность за техническую эксплуатацию сети и, возможно, коммуникационных интерфейсов лежит на данном поставщике, который должен оперативно реагировать на сообщения о неисправностях, направленных управляющим системой АМС. Следует отметить необходимость умения определять то, с какой стороны коммуникационного интерфейса АМС (или телекоммуникационной линии) имеется неисправность, что может оказаться проблематичным. Сети АМС часто использовали цепи наборного доступа в коммутируемой телефонной сети общего пользования (КТСОП), при этом стоимость определялась расстоянием и временем соединения в соответствии с тарифами местного поставщика коммуникационного обслуживания. Другим вариантом является наличие локальной сети», работающей на основе выделенных арендуемых линий заданного качества. В таком случае нет никакой задержки коммутации при создании каналов связи, обеспечиваются более высокие скорости передачи, существует высокая вероятность того, что данный канал связи будет обслуживаться. Арендные расходы зависят от длины линии, а не от объема данных. Стоимость выше по сравнению с соединениями по телефонной линии в тех случаях, когда объем данных является весьма малым.

Цифровая сеть интегрального обслуживания

Многие телекоммуникационные организации предлагают цифровую сеть интегрального обслуживания, которая обеспечивает передачу речи, данных и видеоинформации посредством кодово-импульсной модуляции по усовершенствованным кабелям и коммутаторам КТСОП. Базовый канал обеспечивает передачу данных со скоростью 64 кбит/сек на основе протокола пакетной коммутации X.25 или протокола ретрансляции кадров. Цифровые каналы обеспечивают очень высокий уровень защиты данных.

Связь по глобальной компьютерной сети

В результате всемирного увеличения трафика данных и использования современных коммуникационных протоколов наряду с повышением возможностей для проведения вычислений и хранения данных на удаленных терминалах обычным явлением сейчас является отношение к АМС и центральному компьютеру, предназначенному для управления и сбора данных, как к узлам глобальной компьютерной сети (ГКС). Информационные или управляющее сообщение делится на «пакеты» согласно правилам (протоколам), таким как X.25 или более скоростной протокол ретрансляции кадров. Каждый пакет данных направляется через коммутируемую сеть передачи данных поставщика телекоммуникационного обслуживания и может достичь пункта назначения разными маршрутами (эффективно используя сеть с другими независимыми пакетами). В пункте назначения эти пакеты собираются вместе согласно протоколу после различных задержек, с тем чтобы реконфигурировать сообщение. Надежная передача информации обеспечивается благодаря обнаружению ошибок с автоматической повторной отправкой поврежденных или потерянных пакетов. Следует отметить отличие от обычной КТСОП, основанной на технологии коммутации каналов, когда для передачи информации между двумя сторонами предоставляется выделенная линия. Коммутация каналов является идеальным вариантом, когда данные в реальном масштабе времени (такие, как прямая аудио- и видеотрансляция) должны быстро передаваться и прибывать в том же порядка, в котором они были посланы. Пакетная коммутация является более эффективной и надежной применительно к данным, которые могут выдержать некоторую краткосрочную задержку при их передаче. Стоимость передачи сообщений связана со временем соединения и объемом данных. Должен существовать способ для прекращения соединения надежным образом, когда сбор данных закончен, поскольку аварийная АМС может держать линию открытой и быть причиной нежелательных расходов.

Режим ретрансляции кадров и асинхронной передачи данных

Ретрансляция кадров – это пакетная коммутация, сетевой протокол для соединяющих устройств на ГСК, со скоростями передачи данных от 64 кбит/сек

до 2 Мбит/сек или выше в зависимости от качества линии. В отличие от двусторонней выделенной линии сетевая коммутация происходит между АМС и центральной станцией. Фактически действует выделенная линия к узлу на сети ретрансляции кадров, а отдаленное место имеет выделенную линию к ближайшему узлу ретрансляции кадров. Пользователь получает «виртуальную локальную сеть». Расходы снижаются и не зависят от объема данных или потраченного на соединение времени. В то же время в некоторых районах происходит замена ретрансляции кадров более новыми и быстрыми технологиями, такими как асинхронный режим передачи (АТМ). В протоколе АТМ предпринята попытка сочетания того и другого, а именно гарантированного обеспечения сетей с коммутацией каналов с надежностью и эффективностью сетей с коммутацией пакетов.

Протокол передачи

Фактическим стандартом для передачи данных между компьютерами через сети является протокол управления передачей/протокол Интернет (TCP/IP). Протокол Интернет (IP) определяет формат пакетов, именуемых «датаграммами», и схему адресации. Протокол более высокого уровня TCP устанавливает виртуальную связь между источником и пунктом назначения, с тем чтобы одновременно могли проходить двусторонние потоки данных и чтобы датаграммы доставлялись в правильной последовательности с исправлением ошибок путем повторной передачи. TCP также управляет движением данных между применениями программного обеспечения. Функционирование Интернет основано на протоколе TCP/IP, а IP также используется в ГКС, которые не обладают возможностями для обработки данных и в сети идет обмен большими объемами данных. IP обеспечивает совместное использование национальными и региональными дорожными ведомствами через частный интранет данных АМС и анализов дорожных условий, осуществленных компьютером центральной станции.

Коммутируемые или выделенные каналы связи

Необходимо решить вопрос о том, следует ли использовать более дешевые коммутированные каналы передачи данных в тех случаях, когда требуется общий с другими пользователями доступ к телекоммуникационной сети, или же арендовать гораздо более дорогие выделенные линии связи, которые обеспечивают надежную, высокоскоростную связь в масштабе реального времени. Коммутированная сеть будет иметь определенную временную задержку в тех случаях, когда будет происходить задержка в установлении канала связи продолжительностью в несколько секунд, однако протоколы пакетного коммутирования легко решат эту проблему. Принятию выбора будут способствовать такие факторы, как соображения надежности, объем данных, которыми будут обмениваться с каждым сообщением, или специальные «загрузки» для отдаленных станций, а также оперативная необходимость в фактической связи в масштабе реального времени. Сезонный фактор также будет оказывать влияние на выбор вида связи. Если жизненно важное использование дорожных метеорологических данных имеет значение только в течение нескольких месяцев в году, то круглогодичная эксплуатация выделенной коммуникационной сети вызовет высокие накладные расходы в расчете на одно сообщение. Фактическая стоимость сообщения будет зависеть от формулы расчета цены телекоммуникационной компании и будет учитывать такие факторы, как скорость передачи данных, длина линии связи, продолжительность соединения и предоставление данной компанией терминальных модемов. Местные телекоммуникационные компании будут готовы предоставить руководящие указания, касающиеся выбора их услуг.

1.3.2.11 Техническое обслуживание и калибровка

Особые процедуры программного обеспечения введены в программу прикладного программного обеспечения, позволяющую производить ремонт и калибровку на месте эксплуатации. Такие виды деятельности обычно связаны с прогонкой интерактивных программ для испытания конкретного датчика, изменения структуры АМС в случае замены датчиков или модулей, перенастройки системы параметров, испытания телесвязи, введения новых коэффициентов калибровок и т. п. Ремонт и калибровка производятся в неоперативном режиме работы станции при временном прекращении ее нормальной работы.

1.3.2.12 Представление данных

Кроме обычных способов представления данных для выполнения различных функций, упомянутых в вышеуказанных разделах, в оперативной работе часто требуется, чтобы отдельные данные отражались на местном уровне с периодическим обновлением в масштабе реального времени или на жидкокристаллических дисплеях, существующих терминалах или на специальных экранах. Примерами служат АМС, установленные в аэропортах и в местах контроля окружающей среды. В некоторых странах требуются местные распечатки данных или графическое представление с помощью перьевых регистраторов.

1.4 СООБРАЖЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО МЕСТА РАСПОЛОЖЕНИЯ АВТОМАТИЧЕСКИХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

Вопрос о месте расположения АМС является довольно трудным, и в этой области предстоит провести большую исследовательскую работу. Общий принцип состоит в том, что станция должна обеспечивать репрезентативность измерений в окружающем районе, размер которого зависит от метеорологического применения. Существующие на этот счет указания для обычных станций действительны также и для АМС, и поэтому можно обратиться к части I, а также к другим публикациям ВМО (1989*a*; 1990b; 2003*a*).

Некоторые АМС, установленные в труднодоступных местах, как на суше, так и на море, вынуждены работать без обслуживания в течение длительных периодов времени. Расходы на установку могут быть высокими, и могут потребоваться дополнительные расходы на обслуживание. Они вынуждены работать от очень ненадежных источников энергоснабжения или же в местах, где вообще нет постоянных источников энергоснабжения. Следует также учитывать вопрос наличия средств телесвязи. Необходимо обеспечивать меры безопасности (от ударов молний, наводнений, воровства, вандализма и т. п.), и, безусловно, станции должны противостоять суровым метеорологическим условиям. Расходы по обеспечению систем, способных работать при всех условиях, которые можно предусмотреть для автоматической станции, являются высокими, и поэтому важно до получения техзадания или до проектирования АМС иметь полное представление о предполагаемой среде функционирования АМС. На ранней стадии планирования должен быть проведен подробный анализ относительной важности метеорологических и технических потребностей, с тем чтобы можно было выбрать и утвердить место для расположения станции до осуществления значительных инвестиций по установке.

1.5 ОБРАБОТКА ДАННЫХ ЦЕНТРАЛЬНОЙ СЕТИ

Обычно АМС является частью сети метеорологических станций и передает свои обработанные данные или сообщения на центральную систему обработки данных сети с помощью различных средств передачи данных. Формулирование требований к функциональным и соответственно техническим характеристикам центральной системы представляется сложной задачей и часто недооценивается. Здесь требуется тесное сотрудничество между проектировщиками АМС, специалистами в области телесвязи, специалистами по программному обеспечению и пользователями данных. Необходимо принимать решения, касающиеся задач, которые должны выполнять центральная система и АМС. Действительно, в зависимости от применений определенные функции АМС можно передать центральной системе, где имеется больше компьютерных мощностей и большая память. Примерами являются математические вычисления большого объема, такие, как приведение атмосферного давления и кодирование метеорологических сообщений. Буферы данных АМС можно уменьшить до оперативного минимума в тех случаях, когда данные регулярно передаются на центральную систему. Хорошая практика состоит в том, чтобы вначале договориться о функциональных параметрах, как центральной системы, так и АМС, а затем формулировать технические требования к ним.

1.5.1 Состав

Состав центральной системы обработки данных сети в значительной мере зависит не только от функций, которые она должна выполнять, но также от местных технических средств. Можно использовать мощные персональные компьютеры или рабочие станции, работающие в среде реального времени с множеством задач и множеством пользователей. Однако используются существующие средства телесвязи и системы обработки. Центральные системы обработки данных сети все больше интегрируются в местную зональную сеть, что позволяет им распределять и решать задачи в наиболее подходящем месте наиболее подготовленными людьми.

К числу основных функций центральной системы сети относятся: сбор данных, включая расшифровку сообщений от сети АМС, дистанционный контроль и поддержание в рабочем состоянии АМС, мониторинг сети и контроль качества данных, дальнейшая обработка данных для удовлетворения потребностей пользователей, доступ к базе данных сети, отображение данных и передача данных внутренним или внешним пользователям. К числу последних может относиться Глобальная система телесвязи, если производится международный обмен данными.

1.5.2 Контроль качества данных сети

Эта тема рассматривается далее, в главе 1 части III. Рекомендуется, чтобы операторы сетей:[18]

[18] Рекомендовано Комиссией по приборам и методам наблюдений на ее девятой сессии, 1985 г., рекомендация 5 (КПМН-IX).

(a) организовывали и проводили проверку систем квазиоперативного мониторинга измерений, где сообщаемые значения регулярно сверяются с проанализированными полями, соответствующими тому же месту измерения;
(b) устанавливали процедуры осуществления эффективной связи между службой мониторинга и соответствующими службами эксплуатации и калибровки для скорейшего получения информации о погрешностях или ошибках сообщений от системы мониторинга.

Процедуры автоматизированного контроля качества на АМС имеют свои ограничения и некоторые ошибки, такие, как длительные дрейфы в датчиках и модулях, могут не обнаруживаться даже при наиболее сложном контроле. Другим источником ошибок является передача данных от АМС. Поэтому рекомендуется, чтобы система мониторинга сети, являющаяся частью центральной системы сети, осуществляла дополнительные процедуры контроля качества. Важнейшие процедуры контроля качества в такой системе мониторинга включают:
(a) обнаружение ошибок в передаче данных; необходимые процедуры зависят от протокола передачи и используемых цикличных кодов с избыточностью;
(b) проверка формата и содержания сообщений в кодах ВМО (ВМО, 1993);
(c) дальнейшая обработка данных на предмет исключения или иного решения вопроса об ошибочных данных в служебных файлах АМС.

Системы интерактивного отображения также позволяют проводить дополнительный контроль качества входящих данных. Можно отображать на цветных экранах временные ряды для одной или нескольких переменных и для одной или нескольких станций; подготовленный и опытный персонал может использовать статистический анализ для обнаружения кратко- и долгосрочных аномалий, которые не всегда обнаруживаются алгоритмами полностью автоматизированного контроля качества.

Алгоритмы мониторинга, в которых сообщаемые величины регулярно проверяются по времени и пространству при сравнении с проанализированными численными полями, являются весьма эффективными способами обнаружения ошибок и принятия мер по исследованию или устранению недостатков. Малая амплитуда турбулентных колебаний атмосферного давления и степень достоверности, с которой местные географические воздействия можно устранять посредством приведения данных всех наблюдений к общему справочному уровню, дают основание рассматривать атмосферное давление как основную величину при таком контроле качества. При осреднении по времени или пространству данные наблюдений других перемещенных также должны проходить подобный анализ. Однако необходимо принимать во внимание и тщательно учитывать местные орографические воздействия.

1.6 ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ И РЕМОНТ

Стоимость обслуживания сети автоматических станций на суше и особенно в море может в значительной мере увеличить общие затраты на них. Поэтому важнейшими факторами при конструировании автоматических метеорологических станций являются их надежность и простота обслуживания. Специальная защита от воздействий окружающей среды зачастую оправдывается даже при высоких первичных затратах.

Очевидно, что любая комплексная система требует поддержки по техническому обслуживанию. При выходе из строя отдельных компонентов необходимо проводить их соответствующую замену. Компоненты аппаратного обеспечения могут выходить из строя по многим причинам; компьютерные программы также могут выходить из строя из-за ошибок при их разработке, которые могут оставаться незамеченными в течение длительного периода времени. Для минимизации корректирующего ремонта и улучшения работы АМС рекомендуется хорошо организованное профилактическое техобслуживание. Все компоненты системы нуждаются в профилактическом обслуживании, а не только в чистке и смазке механических частей. Благодаря все большей надежности электронных компонентов АМС профилактическое техобслуживание, включая обслуживание и калибровку датчиков, станет главным фактором техобслуживания.

Техническое обслуживание в целях адаптации вызывается необходимостью учета быстрых изменений в технологии и наличии запасных частей после нескольких лет работы. Действительно, расходы на ремонт и компоненты часто возрастают очень быстро после того, как система уже не пользуются активным спросом, что вызывает необходимость замены модулей новыми, но с другой технологией, поскольку очень редко можно обеспечить точную замену. Примерами являются перенос данных с одного средства регистрации на другое, программ и оперативных систем из одного процессора в другой, что приводит к модульным изменениям в обеспечении надежности системы, соединению с новыми системами телесвязи и т. п. Для снижения расходов на

такого рода обслуживание и ремонт желательно, чтобы были установлены общепринятые стандарты на оборудование и интерфейсы, а также на программное обеспечение, и чтобы они были включены в технические спецификации АМС.

Поскольку техническое обслуживание и ремонт сети автоматических станций представляют собой зачастую весьма недооцениваемую задачу, важно организовать их согласно рациональному плану, в котором будут подробно предусмотрены все функции, и организовать техническое обслуживание и ремонт таким образом, чтобы свести к минимуму расходы, избегая при этом неблагоприятных воздействий на показатели работы. Модульная структура многих современных автоматических станций позволяет организовать техническое обслуживание и ремонт на месте эксплуатации, а также в региональных и национальных центрах.

Техническое обслуживание и ремонт на месте эксплуатации. В целом нежелательно производить ремонт датчиков АМС или других модулей в полевых условиях, поскольку условия не благоприятны для эффективной работы. Кроме того, в связи с высокими расходами на персонал и относительно низкими расходами на оборудование более эффективным является списание неисправных модулей, чем их ремонт. Рекомендуется, чтобы техническое обслуживание с устранением неисправностей на месте эксплуатации производилось специальным техническим персоналом из регионального или национального центра в зависимости от размера страны, а простой профилактический ремонт проводился бы местным наблюдателем (при наличии такового). Для обеспечения быстрого реагирования на неисправности весьма желательная практика заключается в том, чтобы АМС периодически передавали диагностическую информацию самопроверки.

Региональный центр. В региональном центре должен быть технический персонал для замены или ремонта модулей и датчиков, небольшие неисправности которых можно обнаружить и устранить. Этот персонал должен хорошо знать работу аппаратного обеспечения станции и быть подготовлен к проведению обычного обслуживания программного обеспечения. Такие региональные центры должны быть оснащены соответствующим контрольно-измерительным оборудованием и иметь достаточное количество модулей и датчиков для выполнения технического обслуживания и ремонта станций в своей зоне. Этим центрам необходимы соответствующие средства транспортировки для выполнения работы в полевых условиях. Следует также уделять внимание планированию и периодическому посещению удаленных станций для проверки их работы, выявления случаев вандализма, местных условий, изменений и т. п. Необходимо также установить процедуры для срочных посещений различных станций, основываясь на приоритетах, определяемых для данной станции.

Национальный центр. Для национального центра требуется более подготовленный технический персонал, который способен обнаруживать и устранять сложные неисправности в датчиках, модулях и средствах передачи данных. В центре должно быть необходимое оборудование для проверки и ремонта всех частей АМС и работа должна проводиться в самом центре. При обнаружении неоднократных неисправностей такие части следует передавать конструкторам или поставщикам для исправления конструктивных дефектов.

В связи с тем что программное обеспечение играет очень важную роль в каждой АМС и в центральной системе обработки данных сети, требуется персонал с глубокими знаниями АМС и программного обеспечения центральной сетевой системы. Должны иметься необходимые средства для разработки программного обеспечения, а также средства для тестирования. Кроме того, национальный центр должен быть способен выполнять все задачи, связанные с адаптивным техническим обслуживанием и ремонтом.

Что касается контроля качества данных сети, то желательно установить процедуры эффективной связи между службой мониторинга и соответствующей службой технического обслуживания и ремонта, а также калибровки, с тем чтобы способствовать быстрому реагированию на неисправности или передаче сообщения о неисправности от системы мониторинга.

Изложенная выше схема пригодна для больших стран. В малых странах задачи региональных центров может выполнять национальный центр. Развивающиеся страны могут рассмотреть вопрос об организации общей с соседними странами службы технического обслуживания и ремонта. Для того чтобы поддерживать расходы на техническое обслуживание и ремонт на разумно низком уровне, можно предусмотреть общий международный центр технического обслуживания и ремонта. Однако для такого международного сотрудничества потребовалось бы использование одинакового оборудования. Если метеорологическая служба не может выделять свой персонал или средства для выполнения многих вспомогательных функций, то можно воспользоваться услугами подрядчика. Такая поддержка может, например, оговариваться как часть пакета в системе закупок. Однако необходимо очень хорошо подготовить контракт о техническом

обслуживании и ремонте, а выполнение контракта должно тщательно проверяться соответствующим персоналом.

Предложения по методам управления качеством изложены в главе 1 части III.

1.7 КАЛИБРОВКА

В датчиках, особенно в датчиках АМС с электрическими выходами, со временем возникают изменения в точности, и в связи с этим необходимо регулярно проводить поверку и калибровку. В принципе, период между калибровками определяется техническими характеристиками дрейфа, сообщенными изготовителем, а также требуемой точностью. При международных взаимных сравнениях приборов ВМО также даются некоторые объективные показатели изменений в точности датчиков, а также желательные интервалы между калибровками. Поскольку модули формирования сигнала и оборудование для получения и передачи данных также составляют часть цепи измерений, то их надежность и правильность работы также должны контролироваться или периодически проверяться. Ниже приводится краткое описание некоторых практических аспектов, касающихся АМС. За более подробной информацией, касающейся методов и техники калибровки, можно обратиться к различным главам части I и главе 4 части III.

Первичная калибровка: До закупки и установки АМС несложно проконтролировать выполнение требования о наличии средств для калибровки и приборного обеспечения, с тем чтобы иметь возможность проверить спецификации, сообщенные изготовителем, провести испытание работы станции в целом, а также удостовериться в том, что транспортировка не повлияла на измерительные характеристики оборудования.

Поверка на местах: Абсолютным требованием контроля работы датчиков является периодическое сравнение датчиков АМС с транспортируемыми эталонами на станции. Предпочтительно использовать транспортируемые эталоны, имеющие такие же характеристики фильтрации, что и цепь измерений АМС, а также выход для считывания в цифровой форме. Во избежание возможного изменения точности во время транспортировки во многих странах используют два транспортируемых эталона одинакового типа. В целях обнаружения небольших отклонений транспортируемые эталоны должны иметь точность намного лучше, чем соответствующий датчик станции, и в течение всего процесса сравнений должны находиться в таких же условиях среды, что и датчики, в течение достаточно длительного периода времени. Поскольку у модулей формирования сигнала и оборудования для сбора данных, таких, как аналого-цифровой преобразователь (АЦП), также могут быть отклонения в работе, следует использовать соответствующие эталонные источники напряжения и мультиметры для обнаружения мест аномалий.

До инспекций места эксплуатации и после них транспортируемые эталоны и опорные источники необходимо поверять по рабочим эталонам калибровочной лаборатории. При обнаружении отклонений в точности необходимо как можно скорее информировать об этом службу технического обслуживания и ремонта.

Лабораторная калибровка: Приборы, у которых заканчивается срок калибровки, приборы, имеющие отклонения в точности выше дозволенных пределов в течение полевой инспекции, а также приборы, отремонтированные службой технического обслуживания и ремонта, должны возвращаться в лабораторию калибровки для их повторного использования. Калибровка датчиков должна проводиться в кондиционируемой среде (в камере искусственного климата), с использованием соответствующих рабочих эталонов. Эти рабочие эталоны должны сравниваться и периодически калиброваться по вторичным эталонам, а также соответствовать международным стандартам. Необходимо также обращать внимание на поверкуов различных компонентов, составляющих измерительную и телеметрическую цепи, в частности модули формирования сигнала. Это связано с соответствующим напряжением, током, емкостными и резисторными эталонами, оборудованием проверки передачи и с цифровыми мультиметрами высокой точности. Для поверки требуются высокоточные приборы или системы получения данных. Для расчета калибровочных постоянных желательно иметь компьютер. Эти постоянные будут индивидуальными для датчика или модуля в течение периода их эксплуатации до следующей поверки, и их необходимо вводить в память АМС во всех случаях замены или установки в АМС датчика или модуля во время технического обслуживания и ремонта в условиях эксплуатации.

Необходимо составить график периодического сравнения вторичных эталонов лаборатории калибровки с национальными, международными или региональными первичными эталонами ВМО.

1.8 ОБУЧЕНИЕ ПЕРСОНАЛА

Поскольку АМС основана на применении технологии, которая значительно отличается от оборудования обычных станций и сетей, то очевидно

необходим глубокий пересмотр существующих программ обучения и квалификации требуемого технического персонала. Любая новая программа обучения должна организовываться в соответствии с планом, направленным на удовлетворение потребностей пользователей. Он должен в первую очередь предусматривать техническое обслуживание и ремонт и калибровку, упомянутые выше, а также должен соответствовать системе. Перевод существующего персонала на выполнение новых функций, если даже он имеет многолетний опыт работы с обычными станциями, не всегда возможен и может создать серьезные проблемы, если персонал не обладает основами знаний в области электрических датчиков, цифровых и микропроцессорных методов обработки или компьютеров. Может потребоваться наем нового персонала, обладающего такими знаниями. Необходимо иметь персонал, компетентный в различных областях работы автоматических станций, задолго до установки сети АМС (см. ВМО, 1997).

Важно, чтобы изготовители оборудования АМС обеспечивали подробную эксплуатационную и техническую документацию и организовывал курсы по эксплуатационно-технической подготовке кадров. Как правило, изготовитель должен предоставлять два комплекта документации: руководства пользователя для оперативного обучения основам работы системы и ее использованию и технические руководства с более сложной документацией, описывающей во всех технических подробностях оперативные характеристики системы, вплоть до уровня подблоков и даже электронных компонентов, в том числе с инструкциями по техническому обслуживанию и ремонту. Эти руководства можно рассматривать как основную документацию для программ обучения, осуществляемого изготовителем системы, и которой можно пользоваться в качестве справочного материала, когда уже не будет специалистов изготовителя для оказания помощи.

Для некоторых стран рекомендуется организовать общие учебные курсы в учебном центре, который обслуживает соседние страны. Такой учебный центр будет работать наиболее эффективно, если он связан с назначенным центром по приборам, а обслуживаемые страны согласились использовать одинаковое стандартизированное оборудование.

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

World Meteorological Organization, 1954: *Reduction of Atmospheric Pressure*. Technical Note No. 7, WMO-No. 36.TP. 12, Geneva.

World Meteorological Organization, 1964: *Note on the Standardization of Pressure Reduction Methods in the International Network of Synoptic Stations*. Technical Note No. 61, WMO-No. 154.TP.74, Geneva.

World Meteorological Organization, 1968: *Methods in Use for the Reduction of Atmospheric Pressure*. Technical Note No. 91, WMO-No. 226. TP.120, Geneva.

Всемирная Метеорологическая Организация, 1983: *Руководство по климатологическим практикам*. Второе издание, часть I, глава 2, ВМО-№ 100, Женева (обновленная информация имеется по адресу: http://www.wmo.ch/pages/prog/wcp/ccl/guide/guide_climat_practices.html).

World Meteorological Organization, 1987: *Some General Considerations and Specific Examples in the Design of Algorithms for Synoptic Automatic Weather Stations* (D.T. Acheson). Instruments and Observing Methods Report No. 19, WMO/TD-No. 230, Geneva.

Всемирная Метеорологическая Организация, 1988*a*: *Технический регламент*. ВМО-№ 49, Женева.

World Meteorological Organization, 1988*b*: *WMO International Ceilometer Intercomparison (United Kingdom, 1986)* (D.W. Jones, M. Ouldridge and D.J. Painting). Instruments and Observing Methods Report No. 32, WMO/TD-No. 217, Geneva.

Всемирная Метеорологическая Организация, 1989*a*: *Наставление по Глобальной системе наблюдений*. ВМО-№ 488, Женева.

World Meteorological Organization, 1989*b*: *WMO International Hygrometer Intercomparison* (J. Skaar, K. Hegg, T. Moe and K. Smedstud). Instruments and Observing Methods Report No. 38, WMO/TD-No. 316, Geneva.

World Meteorological Organization, 1989*c*: Preliminary results of the WMO automatic sunshine duration measurement comparison 1988/89 in Hamburg (K. Dehne). *Fourth WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-IV)*. Instruments and Observing Methods Report No. 35, WMO/TD-No. 303, Geneva.

World Meteorological Organization, 1990*a*: *The First WMO Intercomparison of Visibility Measurements (United Kingdom 1988/1989)* (D.J. Griggs, D.W. Jones, M. Ouldringe and W.R. Sparks). Instruments and Observing Methods Report No. 41, WMO/TD-No. 401, Geneva.

Всемирная Метеорологическая Организация, 1993*a*: *Руководство по системам метеорологических наблюдений и распространения информации на аэродромах*. ВМО-№ 731, Женева.

World Meteorological Organization, 1991: *Guidance on the Establishment of Algorithms for Use in Synoptic Automatic Weather Stations: Processing of Surface Wind Data* (D.J. Painting). Instruments and Observing Methods Report No. 47, WMO/TD-No. 452, Geneva.

Всемирная Метеорологическая Организация, 1992*a*: *Международный метеорологический словарь*. Второе издание, ВМО-№ 182, Женева.

World Meteorological Organization, 1992*b*: *The WMO Automatic Digital Barometer Intercomparison: Final Report* (J.P. van der Meulen). Instruments and Observing Methods Report No. 46, WMO/TD-No. 474, Geneva.

Всемирная Метеорологическая Организация, 1993: *Руководство по Глобальной системе обработки данных*. ВМО- № 305, Женева.

World Meteorological Organization, 1994: WMO solid precipitation measurement intercomparison: Preliminary results (B.E. Goodison, E. Elomaa, V. Golubev. T. Gunther and B. Sevruk). *Papers Presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation (TECO-94)*, Instruments and Observing Methods Report, No. 57, WMO/TD-No. 588, Geneva.

Всемирная Метеорологическая Организация, 1995: *Наставление по кодам*. Том I.1 и I.2, ВМО-No. 306, Женева.

World Meteorological Organization, 1997: *Guidance on Automatic Weather Systems and their Implementation*. Instruments and Observing Methods Report No. 65, WMO/TD-No. 862, Geneva.

World Meteorological Organization, 2000: Operation of automated surface observing systems in harsh climatological environments (M.D. Gifford, G.M. Pearson and K. Hegg). *Papers Presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2000)*. Instruments and Observing Methods Report No. 74, WMO/TD-No. 1028, Geneva.

Всемирная Метеорологическая Организация, 2003a: *Наставление по Глобальной системе наблюдений*. ВМО-№ 544, Женева.

World Meteorological Organization, 2003b: *Algorithms Used in Automatic Weather Stations: Evaluation of Questionnaire* (M.D. Gifford). Instruments and Observing Methods Report No. 78, WMO/TD-No. 1160, Geneva..

ГЛАВА 2

ИЗМЕРЕНИЯ И НАБЛЮДЕНИЯ НА АВИАЦИОННЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ СТАНЦИЯХ

2.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

2.1.1 Определения

В настоящей главе рассматриваются требования к наблюдениям на авиационных метеорологических станциях, а также используемые для этого приборы и методы. В то время как целью синоптических наблюдений является получение по измерениям в одном месте репрезентативного значения величины для довольно большого района, метеорологические наблюдения для авиационных целей обычно выполняются в нескольких точках аэродрома и прилегающей к нему территории и с большей частотой, чтобы получить репрезентативную картину для таких достаточно ограниченных районов, как зона захода на посадку, зона приземления и зона взлета.

Большая часть необходимых метеорологических измерений – это по существу те же, что производятся для других применений, и они описываются в других главах настоящего Руководства. Исключениями являются дальность видимости на взлетно-посадочной полосе (ДВВПП), наклонная дальность видимости и сдвиг ветра в приземном слое атмосферы, которые используются только для рассматриваемой области.

2.1.2 Единицы измерения

Для измерения и передачи значений метеорологических величин в авиационных целях используются те же единицы, что и для других применений; исключение составляют:

(a) приземный ветер может измеряться и передаваться в метрах в секунду, километрах в час или в узлах;[1] а направление ветра[2] – передаваться в градусах и измеряться по часовой стрелке от географического севера[3] (см. раздел 2.2.1);

(b) высота нижней границы облаков может измеряться в метрах или футах.

Выбор единиц измерений является вопросом национальной практики и зависит от требований авиационных органов, определяющих эту практику.

2.1.3 Требования

Требования к авиационным наблюдениям приводятся в Техническом регламенте ВМО (ВМО, 2004). Подробные инструкции по процедурам и практикам приводятся в публикации ВМО (1990*a*). Полезные инструкции по проведению наблюдений и мониторингу метеорологических условий приводятся в публикации ВМО (2003 г.). Особое внимание следует уделить авиационным метеорологическим станциям, установленным на сооружениях в открытом море в поддержку полетов вертолетов (ICAO, 1996).

Требования к точности, дискретности и диапазону наблюдений, а также к достигаемому в настоящее время качеству метеорологических измерений приводятся в главе 1 части I и частично в Техническом регламенте [C.3.1], добавление A.

Несмотря на отличные конструктивные характеристики современных воздушных судов, факторы, связанные с погодой, все еще оказывают заметное влияние на безопасность их эксплуатации. Надежность и репрезентативность наблюдений на аэродромах очень важны для обеспечения безопасных посадок и взлетов. Параметры ветра определяют выбор той или иной взлетно-посадочной полосы, а также максимальный взлетный и посадочный вес. Температура также является важной характеристикой, особенно в аэропортах, находящихся в жарких странах; она влияет на силу тяги двигателей, в связи с чем целесообразно уменьшение полезной нагрузки либо использование для взлета более длинной взлетно-посадочной полосы.

Регулярные наблюдения должны проводиться на авиационных метеорологических станциях в сроки и с частотой, которые устанавливаются страной-членом в целях удовлетворения потребностей национальной и международной аэронавигации

---

[1] Используемая единица скорости ветра определяется решением на национальном уровне. Однако основная единица скорости ветра, предписанная в Техническом регламенте, том II (ВМО, 2004 г.), – «километр в час», а «узел» разрешается использовать в качестве альтернативной единицы измерения, не входящей в систему СИ, вплоть до установления срока его действия, решение о котором в настоящее время рассматривается ИКАО.

[2] Направление, откуда дует приземный ветер.

[3] Поскольку направление ветра, передаваемое на борт воздушного судна для целей посадки или взлета, может быть преобразовано в магнитные градусы, устройство отображения в органе управления воздушным движением обычно показывает направление относительно северного магнитного полюса.

при должном учете региональных аэронавигационных мероприятий. Специальные и другие нерегулярные наблюдения должны проводиться на той же основе. Регулярные наблюдения на аэродромах следует проводить через час или полчаса круглосуточно, в течение суток или части суток или в то время, когда выполняются полеты. Специальные наблюдения следует выполнять, когда между регулярными наблюдениями происходят определенные изменения приземного ветра, видимости, ДВВПП, текущей погоды и/или облачности. Эти изменения перечислены в Техническом регламенте ВМО [C.3.1], приложение 3, 2.3.2. Такие наблюдения в форме закодированных сводок типа METAR или SPECI включаются в международный обмен данными между авиационными метеорологическими станциями. Сводки других типов предназначены только для обеспечения работы авиации и должны подготавливаться в форме, которая определяется совместно метеорологическими службами и руководством аэропорта.

Ввиду важности метеорологических наблюдений для безопасности полетов воздушных судов необходимо, чтобы наблюдатели прошли правильную подготовку и обладали хорошим зрением. Подготовка наблюдателей должна осуществляться на базовых курсах и регулярных курсах усовершенствования. В публикации ВМО (2002) содержатся руководящие указания, касающиеся программ этих курсов.

Размещение, состав и выполняемые функции метеорологических систем определяются правилом 4 Технического регламента [C.3.1], а технические спецификации и подробные критерии – в Техническом регламенте [C.3.1], приложение 3. Эти спецификации кратко описываются ниже.

Особое внимание на авиационных метеорологических станциях необходимо уделить правильному выбору места для выполнения наблюдений или размещения приборов, чтобы гарантировать репрезентативность наблюдаемых величин на территории аэродрома или вблизи него. В некоторых случаях, когда необходима информация с большой территории, может потребоваться установка нескольких приборов, с тем чтобы обеспечить репрезентативность измеряемых с их помощью метеовеличин для всей территории. Например, на длинных взлетно-посадочных полосах или на больших аэродромах с несколькими взлетно-посадочными полосами, где зона захода на посадку, зона приземления и зона взлета могут отстоять друг от друга на 2 – 5 км, значения различных параметров, влияющих на эксплуатацию воздушных судов, таких, как ветер, высота нижней границы облаков, ДВВПП и т.п., измеренные на одном конце полосы, могут отличаться от значений в другом месте той же взлетно-посадочной полосы или на других участках взлетно-посадочного комплекса, представляющих интерес для аэронавигации.

На всех аэродромах места для проведения наблюдений следует выбирать так, чтобы измеряемые значения различных метеорологических величин были репрезентативными для самого аэродрома и/или для соответствующего участка конкретной взлетно-посадочной полосы или взлетно-посадочного комплекса. На аэродромах, где отсутствует практика точного захода на посадку и точной посадки (взлетно-посадочные полосы визуального или неточного захода на посадку), данный критерий репрезентативности носит менее ограничительный характер, чем на аэродромах с взлетно-посадочными полосами точного захода на посадку (т.е. взлетно-посадочные полосы категории I, II или III (см. ВМО, 1990*a*, и ICAO, 2004*a*)).

При выборе мест размещения приборов на аэродромах особенно важно, чтобы приборы и работа с ними не представляли опасности для аэронавигации, и чтобы присутствие или движение воздушных судов на аэродроме (руление, разбег при взлете, приземление, размещение на стоянке и т.п.) и различное аэродромное оборудование чрезмерно не влияли на измеряемые величины, но при этом удовлетворялись оперативные требования к месту проведения наблюдений и установке приборов.

Типы используемых приборов, их характеристики и методы представления и передачи измеренных значений метеовеличин также важны. Метеорологические приборы следует устанавливать, эксплуатировать и обслуживать в соответствии с практикой, процедурами и спецификациями, изложенными в настоящем Руководстве. Авиационные метеорологические станции следует инспектировать достаточно часто, с тем чтобы обеспечить высокое качество наблюдений, правильную работу всех приборов и их индикаторов, а также контроль за существенными изменениями в размещении приборов (Технический регламент [C.3.1] 4.1.4).

Конструкция приборов должна предусматривать дистанционное считывание, одновременно в органах управления воздушным движением (УВД) и на метеорологических станциях и в бюро, соответствующих значений следующих метеорологических элементов: приземный ветер, температура, точка росы, атмосферное давление, текущая погода, видимость, ДВВПП (если взлетно-посадочные полосы оборудованы для взлета и посадки в тумане) и высота нижней границы облаков, которые должны быть репрезентативными для соответствующих

зон посадки и взлета. Особенно полезны на авиационных метеорологических станциях системы автоматических приборов для измерения высоты нижней границы облаков и ДВВПП.

На аэродромах, где осуществляется точный заход на посадку, и особенно эксплуатируемых по категориям II, III A и III B, и/или на аэродромах с высокой интенсивностью воздушного движения предпочтительнее использовать комплексные автоматические системы получения, обработки и распространения/отображения в реальном масштабе времени значений метеорологических элементов, влияющих на выполнение посадок и взлетов. Эти автоматические системы должны предусматривать возможность ручного ввода метеорологических данных, которые нельзя измерить автоматическими средствами (Технический регламент [C.3.1] 4.1.7 и 4.6.8.2). Требования к автоматическим метеорологическим системам наблюдений определены в Техническом регламенте [C.3.1], приложение 3.

2.1.4 Методы

При выполнении метеорологических измерений на аэродромах используются по существу те же методы, что и для других метеорологических применений; они описываются в других главах настоящего Руководства. В данной главе приводятся некоторые требования к размещению приборов и выполнению измерений, а также некоторые алгоритмы, специфичные для авиационного применения.

2.2 ПРИЗЕМНЫЙ ВЕТЕР

2.2.1 Общие сведения

Для авиации первостепенное значение имеют измерения параметров воздушного потока, а также сдвига ветра в приземном слое атмосферы вблизи зон взлета и посадки. Соответствующие правила изложены в Техническом регламенте [C.3.1] 4.1, а подробное описание содержится в Техническом регламенте [C.3.1], приложение 3. На международных аэродромах органы УВД, командно-диспетчерские пункты и диспетчерские пункты управления заходом на посадку обычно оборудованы индикаторами скорости ветра и направления ветра, и операторы, обслуживающие воздушное движение, передают показания этих приборов на борт прибывающих и вылетающих воздушных судов. Чтобы обеспечить согласованность данных, индикаторы органов УВД и метеорологической станции следует подключать к одним и тем же датчикам.

Измеряются: средние направление и скорость ветра, а также его порывы и определенные значительные изменения направления и скорости. Содержание сводок с данными о ветре, распространяемых за пределы аэродрома (Технический регламент [C.3.1], приложение 3, 4.1.4), то же, что и содержание сводок синоптических наблюдений (10-минутные средние значения, а также направление, сообщаемое по отношению к географическому северу)[4] , а передаваемые значения должны быть репрезентативными для всех взлетно-посадочных полос. Для местных регулярных и специальных сводок и для дисплеев индикатора ветра, используемых в местах расположения органов УВД (Технический регламент [C.3.1], приложение 3, 4.1.3.1), период осреднения и для скорости, и для направления ветра составляет 2 минуты, а значения должны быть репрезентативными для используемой взлетно-посадочной полосы. Несмотря на то, что направление ветра сообщается по отношению к географическому северу и выражается в «истинных градусах» (Технический регламент [C.3.1] 4.6.1 и приложение 3, 4.1.4.1), все еще существует распространенная практика сообщения персоналом органов УВД на борт воздушного судна относительно северного магнитного полюса («магнитные градусы»). Порывы ветра следует определять по трехсекундным скользящим средним значениям. Следует ознакомиться с главой 5 части I и главой 2 части III настоящего Руководства, где рассматриваются меры, которые должны быть предусмотрены в отношении анемометра, предназначаемого для измерения средних значений, порывов, а также изменчивости скорости и направления ветра. Предпочтение должно отдаваться векторному осреднению, а не скалярному.

Результаты измерения параметров ветра на аэродромах, таких как средние и экстремальные значения и т.д., должны рассчитываться и отображаться предпочтительно автоматически, особенно если на различных взлетно-посадочных полосах используется несколько датчиков. Когда требуется несколько датчиков, индикаторы должны быть четко помечены в целях определения взлетно-посадочных полос и их участков, мониторинг которых осуществляется каждым датчиком.

---

[4] Обычно именуется как «истинный» север с единицей измерения «истинный градус». Слово «истинный» в словосочетаниях «истинный север» или «истинный градус» не следует путать с «истинным ветром» (определено ВМО, 1992*a*). «Истинный ветер» представляет собой вектор ветра относительно поверхности Земли. Для движущегося объекта, такого как воздушное судно - это векторная сумма кажущегося ветра (т.е. вектор ветра относительно движущегося объекта) и скорости объекта.

2.2.2 Приборы и их установка

На авиационных метеорологических станциях для наблюдений за ветром обычно используются приборы того же типа, что описаны в главе 5 части I. Динамические характеристики датчиков направления и скорости должны соответствовать требованиям, изложенным в данной главе.

Датчики направления и скорости следует устанавливать на высоте примерно 10 м над взлетно-посадочной полосой, и они должны обеспечивать измерения, репрезентативные для средних зон отрыва и приземления взлетно-посадочной полосы. Однако для совместимости с синоптическими наблюдениями отклонения от высоты 10 м нежелательны.

Поскольку показания датчиков ветра, устанавливаемых на аэродромах, должны быть репрезентативными для зон взлета или посадки, необходимо избегать любых возмущений или турбулентности, создаваемых воздушными судами (ложная информация о порывах ветра из-за взлетов и посадок). По аналогичным причинам их не следует размещать слишком близко к зданиям или холмам или размещать в зонах с особыми микроклиматическими условиями (морской бриз, частые штормы и т.п.). Предпочтительным вариантом размещения ветроизмерительных приборов является размещение на открытой местности, которая определяется как район, где расстояние между анемометром и любым препятствием, по крайней мере, в 10 раз больше высоты препятствия.

Во избежание перерывов передачи данных в органы УВД рекомендуется обеспечить установку дополнительного оборудования, находящегося в холодном или горячем резерве на случай выхода из строя основного прибора. Там, где того требуют местные условия, следует устанавливать один и более комплектов датчиков на каждой взлетно-посадочной полосе. В таких случаях рекомендуется использовать цифровую технику, поскольку она позволяет передавать по одному или двум телефонным проводам данные с большого числа датчиков, а также использовать цифровые индикаторы со светоизлучающими диодами различных цветов для отображения параметров ветра. Устройства отображения должны показывать «мгновенные» скорость и направление ветра (с длиной пути синхронизации от 2 до 5 м), средние скорость и направление ветра за 2 или 10 мин., а также минимальную и максимальную скорости ветра. Иногда с помощью одного и того же индикатора возможно отобразить и выбрать показания для различных точек измерений ветра (таким образом уменьшается количество необходимых индикаторов).

Устанавливая датчики ветра на аэродроме, необходимо уделить особое внимание их защите от атмосферных грозовых разрядов (используя громоотводы, заземление мачты, а также экранированные или оптиковолоконные кабели); электронное оборудование для обработки данных также должно быть защищено.

С целью поддержания требуемой точности показаний приборов для измерения параметров ветра их следует содержать в хорошем состоянии и регулярно проверять и калибровать. Качество работы датчика, особенно для аналоговых систем, необходимо периодически проверять в аэродинамической трубе. Цифровая техника со встроенным контролем определенных функций требует меньше проверок, но при этом не исключаются ошибки, связанные с трением. Для определения дефектных компонентов и ухудшения работы отдельных частей датчиков должны проводиться регулярные проверки.

Из источников ошибок можно назвать трение, плохой выбор места установки, а также проблемы со средствами передачи или отображения данных. Ошибки также могут быть вызваны конструкцией самих датчиков; они особенно заметны при слабом ветре (пороговая скорость, при которой начинается вращение, является слишком высокой; излишняя инерция) или при переменном ветре (занижение или завышение скорости ветра; неправильные показания направления из-за излишнего или неадекватного демпфирования колебаний).

2.3 ВИДИМОСТЬ

Определение понятия метеорологической оптической дальности (МОД) и ее оценка или инструментальное измерение описываются в главе 9 части I. Измерение видимости в авиации является специфическим измерением МОД. Однако термин МОД все еще не получил широкого использования в авиации, и в этой главе для описания оперативных требований оставлен термин видимость. Для целей авиации существует общепринятая практика сообщать дальность видимости, например, ДВВПП и «видимость для целей авиации» (VIS-AERO). Следует отметить, что последняя используется в сводках и обозначается только как «видимость», которая отличается от общего определения видимости (см. главу 9 части I). Приборы, применяемые для измерения МОД, можно также использовать для измерения ДВВПП (см. раздел 2.4) и VIS-AERO (см. раздел 2.3.1). В Техническом регламенте [C.3.1], приложение 3, 4.2 и 4.3, содержится официальное описание этих вопросов, предназначенное для международной авиации.

На международных аэродромах наблюдения за видимостью, проводимые для включения в сводки, распространяемые за пределами аэродрома, должны быть репрезентативными для территории аэродрома и его ближайших окрестностей. Наблюдения за видимостью, проводимые для включения в сводки, используемые для посадки и взлета и распространяемые только в пределах аэродрома, должны быть репрезентативными для зоны приземления взлетно-посадочной полосы; при этом следует помнить, что эта зона может отстоять на несколько километров от наблюдательной станции.

Для целей авиации диапазон измерений видимости составляет от 25 м до 10 км. Значения, превышающие или равные 10 км, указываются как 10 км. В связи с этим датчик должен предусматривать измерение значений больше 10 км или показывать, если измерение больше или равно 10 км. При оперативной работе желательно, чтобы на средствах отображения измеренные значения округлялись в сторону меньшего значения, кратного 50 м при видимости до 600 м, 10 % между 600 и 1500 м и 20 % при видимости более 1500 м (добавление А к публикации ВМО (2004)). Сведения о точности измерений можно найти в главах 1 и 9 части I.

Ввиду того, что метеорологические минимумы определяют принятие оперативных решений о возможности успешной посадки или взлета воздушного судна, точная и надежная информация должна даваться всегда, когда видимость достигает пороговых значений, а именно, всегда, когда видимость, уменьшаясь или увеличиваясь, проходит граничные значения 800, 1500 или 3000 и 5000 м, например, в случае начала, прекращения или изменения интенсивности тумана или осадков (Технический регламент [C.3.1], приложение 3, 2.3.2 (e)).

Там, где видимость значительно изменяется по направлениям, особенно в зонах взлета и посадки, следует давать дополнительную информацию - указывать направление наблюдения, например, «VIS 2000 M TO S».

Когда видимость менее 800 м, ее следует регистрировать с шагом 50 м в форме VIS 350M, когда она составляет 800 м и более, но менее 5 км – с шагом 100 м; когда она составляет 5 км и более, но менее 10 км – с шагом километр в форме VIS 7KM, и когда она составляет 10 км и более, ее следует давать как 10 км, за исключением условий, при которых используется аббревиатура CAVOK (Ceiling And Visibility OK – «Видимость, облачность и текущие погодные условия лучше предписанных») (Технический регламент [C.3.1], приложение 3, 4.2.4.1).

Применяются методы, описанные в главе 9 части I. Метеорологические наблюдения за видимостью должны проводиться наблюдателем с «нормальным» зрением, который наблюдает выбранные объекты с определенными характеристиками, находящиеся на известных расстояниях от метеорологической станции. Эти наблюдения можно также проводить с использованием приборов для измерения видимости, таких, как трансмиссометры и измерители коэффициента рассеяния. Место проведения наблюдений должно обеспечивать непрерывный обзор аэродрома, включая все взлетно-посадочные полосы.

Если для измерения видимости используется трансмиссометр, то для авиационных целей подходит базовое расстояние (длина базы) 75 м. Однако если прибор также используется для измерения ДВВПП, то длину базы следует выбирать с учетом оперативных минимумов погоды, действующих на аэродроме.

2.3.1 Видимость для целей авиации

Технический регламент [C.3.1] 1.1 определяет видимость. VIS-AERO является наибольшей из следующих величин:

(c) максимальное расстояние, с которого объект черного цвета надлежащих размеров, расположенный у поверхности земли, может быть виден или различим при наблюдении на светлом фоне;

(d) максимальное расстояние, с которого источники света порядка 1000 кд могут быть видны или различимы на неосвещенном фоне.

VIS-AERO – это, по сути, «дальность видимости», например как ДВВПП, включающая такие субъективные элементы как психофизиологические характеристики глаза человека и искусственные источники света. Однако, слово «видимость» обычно используется без добавления фразы «для целей авиации», и может возникнуть путаница с официальным определением понятия «видимость», данным ВМО (см. главу 9 части I), которая известна как МОД (метеорологическая оптическая дальность). Оптическая дальность целиком основана на физическом состоянии атмосферы, не включает факторы, связанные со зрением человека и использованием искусственных источников света, и поэтому является объективной величиной. Эта видимость (для целей авиации) сообщается в сводках METAR. Поскольку авиационная метеорологическая станция может быть объединена с синоптической станцией, видимость в сводках SYNOP будет отличаться от видимости в сводках METAR, хотя и измеряется одним и тем же оборудованием.

Видимость для целей авиации может измеряться и рассчитывается аналогично ДВВПП (для получения более подробной информации см. раздел 2.4), за исключением того, что для интенсивности источника света, I, используется постоянное значение 1 000 кд. Стоит отметить, что это значение верно для света, обычно используемого для оценки видимости, который в 10 раз интенсивнее, чем свет умеренной интенсивности (т.е. 100 кд, см. главу 9 части I).

2.3.2 Преобладающая видимость

Преобладающая видимость определяется как значение видимости, наблюдаемое в соответствии с определением термина «видимость (для целей авиации)», если это значение наблюдается в пределах, по крайней мере, половины линии горизонта, либо в пределах, по крайней мере, половины поверхности аэродрома. Обозреваемое пространство может включать в себя смежные или несмежные секторы. Это значение может быть установлено на основании наблюдений, проводимых людьми, и/или с помощью инструментальных систем, и если приборы установлены, то они используются для получения наилучшей оценки преобладающей видимости (Технический регламент [C.3.1] 1.1). Преобладающую видимость следует передавать в кодовых формах METAR и SPECI.

2.4 ДАЛЬНОСТЬ ВИДИМОСТИ НА ВЗЛЕТНО-ПОСАДОЧНОЙ ПОЛОСЕ

2.4.1 Общие сведения

ДВВПП – это расстояние, на котором пилот воздушного судна, находящегося на осевой линии взлетно-посадочной полосы, может видеть разметку поверхности взлетно-посадочной полосы либо огни, обозначающие взлетно-посадочную полосу или определяющие ее осевую линию. Этот вопрос излагается в Техническом регламенте [C.3.1] 4.6.3 и приложении 3, 4.3. Подробная информация о наблюдении и сообщении ДВВПП содержится в публикации ИКАО (2000). Рекомендуется производить это измерение в течение периодов, когда горизонтальная видимость менее 1 500 м.

Высота порядка 5 м считается соответствующей среднему уровню глаз пилота воздушного судна, находящегося на осевой линии взлетно-посадочной полосы. Отметим, что уровень глаз пилота широкофюзеляжного самолета может находиться по крайней мере на высоте 10 м. На практике ДВВПП нельзя измерить непосредственно с того места, где находится пилот, который смотрит на осевую линию, и поэтому ДВВПП должна представлять собой оценку того, что пилот может увидеть с этого места. Тем не менее, согласно существующей практике ДВВПП следует оценивать на высоте примерно 2,5 м над взлетно-посадочной полосой (Технический регламент [C.3.1.], приложение 3, 4.3.1.1).

Результаты наблюдения ДВВПП следует сообщать в органы УВД всегда, когда происходит изменение ДВВПП, соответствующее градации порогов, определяющей необходимость такого сообщения. Обычно такие сообщения должны передаваться в течение 15 с после завершения наблюдения. Эти сообщения должны передаваться открытым текстом.

2.4.2 Методы наблюдений

ДВВПП может определяться по косвенным измерениям наблюдателями, которые могут оценивать ее непосредственно или пользоваться вспомогательными приборами, либо с помощью специального оборудования, такого, как трансмиссометр или датчики для измерений рассеянного света, либо с помощью видеосистем. На аэродромах, где осуществляется точный заход на посадку, особенно по категориям II, III A и III B, измерения ДВВПП следует выполнять непрерывно с помощью соответствующих приборов, а именно, с помощью трансмиссометров и измерителей прямого рассеяния (Технический регламент [C.3.1.], приложение 3, 4.3.2.1 для категорий II и III, и рекомендация для категории I в [C.3.1.], приложение 3, 4.3.2.2).

Для оперативных целей ДВВПП можно оценить по таблицам или, что предпочтительнее, с помощью автоматических средств, которые выдают значения ДВВПП в цифровом виде. В соответствии с Техническим регламентом [C.3.1], приложение 3, 4.3.5, дальность видимости вычисляется отдельно для каждой взлетно-посадочной полосы.

2.4.2.1 Измерения, выполняемые наблюдателями

Подсчет наблюдателями огней ВПП (или огней, установленных параллельно ВПП специально для этой цели), видимых в тумане, является простым и удобным методом определения ДВВПП (но для точной посадки по приборам только, если инструментальная система вышла из строя). Трудность, возникающая при использовании данного метода, связана с разрешающей способностью глаза человека, которая при превышении некоторого расстояния (зависящего от наблюдателя) не позволяет различать и подсчитывать огни ВПП.

Поскольку местонахождение наблюдателя относительно огней ВПП не соответствует местонахождению пилота, то для определения истинной ДВВПП важную роль играют переходные графики. Для оценки ДВВПП в светлое время суток можно также использовать специально сконструированные щиты-ориентиры, размещаемые сбоку от взлетно-посадочной полосы.

2.4.2.2 Измерения с помощью видео

Для оценки ДВВПП с помощью видеосистем используется видеокамера и приемное устройство для слежения за маркерами на известном расстоянии, которыми служат либо огни взлетно-посадочной полосы, либо специальные огни, либо ориентиры, установленные сбоку от нее. Такая система также представляется полезной для определения клочьев тумана или приземного тумана, которые не могут быть обнаружены приборами.

2.4.2.3 Измерения с помощью трансмиссометра

В настоящее время наиболее общеупотребительным прибором для оценки ДВВПП является трансмиссометр, с помощью которого измеряется коэффициент прозрачности ограниченного участка атмосферы (см. главу 9 части I). ДВВПП можно определять следующим образом:

(a) ДВВПП по огням взлетно-посадочной полосы (ДВВПП на основе пороговой освещенности): ДВВПП зависит от коэффициента прозрачности воздуха, яркости огней взлетно-посадочной полосы и порога световой чувствительности глаза наблюдателя (и пилота), что, в свою очередь, зависит от яркости фона. ДВВПП можно вычислить по формуле:

$$E_t = I\,R^{-2}\,T^{R/a} \qquad (2.1)$$

где E_t – порог световой чувствительности глаза наблюдателя (пилота), зависящий от яркости фона L; I – сила света огней осевой линии или ламп сбоку от ВПП в направлении на наблюдателя (пилота); T – коэффициент прозрачности, измеренный трансмиссометром; R – ДВВПП и a – длина базы трансмиссометра или оптический путь света. Отметим, что для световой чувствительности E глаза наблюдателя (пилота) верно уравнение $E = I / R^2$. Требования к характеристикам интенсивности света огней взлетно-посадочной полосы приведены в публикации ИКАО (2004*b*). В действительности, и для света огней осевой линии, и для света боковых огней ВПП верно, что световая чувствительность глаза наблюдателя (пилота) имеет угловую зависимость и, как следствие, I зависит от R. Поэтому $I = I(R)$ и $E = E(I, R)$. Вычислить R по формуле 2.1 можно только итеративно, что относительно просто с помощью обычного калькулятора, подходящего для вычислительной математики. Значение Et определяется с помощью датчика яркости фона (см. раздел 2.4.3.3);

(b) определение ДВВПП по контрасту (ДВВПП на основе пороговой контрастности): когда при посадке и взлете пилоты ориентируются на другие маркеры, а не на огни взлетно-посадочной полосы, определение ДВВВП следует производить по контрасту специальных ориентиров с фоном. Для вычисления по нижеследующей формуле следует брать за основу значение порога контраста, равное 0,05:

$$R = a\frac{\ln 0{,}05}{\ln T} \qquad (2.2)$$

где R – ДВВПП, определенная по контрасту. Поскольку пороговый уровень контраста составляет 0,05, ДВВПП, определенная по контрасту, идентична МОД, а именно, R = МОД. Отметим, что в темное время суток ДВВПП (на основе пороговой освещенности) всегда будет превышать ДВВПП (на основе порога контраста), или ДВВПП > МОД.

2.4.2.4 Измерения с помощью измерителей прямого или обратного рассеяния

Приборы для измерения коэффициентов прямого или обратного рассеяния (иногда известные как нефелометры), описываются в главе 9 части I. С учетом физических принципов рассеяния света аэрозолями неопределенность измерений с помощью измерителя прямого рассеяния (угол рассеяния – около 31 – 32°) меньше, чем неопределенность измерений с помощью измерителя обратного рассеяния. Таким образом, измеритель прямого рассеяния является предпочтительным. С помощью этих приборов можно определить коэффициент ослабления, который является главной переменной для расчета ДВВПП. Опыт и исследования в части измерителей прямого рассеяния продемонстрировали их способность измерять ДВВПП для авиационных применений (WMO, 1990*b*; 1992*b*).

Поскольку точность приборов различных конструкций может отличаться, до выбора прибора, предназначенного для оценки ДВВПП, следует проверить его рабочие характеристики. В связи с этим калибровку измерителя прямого рассеяния необходимо проверять и контролировать на предмет соответствия стандарту трансмиссометра, точность которого проверяется в предполагаемом

эксплуатационном диапазоне (Технический регламент [C.3.1.], приложение 3, 4.3.2).

Измеритель рассеяния определяет по полученному рассеянному свету коэффициент ослабления «σ» атмосферы для захватываемого измерителем оптического объема (см. главу 9 части I). Поскольку σ является прямой мерой видимости, R можно определить относительно легко (из σ или МОД, где МОД = –ln 0,05/σ ≈ 3/σ). ДВВПП можно определить следующим образом:

(a) ДВВПП в условиях предпочтения ориентации по огням взлетно-посадочной полосы (ДВВПП на основе пороговой освещенности): ДВВПП будет рассчитываться так же как и с помощью трансмиссометра, за исключением того, что используется не *T*, а *σ*. Ее можно рассчитать следующим образом:

$$R = \frac{1}{\sigma}\left(\frac{I(R)}{E_t \cdot R^2}\right) \qquad (2.3)$$

(b) определение ДВВПП по контрасту (ДВВПП на основе пороговой контрастности): когда при посадке и взлете пилоты ориентируются на другие маркеры, а не на огни взлетно-посадочной полосы, определение ДВВВП следует производить по контрасту специальных ориентиров с фоном. Для вычисления по нижеследующей формуле следует брать за основу значение порога контраста, равное 0,05:

$$R = -\ln 0{,}05/\sigma = \text{MOR} \qquad (2.4)$$

где *R* – ДВВПП, определенная по контрасту. Отметим, что ДВВПП (на основе пороговой освещенности) всегда будет превышать ДВВПП (на основе пороговой контрастности), а именно, ДВВПП > МОД.

2.4.3 Приборы и их установка

Инструментальные системы могут быть основаны на трансмиссометрах или измерителях прямого рассеяния для оценки ДВВПП. Наблюдения дальности видимости на ВПП следует проводить на расстоянии не более 120 м от осевой линии взлетно-посадочной полосы. Место проведения наблюдений, которые являются репрезентативным для зоны приземления, следует располагать вдоль взлетно-посадочной полосы примерно в 300 м от ее начала. Места проведения наблюдений, которые являются репрезентативными для середины или дальних участков взлетно-посадочной полосы, следует располагать вдоль полосы на расстоянии 1 000 – 1 500 м от ее начала и на расстоянии 300 м от ее конца (Технический регламент [C.3.1.], приложение 3, 4.3.1.2). Точное положение этих мест и, если необходимо, дополнительных мест для проведения наблюдений (для длинных взлетно-посадочных полос) следует определять после анализа аэронавигационных, метеорологических и климатологических факторов, таких, как наличие затопляемых водой участков и других подверженных туману территорий. Наблюдения дальности видимости на взлетно-посадочной полосе следует проводить на высоте примерно 2,5 м (Технический регламент [C.3.1.], приложение 3, 4.3.1.1).

Об изменениях в рабочем состоянии систем наблюдений ДВВПП следует немедленно сообщать органам, осуществляющим управление воздушным движением и аэронавигационное информационное обслуживание аэродромов.

Для вычисления ДВВПП в нескольких точках аэродромов, а также для отображения результатов измерений на экране с указанием времени наблюдения, коэффициентов прозрачности, измеренной яркости в одной или более точках аэродрома и интенсивности огней взлетно-посадочной полосы обычно используется компьютер. Данные передаются на устройства отображения, установленные в органах УВД, метеорологических и других соответствующих подразделениях, либо на принтеры для целей регистрации.

Интенсивность огней ВПП должна вводиться в компьютер автоматически в соответствии с процедурой, описанной в Техническом регламенте [C.3.1], приложение 3, 4.3.5, либо в соответствии с официальной договоренностью между органами УВД и местным метеорологическим органом.

Для регистрации коэффициентов прозрачности *T* и яркости фона *I* можно также использовать аналоговые или цифровые графические самописцы (с временной разверткой). Устройство графического отображения ДВВПП должно также четко показывать зарегистрированные значения E_t и *I* (см. уравнение (2.1)).

2.4.3.1 Трансмиссометры

Описание трансмиссометров, их установки в месте проведения наблюдений и обслуживания, а также источников ошибок приводится в глава 9 части I со ссылками на другие литературные источники.

Система трансмиссометра состоит из прожектора, который направляет свет известной интенсивности на фотоэлектрический приемник, расположенный на известном расстоянии от прожектора. Изменения

прозрачности атмосферы, вызванные туманом, мглой и т.д., постоянно измеряются и регистрируются. Калибровка прибора позволяет напрямую считывать значения коэффициента прозрачности, выраженные в процентах.

Излучатель и приемник должны быть смонтированы на одной и той же высоте, на прочных, безопасных, рассчитанных на длительный срок службы опорах, и по возможности устойчиво установленных таким образом, чтобы смещения грунта, мороз, неоднородное нагревание опор и т.д. не оказывали неблагоприятного воздействия на соосность обоих блоков. Оптический луч должен проходить на высоте не менее 2,5 м над уровнем взлетно-посадочной полосы.

В одном из типов трансмиссометров излучатель и приемник объединены в одном блоке (см. главу 9 части I). В этом случае отражатель (например, зеркало) устанавливается в том месте, где обычно располагается приемник. Свет выходит и отражается обратно; при этом длина базы равна двум расстояниям между передатчиком/приемником и отражателем. Трансмиссометр может иметь одну или две базы в зависимости от того, используются один или два приемника или ретроотражателя, расположенные на различных расстояниях.

Длина базы трансмиссометра, а именно, длина оптического пути, проходимого лучом света между излучателем и приемником, определяет диапазон измерения ДВВПП. Для ДВВПП между 50 и 1 500 м наибольшее распространение имеет длина базы от 15 до 75 м.

Однако для более коротких баз трансмиссометра необходимы более высокая точность измерения коэффициента прозрачности и лучшая линейность системы. Если должны измеряться низкие значения ДВВПП, соответствующие требованиям для посадки по категориям II и III, то следует выбирать трансмиссометр с короткой базой. Однако максимальная ДВВПП, которая может быть при этом измерена, является относительно малой. Нужно найти компромисс. Существуют трансмиссометры с двумя базами, обеспечивающие более широкий диапазон измерения путем выбора той или иной базы; однако необходимо позаботиться о том, чтобы при переключении баз обеспечивалась согласованность измерений ДВВПП по каждой базе.

Большие значения ДВВПП можно измерять трансмиссометрами с более длинными базами, но для этого требуются более сильные источники света, чтобы компенсировать ослабление света между излучателем и приемником в плотном тумане, а также более узкий угол зрения приемника, чтобы избежать появления помех, обусловленных рассеянием. Измерение самых слабых сигналов также зависит от фонового шума в измерительных устройствах.

Трансмиссометры, как правило, располагаются параллельно взлетно-посадочной полосе. Однако следует избегать прямого (или отраженного) солнечного света, поскольку он может вызвать повреждение. Поэтому оптические оси следует ориентировать приблизительно по направлению север-юг горизонтально (для широт ниже 50°). В противном случае следует использовать систему экранирующих насадок.

2.4.3.2 Измеритель прямого рассеяния

Измерители прямого рассеяния следует устанавливать рядом с взлетно-посадочной полосой аналогично трансмиссометрам. Установка измерителей прямого рассеяния требует меньшей предосторожности, чем установка трансмиссометров. Тем не менее, следует проявлять осторожность, чтобы избежать прямого или рассеянного солнечного света, который может повлиять на работу приемника (или повредить его). В частности, солнечный свет может повлиять на приемник после рассеяния в снежном покрове или на поверхности озера или моря. Современные приборы компенсируют загрязнение оптических компонентов.

2.4.3.3 Датчик яркости фона

Когда рассчитывается ДВВПП, порог светочувствительности глаза Et должен быть известен. Датчик яркости фона следует размещать в конце взлетно-посадочной полосы, вдоль которой установлены один или несколько трансмиссометров или измерителей рассеяния. В аэропорту могут быть установлены один или несколько датчиков яркости в зависимости от числа охватываемых ими взлетно-посадочных полос.

Датчик яркости фона измеряет яркость горизонта или неба в противоположном направлении от солнца. Найденные пороги светочувствительности глаза вводятся в расчет ДВВПП в качестве либо гладкой, либо ступенчатой функции (2 – 4 ступени). График для определения порога чувствительности глаза по яркости фона приводится в Техническом регламенте [C.3.1], добавление *E*, и в публикации ИКАО (2000). Рекомендуемая зависимость, используемая для данного графика, следующая:

$$\log_{10}E_t = 0{,}05\,(\log_{10}L)2 + 0{,}573\,\log_{10}L - 6{,}667 \qquad (2.5)$$

где L – яркость неба у горизонта.

Датчик яркости фона включает в себя фотодиод, расположенный в фокусе объектива с угловой апертурой в пределах от 10° до 20°, ориентированного в направлении север-юг (чтобы избежать попадания в объектив прямого солнечного света), с углом возвышения над горизонтом приблизительно от 30° до 45°.

2.4.4 Проверка приборов

В целях обеспечения надежной работы, а также калибровки системы важно проводить периодические проверки всех компонентов системы трансмиссометров или измерителей рассеяния для измерения ДВВПП. Обычно документация, предоставляемая компаниями-изготовителями и разработчиками таких приборов, содержит подробные инструкции по осуществлению этих проверок, а также указания о корректировке, которую следует предпринять в тех случаях, когда не выдерживаются разрешенные инструментальные допуски. Для трансмиссометров, когда видимость превышает 10 – 15 км, легко проверить, показывает ли прибор коэффициент прозрачности приблизительно равный 100 % (см. главу 9 части I). Для измерителей рассеяния могут использоваться «рассеивающие пластины», эмулирующие определенные значения ослабления. Тем не менее, калибровку измерителя прямого рассеяния необходимо проверять и контролировать на предмет соответствия стандарту трансмиссометра (см. раздел 2.4.2.4).

Правильное обслуживание и калибровка необходимы для того, чтобы:

(a) предотвратить скопление загрязнения на оптических поверхностях;
(b) проверить изменения интенсивности света, испускаемого излучателем;
(c) избежать дрейфа параметров в период после калибровки;
(d) проверить соосность излучателей и приемников.

В местах наблюдений, подверженных сильному загрязнению, необходимо более частое обслуживание. Следует позаботиться о том, чтобы в ходе обслуживания не прекращалась работа всего оборудования одновременно и чтобы перерывы в работе не были длительными, особенно в течение периодов, когда прогнозируется туман.

Если в течение нескольких дней подряд устойчиво держится туман, то следует производить проверку прожектора и убеждаться, что интенсивность его света стабильна; а оборудование следует проверять на наличие дрейфа параметров. В условиях очень густого тумана проверка настройки оптики весьма затруднена или вообще невозможна, поэтому весьма существенно, чтобы механическая часть приборов была надежной, а оптическая – устойчивой.

2.4.5 Отображение данных

Данные по ДВВПП, выводимые на дисплейные устройства для соответствующих аэродромных служб, обновляются в соответствии с действующими местными соглашениями каждые 15 – 60 секунд, а в некоторых случаях лишь каждые 2 минуты. Изменения ДВВПП обычно следует передавать не позднее чем через 15 секунд после окончания наблюдения.

2.4.6 Точность и надежность измерений дальности видимости на взлетно-посадочной полосе

Если применяются датчики, использующие метод измерения рассеянного света, отличающиеся от трансмиссометров, то уравнения для расчета ДВВПП приемлемы для случаев очень малых размеров капель воды, например, таких, которые образуют туман, а не для тех случаев, когда видимость снижается за счет наличия других гидрометеоров, таких как ледяной туман, дождь, снег или литометеоры (песчаные бури). В таких ситуациях измерения МОД и ДВВПП должны использоваться с большой осторожностью, поскольку удовлетворительные соотношения для них еще не приняты.

Расхождение между ДВВПП, определяемой пилотом, и ее измеренным значением может достигать 15 – 20 % при допускаемом стандартном отклонении не более 10 %. Что касается наблюдателей, то вследствие колебаний порога светочувствительности глаза и условий наблюдений различия в сообщаемой дальности видимости вместе могут достигать 15 – 20 %.

Измерения ДВВПП, выполненные с использованием трансмиссометров или приборов для определения коэффициента рассеяния света, репрезентативны только для небольшого объема атмосферы. Из-за значительных изменений плотности тумана во времени, а также в пространстве приобретает важную роль среднее значение, полученное по большому количеству измерений. Быстрые изменения ДВВПП могут вызывать трудности в органах УВД при передаче информации на воздушные суда. По этим причинам для вычисления среднего или скользящего среднего значения рекомендуется период осреднения от 30 секунд и до 1 минуты.

Расхождение между ДВВПП, полученной наблюдателем или по приборам, и истинной ДВВПП обычно не должно превышать пределы, указанные в Техническом регламенте [C.3.1], добавление A.

2.5 ТЕКУЩАЯ ПОГОДА

Наблюдения и передача сводок текущей погоды описываются в главе 14 части I, а процедуры – в Техническом регламенте [C.3.1] 4.6.4 с подробным описанием в Техническом регламенте, приложение 3, 4.4. Для авиации особое внимание должно уделяться наблюдениям и сообщениям о возникновении, исчезновении, интенсивности и месте нахождения метеорологических явлений, важных для безопасной эксплуатации воздушных судов, например, грозы, твердых осадков, а также элементов, ухудшающих видимость в полете.

Для взлета и приземления информация о текущей погоде должна быть по мере возможности репрезентативной для зоны взлета и начального набора высоты или для зоны захода на посадку и посадки. В информации, которая передается за пределы аэродрома, данные о текущей погоде должны быть репрезентативными для данного аэродрома и его ближайших окрестностей.

Большая часть наблюдений за текущей погодой выполняется визуально. Следует уделить внимание выбору таких мест для проведения наблюдений, которые давали бы возможность производить отвечающий требованиям обзор местности во всех направлениях от станции. В помощь наблюдателю могут использоваться приборы, в особенности для определения интенсивности осадков.

Устройства для определения типа осадков (дождь, снег, морось и т.п.) или снижающих видимость явлений, отличных от осадков (туман, дымка, дым, пыль и т.п.), могут быть полезны наблюдателю и могут помочь, если это осуществляется автоматически. Эти приборы основаны преимущественно на измерении коэффициента ослабления или сцинтилляции; в них также могут использоваться зависимости между явлениями погоды и другими количественными величинами, такими, как влажность. В настоящее время не имеется никаких международных соглашений по поводу алгоритмов, используемых для обработки данных в целях определения этих явлений. Поскольку требуется присутствие наблюдателей, то особой потребности в этом оборудовании авиационная метеорология не испытывает.

Описания явлений, сообщаемых в текущей погоде, приводятся в главе 14 части I, а также в публикациях ВМО (1975; 1987; 1992*a*; 1995) и ИКАО (2004*a*).

Спецификации специальных сводок, касающихся текущей погоды, содержатся в Техническом регламенте [C.3.1], приложение 3, 4.4.2. Сокращения и кодовые цифры, используемые в составляемых открытым текстом сводках METAR или SPECI, приводятся в Техническом регламенте [C.3.1], приложение 3, 4.4.2.3 – 4.4.2.5.

2.6 ОБЛАЧНОСТЬ

2.6.1 Общие сведения

Наблюдения и измерения облачности описываются в главе 15 части I. Для авиационных применений (см. Технический регламент [C.3.1] 4.6.5 и приложение 3, 4.5) информация об облачности (количество, высота нижней границы, тип) должна быть репрезентативной для аэродрома и его ближайших окрестностей, а в сообщениях для посадки – для зоны захода на посадку. Когда информация об облачности передается воздушным судам, идущим на посадку на взлетно-посадочную полосу, оборудованную для точного захода на посадку, то эта информация должна быть репрезентативной для метеорологических условий в месте установки среднего маркера системы посадки по приборам или на аэродромах, где средний маркер не используется, на расстоянии 900 – 1 200 м от посадочного порога ВПП в начале ВПП (Технический регламент [C.3.1], приложение 3, 4.5.1).

Если небо не различимо или не видимо, то высота нижней границы облаков заменяется вертикальной видимостью, сообщаемой в местных регулярных (MET REPORT) и местных специальных (SPECIAL) сводках (Технический регламент [C.3.1.] 4.5.1(i)) и в метеорологических сводках METAR и SPECI (ВМО, 1995, FM 15/FM 16, параграф 15.9). Вертикальная видимость определяется как максимальное расстояние, на котором наблюдатель может увидеть и различить объект, находящийся на одной с ним или с ней вертикали, выше или ниже. Вертикальную видимость можно получить из профиля оптического ослабления, определяемого с помощью лидарного облакомера. Предположив, что полное ослабление s на высоте h можно получить из коэффициента ослабления обратного рассеяния sB на этой высоте после соответствующей калибровки для всего диапазона высот, и предположив, что порог контраста в 5 % применяется также как и к МОД, для вертикальной видимости VV должно выполняться следующее условие:

$$\int_0^{VV} \sigma(h) \cdot dh = \ln\left(\frac{I(VV)}{I_0}\right) = \ln(0{,}05) = \qquad (2.6)$$

Поскольку лидарный облакомер определят коэффициент локального ослабления для фиксированных

интервалов Δh, *VV* можно относительно легко получить следующим образом:

$$\sum_{i=1}^{N} \sigma_i \cdot \Delta h = 3, \text{ при этом } h_N = VV \qquad (2.7)$$

Типичные кодовые слова, например, *CAVOK*, *SKC* (ясное небо), NCD (без облаков) и NSC (нет существенной облачности), используются в сводках, когда состояние атмосферы или погода не повлияют на взлет и посадку; замена количественной информации простыми сокращениями выгодна. Подробная информация об использовании этих методов приведена в Техническом регламенте [C.3.1], приложение 3, 2.2 и 4.5.4.1. Например, кодовое слово CAVOK используется, когда облачность и текущая погода лучше, чем предписанные значения или условия, но если эти определенные условия соблюдены. Особую осторожность следует соблюдать при использовании этих сокращений в автоматических системах измерений, которые не способны измерять облачность или вертикальную видимость в рамках установленных требований.

Высоту нижней границы облаков обычно следует сообщать относительно высоты аэродрома. Однако если используется оборудованная для точного захода на посадку взлетно-посадочная полоса, порог которой ниже на 15 м и более высоты аэродрома, то следует провести местные мероприятия для передачи на прибывающие воздушные суда высоты облаков относительно высоты порога полосы.

2.6.2 Методы наблюдений

Основные методы, применяемые для определения высоты нижней границы облаков, следующие:

(a) прожектор для обнаружения нижней границы облаков;
(b) облакомер с вращающимся лучом;
(c) лазерный облакомер;
(d) шар-пилот;
(e) визуальная оценка;
(f) сообщения с воздушных судов.

Если возможно, высоту нижней границы облаков всегда следует измерять. На очень загруженных или на международных аэродромах с системами точного захода на посадку измерения высоты нижней границы облаков следует выполнять автоматически, с тем чтобы эту информацию и ее любые изменения можно было получать непрерывно.

Метод измерения нижней границы облаков с помощью шаров-пилотов требует слишком много времени и часто дает ошибки, чтобы принять его в качестве основного метода измерения высоты нижней границы облаков на аэродромах; и визуальный метод также часто дает ошибки, особенно ночью, чтобы применяться там, где эти наблюдения являются критически важными. Сообщения с воздушных судов о высоте нижней границы облаков могут дать наблюдателю ценную вспомогательную информацию. Интерпретируя информацию пилотов, необходимо проявлять осторожность по той причине, что эта информация может относиться к месту, расположенному в нескольких километрах от точки наблюдений на земной поверхности.

2.6.3 Точность измерений высоты нижней границы облаков

Разорванный, диффузный и неустойчивый характер основания многих видов облаков ограничивает степень точности, с которой можно измерять высоту их нижней границы. Отдельные или редкие измерения, например, с помощью шаров-пилотов, могут быть нерепрезентативными для облачности в целом. Для получения достоверной оценки требуется изучение квазинепрерывной регистрации измерений, проведенной с помощью одного из вышеупомянутых приборов в течение нескольких минут.

Указываемая производителями приборов точность измерений, осуществляемых с их помощью, обычно устанавливается при использовании твердых или искусственных целей. Однако в оперативной работе точности достигнуть труднее ввиду размытости нижнего основания облаков.

2.7 ТЕМПЕРАТУРА ВОЗДУХА

Общие сведения о приборах и методах наблюдений за температурой воздуха даются в главе 2 части I. Для аэронавигационных целей (см. Технический регламент [C.3.1] 4.1 и 4.5.1(j)) необходимо знать температуру воздуха над взлетно-посадочной полосой. Обычно данные, получаемые с помощью приборов в правильно размещенных и хорошо вентилируемых метеобудках, дают достаточную аппроксимацию требуемых значений этого элемента. О быстрых изменениях температуры воздуха (2 – 3 °C за полчаса) следует незамедлительно уведомлять органы УВД, главным образом в тропических и субтропических зонах.

Датчики температуры должны размещаться таким образом, чтобы на них не влияли движущиеся или припаркованные воздушные суда, а получаемые с их помощью значения температуры были репрезентативными для взлетно-посадочной полосы. Во

избежание незначительных флуктуаций температуры (при средней скорости ветра 5 м/с) предпочтительнее использовать термометры с постоянной времени, равной 20 секунд, или в случае автоматических измерений следует использовать соответствующий цифровой усредняющий или резистивно-ёмкостный фильтр. Полезно применение систем дистанционной индикации и регистрации. Кроме того на аэродромах с ВПП, предназначенными для заходов на посадку и посадок по приборам по категориям II и III, требуется размещение автоматических средств измерения и устройств отображения информации в месте установки автоматических систем сбора информации. Измерения температуры стали чаще осуществляться автоматическими станциями или системами сбора данных, и результаты этих измерений отображаются в цифровой форме в виде осредненного за 1 – 10 минут значения, полученного после линеаризации выходного сигнала датчика. Для авиационных целей указанное значение следует округлить до ближайшего целого числа.

2.8 ТОЧКА РОСЫ

На авиационных погодных станциях влажность воздуха обычно представляется в виде точки росы t_d. Показание прибора, измеряющего эту величину, округляется до ближайшего целого числа, как и в случае температуры воздуха. Процедуры описываются в Техническом регламенте [C.3.1] 4.1 и 4.5.1(j). Методы наблюдений описываются в главе 4 части I.

Современные датчики влажности позволяют использовать дистанционные индикаторы и регистрирующие приборы. В случае неавтоматизированных наблюдений обычно используется психрометр. Для непревышения заявленной неопределенности измерений предпочтительнее использовать психрометр с принудительной вентиляцией. Широко используются следующие типы приборов:

(a) емкостные датчики, основанные на измерении емкости конденсатора, в котором диэлектрическая проницаемость прокладки из полимерного диэлектрика является функцией содержания водяного пара в окружающем воздухе. На практике измеряемая емкость связана с относительной влажностью U практически линейной зависимостью. Точка росы рассчитывается по температуре окружающего воздуха (измеряется отдельно и на очень коротком расстоянии от емкостного датчика) ($t_d = t_d(t, U)$). Соответствующие формулы приведены в приложении 4.B к главе 4 Части I. Чтобы избежать конденсации, которая способна продолжаться даже после того как U < 100 %, и которая может быть замедлена фильтром, защищающим датчик, последний можно подогреть. Для такого метода не следует при расчетах использовать температуру окружающего воздуха; следует использовать значение температуры воздуха, окружающего подогретый датчик. На практике, соответствующую процедуру можно проводить только после тщательной калибровки в хорошо сконструированных климатических камерах;

(b) конденсационные гигрометры, измеряющие температуру, при которой на зеркальце происходит едва заметная конденсация росы. Зеркальце подогревается или охлаждается, чаще всего с использованием термоэлектрического эффекта Пельтье, с целью достижения условий равновесия, при котором сохраняется образовавшийся конденсат. Зеркальце снабжается фотоэлектронной системой слежения за конденсатом. Хотя такие устройства позволяют получать непосредственно значения точки росы, загрязнение и ухудшение состояния зеркала могут привести к значительным погрешностям. В частности, зеркальце может разрушиться от мороза. По крайней мере, каждые шесть месяцев зеркальце должно проверяться, но только квалифицированным персоналом. Особую осторожность следует соблюдать при чистке зеркальца и строго следовать инструкциям изготовителя гигрометра.

2.9 АТМОСФЕРНОЕ ДАВЛЕНИЕ

2.9.1 Общие сведения

Общее описание наблюдений за атмосферным давлением можно найти в главе 3 части I, а описание наблюдений за атмосферным давлением для целей авиации имеется в Техническом регламенте [C.3.1] 4.6.7. Измерения давления на авиационной станции очень важны для установки высотомеров воздушных судов. Давление рассчитывается с точностью до десятых долей гектопаскаля (0,1 гПа). В коде Q, атмосферное давление обозначается как QFE и QNH, где:

(a) QFE (давление на уровне порога ВПП) определяется, как значение давления на высоте, соответствующей официальной высоте аэродрома (Технический регламент [C.3.1.], приложение 3, 4.7.2). Контрольная точка аэродрома, высота и превышение ВПП описываются в публикации ИКАО (2004*b*);

(b) QNH (давление над уровнем моря) определяется как значение давления, по которому устанавливается высотомер воздушного судна, чтобы он показывал официальную

высоту аэродрома, когда воздушное судно находится в этом месте на земле. QNH вычисляется с использованием значения QFE и соотношения давление-высота, принятого в стандартной атмосфере ИКАО. На самом деле, стандартная атмосфера ИКАО – это поддиапазон Международной стандартной атмосферы, который закреплен стандартом ИСО 2533:1975 и разработан в сотрудничестве с Комитетом по космическим исследованиям, ИКАО и ВМО. Эта стандартная атмосфера представляет собой статическую атмосферу с фиксированным давлением и температурой на уровне моря и фиксированным градиентом температуры. Подробная информация о стандартной атмосфере и ее установленных константах приведена в публикациях ВМО (1966) и ИКАО (1993). Для расчета QNH из QFE, а именно приведения к среднему уровню моря, используется данная виртуальная атмосфера, а не текущее истинное состояние атмосферы. Как следствие, QNH будет отличаться от сообщаемого атмосферного давления, приведенного к среднему уровню моря, о чем изложено в разделе 3.11 главы 3 части I, и для которого используется фактическая температура. Расчет QNH из QFE основан на линейном соотношении (для станций ниже примерно 3 000 – 4 000 м):

$$\text{QNH} = A + B \times \text{QFE} \qquad (2.8)$$

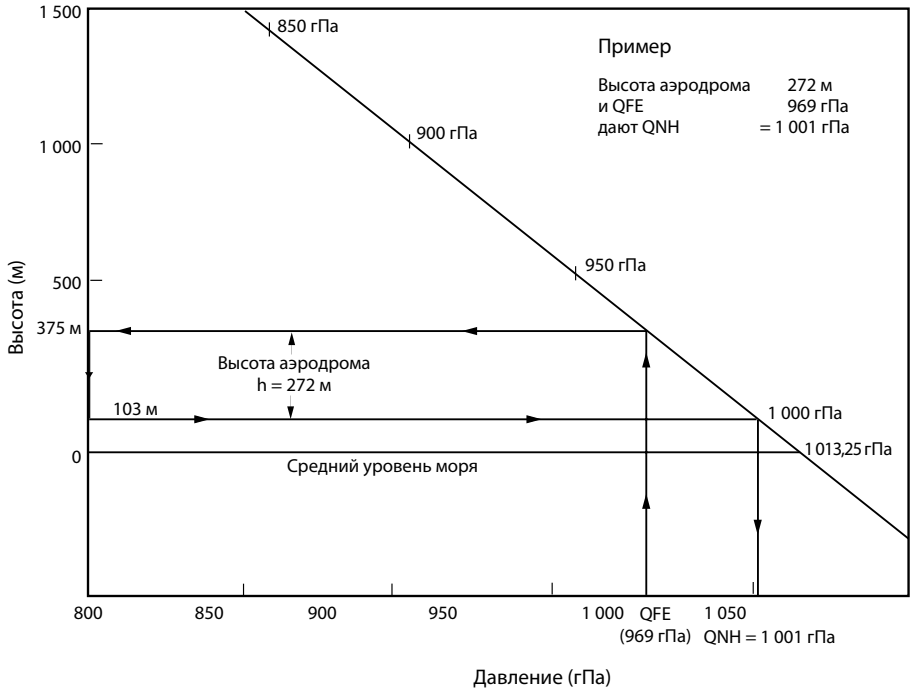
где A и B зависят от геопотенциальной высоты станции (для получения подробной информации см. WMO, 1966, Introduction to Table 3.10). Для получения QNH следует выполнить следующую трехэтапную процедуру:

(i) Определить барометрическую высоту станции, исходя из QFE (барометрическая высота рассчитывается из QFE с использованием формул стандартной атмосферы);

(ii) Вычесть (или прибавить для станций ниже среднего уровня моря) из этой барометрической высоты высоту станции по отношению к среднему уровню моря, чтобы получить барометрическую высоту на высоте среднего уровня моря (значение может быть положительным или отрицательным);

(iii) Получить из этой барометрической высоты соответствующее значение давления в соответствии со стандартной атмосферой, которое и будет QNH.

Пример данной процедуры получения QNH из QFE показан на рисунке ниже. Измеренные значения давления, а также QNH и/или QFE должны быть вычислены в десятых долях гектопаскаля. Значения QNH и QFE должны включаться в локальные сводки и в сводки, распространяемые за пределы аэродрома, и значения должны округляться до ближайшего целого гектопаскаля. О больших и быстрых изменениях давления следует уведомлять органы УВД.



Данный график представляет стандартную атмосферу (барометрическая высота как функция давления).

2.9.2 Приборы и их установка

Приборы для измерения давления, используемые на авиационной станции, аналогичны тем, что используются на синоптической станции, за исключением того, что более часто применяются точные автоматические цифровые барометры, показания которых удобнее и быстрее считывать при регулярных наблюдениях. Авиационные станции следует оснащать одним или несколькими хорошо откалиброванными барометрами, привязанными к стандартному эталону. Следует соблюдать установленный график регулярных сравнений приборов с этим стандартным прибором. Подходят как неавтоматические, так и автоматические барометры при условии, что температурная зависимость, дрейф и гистерезис достаточно компенсированы. Подробная информация о подходящих барометрах содержится в главе 3 Части I.

Размещение барометров на авиационной станции такое же, как и на синоптической станции. Если барометры должны быть помещены внутри здания, то нужно, чтобы датчики сообщались с внешней средой с помощью соответствующим образом размещенного статического устройства. Из-за воздействия ветра на здание разность давлений внутри и снаружи здания может быть больше 1 гПа. Для предотвращения таких отклонений, которые при высоких скоростях ветра могут достигать плюс-минус 3 гПа, статическое устройство должно располагаться достаточно далеко от этого здания. Кроме того, на измерения давления может повлиять кондиционер, чего можно будет избежать, используя такое статическое устройство.

Имеются приборы с непосредственным считыванием значений QNH, и их можно использовать вместо обычного барометра-анероида или ртутного барометра, по показаниям которых значения QNH необходимо рассчитывать с помощью таблицы. Для таких устройств следует вводить правильные значения *A* и *B*, которые являются функцией геопотенциальной высоты станции (см. уравнение 2.8). Показания этих приборов необходимо периодически сравнивать со значениями QNH, вычисляемыми по результатам измерений ртутным барометром.

2.9.3 Точность измерений давления и поправки

Значения давления, используемые для установки высотомеров воздушных судов, должны иметь погрешность измерений до 0,5 гПа или лучше (Технический регламент [C.3.1.], добавление A). К показаниям ртутного барометра следует применять все соответствующие поправки, а поправки, полученные в результате регулярных сравнений ртутных и анероидных приборов, обычно используемых для наблюдений, должны применяться ко всем значениям, полученным по барометрам-анероидам. Там, где в диспетчерских пунктах УВД используются анероидные высотомеры, для более четкого преобразования их показаний в официальную высоту аэродрома или взлетно-посадочной полосы должны быть предусмотрены поправки, отличающиеся от тех, которые используются на наблюдательной станции (Технический регламент [C.3.1], приложение 3, 4.7).

Значения давления, используемые для установки высотомеров, должны относиться к официальной высоте аэродрома. Для взлетно-посадочных полос с неточным заходом на посадку, пороги которых находятся на 2 м или более ниже или выше высоты аэродрома, и для взлетно-посадочных полос с точным заходом на посадку значения QFE, если это необходимо, должны относиться к соответствующим высотам порогов.

2.10 ПРОЧАЯ ВАЖНАЯ ДЛЯ АЭРОДРОМОВ ИНФОРМАЦИЯ

2.10.1 Общие сведения

Наблюдения, выполняемые на авиационных станциях, должны также включать любую имеющуюся информацию о метеоусловиях в зонах захода на посадку и набора высоты, касающуюся следующих явлений: кучево-дождевые облака или грозы, умеренная или сильная турбулентность, горизонтальный и/или вертикальный сдвиг ветра и значительные изменения ветра по маршруту полета, град, сильные фронтальные шквалы, умеренное или сильное обледенение, переохлажденные осадки, выраженные горные волны, песчаные и пыльные бури, низовая метель или воронкообразные облака (торнадо или водяные смерчи); например, SURFACE WIND 320/10 WIND AT 60M 360/25 IN APCH или MOD TURB AND ICE INC IN CLIMB OUT.

2.10.2 Наклонная дальность видимости

Несмотря на разработки, выполняемые в различных странах, никакие приборы для измерения наклонной дальности видимости не стали использоваться в оперативной работе. Быстрое технологическое развитие систем всепогодной посадки дало возможность понизить посадочные минимумы на аэродромах (категории II, III A и III B) и постепенно привело к тому, что данный параметр считается менее важным. Никаких рекомендаций по измерению этого параметра не установлено.

2.10.3 Сдвиг ветра

Сдвиг ветра – это пространственное изменение скорости и/или направления ветра (включая восходящие и нисходящие потоки). Интенсивность сдвига ветра в соответствии с его воздействием на воздушное судно можно классифицировать как слабую, умеренную, сильную или опасную. Сдвиг ветра на малых высотах, который может повлиять на приземление и взлет, может представлять собой вертикальный градиент ветра в низких слоях термически устойчивой атмосферы либо может быть связан с воздействием препятствий и фронтальных поверхностей на поток ветра, с влиянием берегового и морского бризов, а также с ветровым режимом внутри и вокруг конвективных облаков, особенно в штормовых облаках. Сильные штормы являются главной причиной сдвига ветра в приземном слое, приводят к авиационным катастрофам как при заходе воздушных судов на посадку и во время нее, так и при взлете.

Подготовка и выпуск предупреждений о сдвиге ветра на траекториях набора высоты и захода на посадку описываются в Техническом регламенте [C.3.1], приложение 3, 4.8.1.3.

Измерения вертикального сдвига ветра, основанные на информации, представленной в главе 5 части I, могут проводиться напрямую с помощью анемометров, установленных на высоких мачтах, которые должны быть расположены на определенном расстоянии от аэропорта. Из систем дистанционного зондирования имеются: доплеровский радиолокатор, лидар, содар и измерители профиля ветра. В лидаре используется лазерный луч, в содаре - акустическое излучение, в радиолокаторе для получения профилей ветра используется электромагнитное излучение с частотами приблизительно 50, 400 или 1000 МГц.

Горизонтальный сдвиг ветра обычно определяется с помощью системы анемометров, установленных по всему аэродрому. Эта система называется системой предупреждения о сдвиге ветра на малых высотах. Алгоритмы компьютерной обработки дают возможность выдавать предупреждения о сдвиге ветра. Эта система используется, в частности, в тропических и субтропических регионах, где часто возникают интенсивные штормы.

Данный вопрос рассмотрен на глобальном уровне в *Руководстве ИКАО по сдвигу ветра и турбулентности на малых высотах* (Док. 9817), Первое издание, 2005.

Хотя сдвиг ветра может оказывать существенное влияние на полеты воздушных судов, никаких рекомендаций или критериев до сих пор не установлено. Тем не менее, подробная информация о предупреждениях о сдвиге ветра приводится в публикации ИКАО (2004*a*).

2.10.4 Заметные инверсии температуры

Информацию о заметных инверсиях температуры, превышающих 10 °C между поверхностью ВПП и уровнями до 300 м, следует предоставлять, если таковая имеется. Данные обычно получаются с помощью аэрологических радиозондов, дистанционного зондирования, наблюдений с самолетов (например, АМДАР) либо анализа метеорологической ситуации.

2.11 АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

На авиационных станциях специально разработанные приборные системы для измерения, обработки, дистанционной индикации и регистрации значений различных метеорологических величин, репрезентативных для зон захода на посадку, посадки и взлета, а также для взлетно-посадочных полос аэропорта, стали обычной практикой (Технический регламент [C.3.1] 4.1).

Эти автоматизированные системы включают:

(a) систему сбора для преобразования результатов электрических аналоговых измерений (вольты, миллиамперы, сопротивление, емкость) в цифровые значения, выраженные в соответствующих единицах, и для прямого ввода цифровых данных;

(b) устройство предварительной обработки данных (осреднение показаний за период времени от 1 до 10 минут в зависимости от измеряемого параметра и выборка минимальных, максимальных и средних значений различных параметров);

(c) компьютер, который используется, например, для подготовки сводок SYNOP, METAR и SPECI, а также для программного обеспечения телесвязи.

Наблюдатель должен иметь возможность включать в эти сводки те сведения, которые не измеряются автоматической станцией; сюда могут входить текущая погода, прошедшая погода, облачность (тип и количество), а иногда видимость. Поэтому для целей авиации эти станции часто являются только вспомогательными для получения метеорологических данных и не могут применяться без наблюдателей.

Приборы, установленные на автоматической станции, должны регулярно проверяться и инспектироваться. Проверки качества необходимы и рекомендуются во избежание больших ошибок и получения информации о дрейфе параметров оборудования. Измерения, осуществляемые автоматическими метеорологическими станциями, подробно рассматриваются в главе 1 части II. Обеспечение качества и другие вопросы управления рассматриваются в главе 1 Части III. Чтобы обеспечить заявленное качество работы автоматических приборов, следует разработать подробный план оценки с указанием подробной информации о техническом обслуживании и периодичности калибровки и процедур обратной связи для улучшения системы наблюдений.

Рекомендации по передаче метеорологической информации, поступающей с автоматических систем наблюдений, содержатся в Техническом регламенте [C.3.1.], приложение 3, 4.9.

2.12 РАДИОЛОКАТОР

На аэродромах с интенсивным воздушным движением стали незаменимыми метеорологические радиолокаторы, поскольку они обеспечивают эффективные, постоянные наблюдения в реальном масштабе времени, дополняющие обычные метеорологические наблюдения, необходимые для посадок и взлетов. Радиолокатор может предоставить информацию по обширной зоне – до 150 – 200 км. Он также является вспомогательным средством для краткосрочного прогнозирования в пределах часа или нескольких часов после наблюдения (возможная помощь в подготовке сводки TREND).

Принятые эхо-сигналы интерпретируются для определения типа осадков в зоне наблюдений станции: осадки из слоистых или конвективных облаков, изолированные области осадков или обложные осадки, либо осадки, связанные с грозами, а при определенных условиях для определения вида осадков: снег или град. Полученные отображения дают возможность отследить траектории линий шквалов или фронтов, а также осуществлять мониторинг их развития (усиление или ослабление). Если радиолокатор оборудован доплеровской системой, то тогда можно вычислять скорость и направление движения этих эхо-сигналов от наблюдаемых явлений.

Наиболее широко используются радиолокаторы, работающие на длинах волн 3,5 или 10 см. Выбор зависит от района земного шара и предполагаемой цели использования, но общей тенденцией в настоящее время является использование волн длиной 5 см.

В определенных районах центры сбора собирают радиолокационные отображения, поступающие с ряда радиолокационных станций в стране или в регионе, и составляют из них комплексное отображение. Происходит также обмен отображениями между различными центрами, чтобы с помощью радиолокаторов обеспечивать безопасность в максимально возможной большой зоне.

Общее описание радиолокационных наблюдений можно найти в главе 9 части II.

2.13 ДАТЧИК ЛЬДА

Данный тип приборов, описанный в главе 14 части I, устанавливается на ряде аэродромов для предоставления информации об условиях на взлетно-посадочных полосах зимой. Измеряются или обнаруживаются: температура на поверхности и на глубине несколько сантиметров ниже поверхности взлетно-посадочной полосы, наличие снега, воды, прозрачного или матового льда и наличие солей или продуктов очистки ВПП ото льда, если таковые применяются. Такие датчики, выполненные в виде компактного устройства, располагаются в определенном ряде точек взлетно-посадочных полос или рулежных дорожек; при этом их число зависит от размера аэродрома и количества взлетно-посадочных полос, безопасность которых должна быть обеспечена. Вблизи взлетно-посадочных полос также размещаются метеорологические датчики для измерения температуры и влажности воздуха, ветра и осадков.

Система сбора данных и обработки данных отображает измеренные параметры и их изменения во времени. В зависимости от типа используемого программного обеспечения системы предупреждения оповещают администрацию аэропорта, ответственную за функционирование аэродрома, о наличии прозрачного льда или о прогнозах условий, опасных для воздушных судов.

2.14 ОБНАРУЖЕНИЕ МОЛНИЙ

В последние годы разработаны системы для определения местоположения гроз, основанные на регистрации низкочастотного электромагнитного излучения, создаваемого молниями (см. главу 7 части II). Эти системы измеряют время прохождения сигнала и/или направление, с которого он приходит. Некоторые системы также анализируют характеристики каждого импульса электромагнитного

излучения для определения разрядов молний из облака на землю. В определенных районах установлен ряд таких устройств, предназначенных для измерения и определения местоположения этих явлений в зоне 50 – 100 км вокруг аэродрома.

Предлагаемые руководящие принципы передачи сообщений о грозах:

Примечания:

1. Процедуры, касающиеся только сводок METAR, выделены курсивом. Вышеизложенные процедуры могут также использоваться при сообщении о грозах в сводках SYNOP (например, если станция аэропорта является также станцией SYNOP)
2. ARP = контрольная точка аэродрома

2.15 ДРУГИЕ СОПУТСТВУЮЩИЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Необходимо предоставлять дополнительную информацию, если атмосфера подвержена опасному загрязнению, например, в период вулканического извержения. Также следует предоставлять информацию в поддержку спасательных операций, особенно на оффшорных станциях. Если это касается обеспечения полетов воздушных судов во время взлета и посадки, информация о состоянии взлетно-посадочной полосы должна сообщаться в сводках METAR и SPECI, передаваемых соответствующим полномочным органом аэропорта.

Данные о вулканическом пепле должны передаваться (в сводках SIGMET) в качестве части дополнительной информации (Технический регламент [C.3.1.], приложение 3, 4.8.). Подробная информация о наблюдении за облаками вулканического пепла, радиоактивных материалов и токсических химических веществ приведена в публикациях ИКАО (2001, 2004*c*).

В сводки METAR и SPECI следует включать информацию о температуре поверхности моря и состоянии моря, полученную с авиационных метеорологических станций, установленных на оффшорных сооружениях в поддержку полетов вертолетов (Технический регламент [C.3.1.], приложение 3, 4.8.1.4).

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Committee on Low-Altitude Wind Shear and its Hazard to Aviation, 1983: *Low-Altitude Wind Shear and Hazard to Aviation*. National Academy Press, Washington DC (http://www.nap.edu/books/0309034329/html/).

Международная организация гражданской авиации, 1993: *Руководство по стандартной атмосфере ИКАО (с верхней границей, поднятой до 80 километров)*. Третье издание, Док. 7488, Монреаль.

International Civil Aviation Organization, 1996: *Manual on the Provision of Meteorological Service for International Helicopter Operations*. Doc. 9680, Montreal.

Международная организация гражданской авиации, 2000: *Руководство по практике наблюдения за дальностью видимости на ВПП и передачи сообщений о ней*. Второе издание, Док. 9328, Монреаль.

Международная организация гражданской авиации, 2001: *Руководство по облакам вулканического пепла, радиоактивных материалов и токсических химических веществ*. Док. 9691, Монреаль.

International Civil Aviation Organization, 2004*a*: *Manual of Aeronautical Meteorological Practice.* Chapter 2 and Appendix D. Sixth edition, Doc. 8896, Montreal.

International Civil Aviation Organization, 2004*b*: *Aerodromes*. ICAO Annex 14, Volume I, Montreal.

International Civil Aviation Organization, 2004*c*: *Handbook on the International Airways Volcano Watch (IAVW)*. Second edition, Doc. 9766, Montreal.

World Meteorological Organization, 1966: *International Meteorological Table*s (S. Letestu). (with 1973 amendments), WMO-No. 188, Geneva.

World Meteorological Organization, 1975: *International Cloud Atlas: Manual on the Observation of Clouds and Other Meteors*. Volume I, WMO-No. 407, Geneva.

World Meteorological Organization, 1987: *International Cloud Atlas*. Volume II, WMO-No. 407, Geneva.

Всемирная Метеорологическая Организация, 1990*a*: *Руководство по системам метеорологических наблюдений и распространения информации на аэродромах*. ВМО-No. 731, Женева.

World Meteorological Organization, 1990*b*: *The First WMO Intercomparison of Visibility Measurements: Final Report* (D.J. Griggs, D.W. Jones, M. Ouldridge, W. R. Sparks). Instruments and Observing Methods Report No. 41, WMO/TD-No. 401, Geneva.

Всемирная Метеорологическая Организация, 1992*a*: *Международный метеорологический словарь*. Второе издание, ВМО-No. 182, Женева.

World Meteorological Organization, 1992*b*: Visibility measuring instruments: Differences between scatterometers and transmissometers (J.P. van der Meulen). *Papers Presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation (TECO-92)*. Instruments and Observing Methods Report No. 49, WMO/TD-No. 462, Geneva.

Всемирная Метеорологическая Организация, 1995: *Наставление по кодам*. Том I.1, ВМО-No. 306, Женева.

Всемирная Метеорологическая Организация, 2002: *Руководящие принципы образования и подготовки кадров в области метеорологии и оперативной гидрологии*. Том I, Четвертое издание, ВМО-No. 258, Женева.

Всемирная Метеорологическая Организация, 2003: *Руководство по практике метеорологических подразделений, обслуживающих авиацию*. Второе издание, ВМО-No. 732, Женева.

Всемирная Метеорологическая Организация, 2004: *Технический регламент*. Том II, ВМО-No. 49, Женева.

ГЛАВА 3

САМОЛЕТНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ

3.1 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

3.1.1 Введение

В настоящей главе описываются методы определения метеорологических параметров атмосферы, реализуемые в автоматических бортовых системах современных коммерческих самолетов, выполняющих регулярные рейсы, и которые известны как самолетные системы передачи метеорологических данных (AMDAR). Вообще говоря, принципы измерений и расчета, описанные в настоящей главе, могут быть использованы и для обработки данных, полученных с борта любого самолета, оснащенного соответствующей аппаратурой. Дополнительная информация о рассматриваемых методах может быть получена в ВМО (2003).

Широкое применение для метеорологических наблюдений беспилотных летательных аппаратов большой дальности, специально созданных для такого рода измерений (например аэрозондов, Holland, McGeer and Youngren, 1992), в настоящее время представляется маловероятным, поэтому здесь их описание не приводится.

Самолетные системы передачи метеорологических данных с самолета AMDAR устанавливаются на хорошо оборудованные самолеты, имеющие современные навигационные и другие измерительные системы. На таких самолетах обычно имеются датчики, измеряющие воздушную скорость самолета, температуру и давление воздуха. Данные от навигационных систем самолета о местоположении самолета, его перегрузках и ориентации в пространстве, поступают в бортовые компьютеры, которые рассчитывают навигационные параметры полета и метеорологические параметры. Эти сведения в свою очередь передаются на информационное табло экипажа самолета и подвергаются обработке в системах AMDAR, после чего автоматически, через самолетную систему связи передаются на наземные пункты сбора данных. В качестве альтернативы в бортовых компьютерах самолета может использоваться специальный программный пакет, обеспечивающий доступ к первичным данным самолетных систем и независимый расчет метеорологических параметров.

В системах AMDAR описанные средства измерений используются для составления и передачи метеорологических сводок в реальном масштабе времени. Обычно эти сводки содержат данные о скорости и направлении горизонтального ветра, температуре воздуха, барометрической высоте полета по стандартной атмосфере, турбулентности, сроке наблюдения, фазе полета и местоположении самолета.

Для того чтобы получить корректные данные метеорологических наблюдений, относящиеся к невозмущенному воздушному потоку, первичные данные метеорологических наблюдений необходимо существенно откорректировать и подвергнуть специальной обработке. Полное описание всех применяемых процедур выходит за рамки настоящего Руководства, здесь приводятся только общие принципы и содержатся ссылки для получения более подробной информации.

3.1.2 Самолетные метеорологические датчики

Основными датчиками, устанавливаемыми на борту современных самолетов, выполняющих коммерческие рейсы, являются приемник полного и статического давлений (трубка Пито) и датчик полной температуры воздуха (TAT). Данные с этих датчиков, а также информация, поступающая от штатной навигационной системы воздушного судна (которая может представлять собой одну, например радионавигационную систему, или сочетание нескольких систем – системы глобального позиционирования GPS, оборудования для измерения расстояния, всенаправленного радиомаяка УКВ-диапазона, системы автоматической посадки, и в некоторых случаях, инерциальной навигационной системы), используются для расчета следующих метеорологических параметров:

(a) барометрической высоты, местоположения самолета и текущего времени;
(b) статической (истинной) температуры воздуха (SAT);
(c) скорости ветра;
(d) направления ветра.

На некоторых самолетах имеются дополнительные возможности для расчета параметров атмосферной турбулентности, дополнительные датчики для измерения обледенения на несущих поверхностях самолета и/или для измерения относительной влажности воздуха или отношения смеси водяного пара (WVMR).

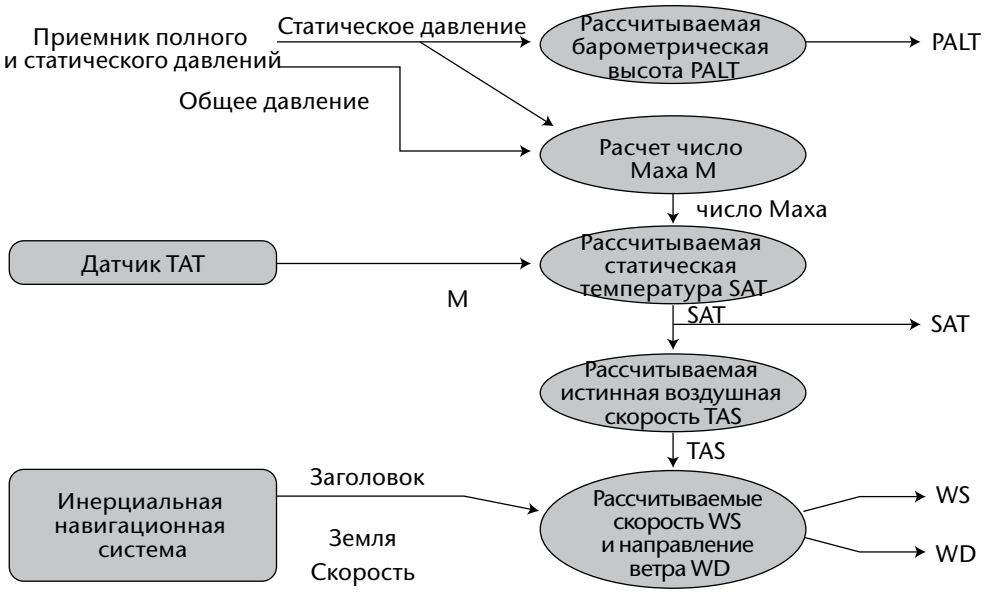


Рис. 3.1. Схема обработки данных с датчиков AMDAR

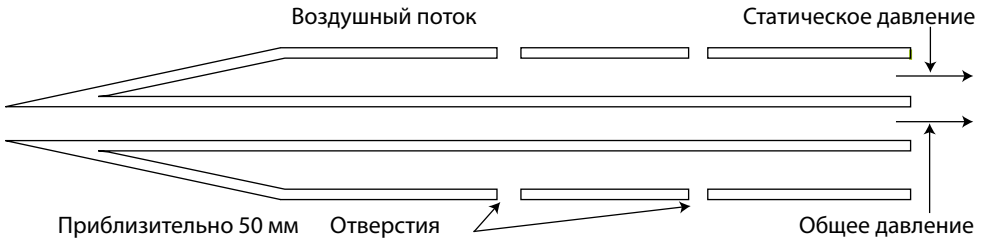


Рис. 3.2. Приемник полного и статического давлений (трубка Пито)

Для того, чтобы лучше представить работу системы AMDAR структура приведенного ниже описания представлена в виде информационных потоков обычной операционной системы. Необходимо отметить, (Рис. 3.1), что рассчитываемые переменные тесно взаимосвязаны.

3.2 ДАВЛЕНИЕ И ЧИСЛО МАХА

3.2.1 Приемник полного и статического давления

Приемник полного и статического давлений (трубка Пито, Рис. 3.2) размещается в невозмущенном потоке воздуха вне пограничного слоя самолета и измеряет статическое давление (т. е. давление в невозмущенном потоке) и полное давление (т.е. статическое давление плюс динамическое давление). Измеряемые приемником давления с помощью электронного датчика давлений преобразуются в сигналы, которые поступают в процессор воздушных сигналов (ADC). Процессор ADC по результатам этих измерений рассчитывает барометрическую высоту и число Маха полета.

3.2.2 Барометрическая высота

Данные о статическом давлении не передаются по системе AMDAR, а преобразуются с помощью процессора ADC в барометрическую высоту по Международной стандартной атмосфере (ИКАО, 1964 г.). Стандартная атмосфера (см. Рис. 3.3) предполагает линейное уменьшение температуры с высотой на 6,5 °C на каждый километр высоты до уровня 11 км (или 36 089 футов) при температуре и давлении на уровне моря 15 °C и 1 013,25 гПа, соответственно. Предполагается, что в слое от 11 до 20 км температура остается постоянной и равной -56,5 °C.

Если барометрическая высота (PALT) не превышает 36 089 футов, то статическое давление P связывается с PALT с помощью следующей формулы:

$$P\,(\text{hPa}) = 101\,3{,}25\cdot(1 - 10^{-6}\cdot 6{,}875\,6\cdot(\text{PALT}))^{5{,}255\,9} \qquad (3.1)$$

Например, если PALT составляет 30 000 футов, то P = 300,9 гПа.

Приведенное выражение может использоваться непосредственно в высотомере, если нулевая отметка шкалы высотомера на самолете (нулевое исходное значение) установлена на стандартное давление на уровне моря (1 013,25 гПа). В этом случае значение PALT полностью соответствует значению высоты, показываемой прибором. Процедуры применения навигационных приборов предусматривают настройку нулевой отметки шкалы высотомера и на другие исходные уровни. Например, высотомер может быть установлен по атмосферному давлению на уровне аэродрома (QFE) или по атмосферному давлению, на высоте полета (QNH), при этом высотомер показывает соответствующий высотный уровень по стандартной атмосфере, относительно посадочной полосы аэродрома. Таким образом, в общем случае, PALT рассчитывается по показаниям высотомера плюс начальное значение высоты, установленное на шкале высотомера по стандартной атмосфере. Общая формула представляется в следующем виде:

$$\text{PALT (ft)} = H_i + H_r \qquad (3.2)$$

$$H_r = (1 - (P_r/101\,3{,}25)^{0{,}190\,3})10^6/6{,}875\,6 \qquad (3.3)$$

где H_i – это измеренная высотомером высота (приборная высота); H_r – высота по стандартной атмосфере; а P_r (гПа) – давление, установленное на шкале высотомера. (Заметим, что H_r = 0, если P_r = 1 013,25 гПа.)

Например:

(a) если начальная отметка шкалы высотомера установлена на значение QNH, составляющее 1 000,0 гПа и приборная высота составляет 9335 футов, то PALT = 9 335 + 364 = 9 699 футов, а P = 705 гПа;

(b) если подвижная шкала установлена на значение QFE, составляющее 990 гПа, высота на уровне аэродрома составляет 276 футов и приборная высота составляет 9 058 футов, то PALT = 9 058 + 641 = 9 699 футов, а значение QNH будет составлять 1 000 гПа.

Если PALT больше 36 089 футов, то статическое давление определяется по формуле:

$$P\,(\text{hPa}) = 226.32^{-(\text{PALT}-36\,089)/20\,805} \qquad (3.4)$$

Например, если PALT составляет 40 000 футов, то P = 187,5 гПа.

3.2.2.1 Погрешности измерений

В качестве погрешностей измерений можно выделить следующие:

(a) ошибки калибровки;
(b) случайные погрешности приборов;
(c) дрейф калибровочных значений;
(d) погрешность измерения статического давления.

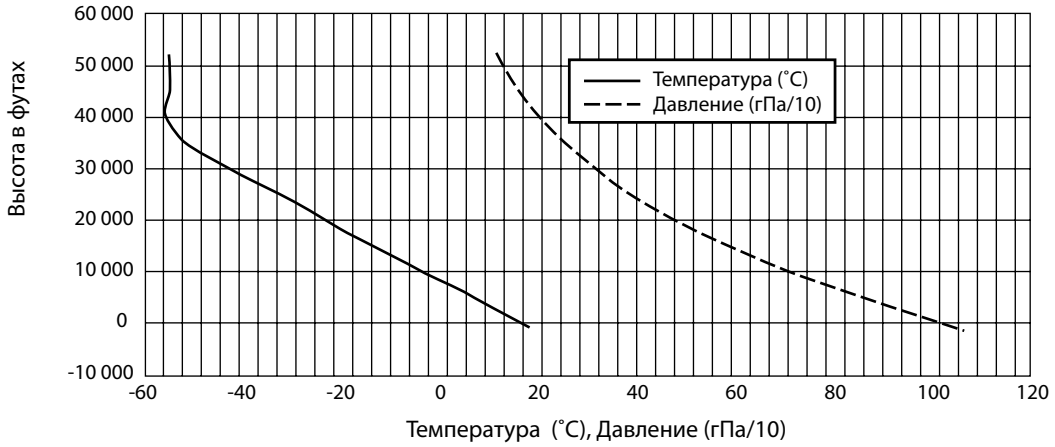


Рис. 3.3. Международная стандартная атмосфера ИКАО

В связи с тем, что обеспечение безопасного эшелонирования воздушных судов имеет крайне важное значение, погрешности измерений корректируются в максимально возможной степени процессором воздушных сигналов (ADC). Погрешность измерения статического давления, которая является функцией от места размещения приемника давлений, числа Маха и угла атаки, определяется опытным путем во время летных испытаний. Ошибки определения статического давления определяются по измеренным значениям высот.

Высота полета, закодированная в соответствии с рекомендациями ВМО (1995 г.), передается по системе AMDAR с дискретностью в сто футов, что для крейсерского эшелона полета эквивалентно приблизительно 1,5 гПа. Это составляет примерно 0,1 % от полного диапазона статического давления; при точности приборов, составляющей в лучшем случае порядка 0,05 %, ошибка измерения статического давления на крейсерском эшелоне, полученная при преобразовании барометрической высоты, составляет около 2 гПа. Для высоты на уровне моря разрешение эквивалентно примерно 3,5 гПа, что приводит к погрешности по давлению около 4,0 гПа.

3.2.3 Число Маха

Число Маха (M – отношение истинной воздушной скорости к скорости звука в свободной атмосфере) является важным параметром для полета воздушного судна. В системе AMDAR оно используется для введения поправок в измеренные значения температуры воздуха и воздушной скорости самолета. В сухом воздухе скорость звука пропорциональна квадратному корню из абсолютной (статической) температуры SAT (температуры невозмущенной воздушной массы). Однако поскольку SAT датчиками самолета непосредственно не измеряется, применяется независимый метод определения числа Маха. Уравнение для M имеет вид

$$M^2 = \frac{2}{(\gamma - 1)} \left[\left(\frac{p_s}{p_0} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} - 1 \right] \qquad (3.5)$$

где p_0 – статическое давление (невозмущенного воздушного потока); p_s – полное давление (обе параметра определяются по приемнику полного и статического давлений); a – показатель адиабаты – соотношение удельных теплоемкостей сухого воздуха (C_p и C_v). Более подробная информация о методе определения числа Маха содержится в работах по аэродинамике самолета, например, в работах Abbott and von Doenhoff (1959) и Dommasch, Sherby and Connolly (1958).

3.2.3.1 Точность определения

Точность определения числа Маха практически полностью зависит от точности измерений полного и статического давлений. При обычных условиях эксплуатации (когда приемник полного и статического давлений установлен корректно относительно воздушного потока), погрешность определения числа Маха не превысит 0,2 %.

3.3 ТЕМПЕРАТУРА ВОЗДУХА

3.3.1 Датчик полной температуры потока

Датчик полной температуры TAT размещается в невозмущенном воздушном потоке, и используется для измерения температуры воздуха на уровне полета самолета. Точное измерение температуры воздуха является основой для определения значений других метеорологических параметров. Например, значение температуры воздуха используется при расчете истинной воздушной скорости и, таким образом, влияет на расчет компонентов скорости ветра. Измеренная датчиком температура корректируется процессором ADC по рассчитываемому значению числа Маха.

Большинство самолетов, совершающих коммерческие рейсы, оборудовано датчиками TAT – контактными термометрами. На Рис. 3.4 показана общая схема такого датчика. Чувствительный элемент датчика представляет собой платиновый термометр сопротивления. Защитный кожух предохраняет чувствительный элемент от попадания облачных капель, однако имеются сообщения о том, что в кучевых облаках на чувствительном элементе появляются капли воды (Lawsonand, Cooper, 1990).

Значение температуры (T_1), измеряемое таким датчиком, близко к теоретическому значению SAT, которое было бы получено при идеальном адиабатическом сжатии потока в датчике. Соотношение между TAT (T_0, в кельвинах), которая представляет собой температуру в невозмущенном потоке, и измеренной температурой T_1 определяется выражением:

$$T_0 = \frac{T_1}{\left(1 + \lambda \frac{(\gamma - 1)}{2} M^2 \right)} \qquad (3.6)$$

где λ – коэффициент восстановления датчика температуры, который учитывает эффект вязкости в потоке и эффект частичного торможения воздушного потока в датчике. При измерениях T_1

учитывается тепловыделение, необходимое для предотвращения в случае необходимости обледенения датчика.

Для большинства датчиков, используемых на самолетах, совершающих коммерческие рейсы, $\lambda = 0{,}97$, а при условии, что $\gamma = 1{,}4$, SAT принимает значение

$$T_0 = T_1/(1 + 0{,}194\mathrm{M}^2)\ \mathrm{K} \qquad (3.7)$$

При обычной крейсерской скорости реактивного самолета, совершающего коммерческие рейсы, число Маха составляет около 0,8, следовательно

$$T_0 = T_1/1{,}124 \qquad (3.8)$$

а именно, если $T_0 = 223$ K (–50 °C), то:

$$T_1 = 251\ \mathrm{K}\ (-22\ ^\circ\mathrm{C}) \qquad (3.9)$$

Таким образом, обычно поправка в измеренную температуру на крейсерской высоте составляет около –28 °C.

3.3.1.1 Погрешности измерения

SAT является функцией от измеренной датчиком температуры и числа Маха. Как показано выше, число Маха является производным от значений полного давления и статического давления, независимые измерения которых осуществляются с помощью приемника полного и статического давлений Таким образом, погрешность измерения температуры зависит от трех параметров в дополнение к погрешностям калибровки, аэродинамической поправке, связанной с местом установки датчика и других факторов (например, работы антиобледенительного устройства датчика).

Погрешность измерения температуры (ΔT_0) связана с погрешностью определения числа Маха (ΔM) с помощью соотношения

$$\Delta T_0 = 0{,}388 M T_1 (1 + 0.194 M^2)^{-2} \Delta M \qquad (3.10)$$

С учетом перечисленных факторов погрешность расчета SAT составляет около 0,4 °C при числе Маха

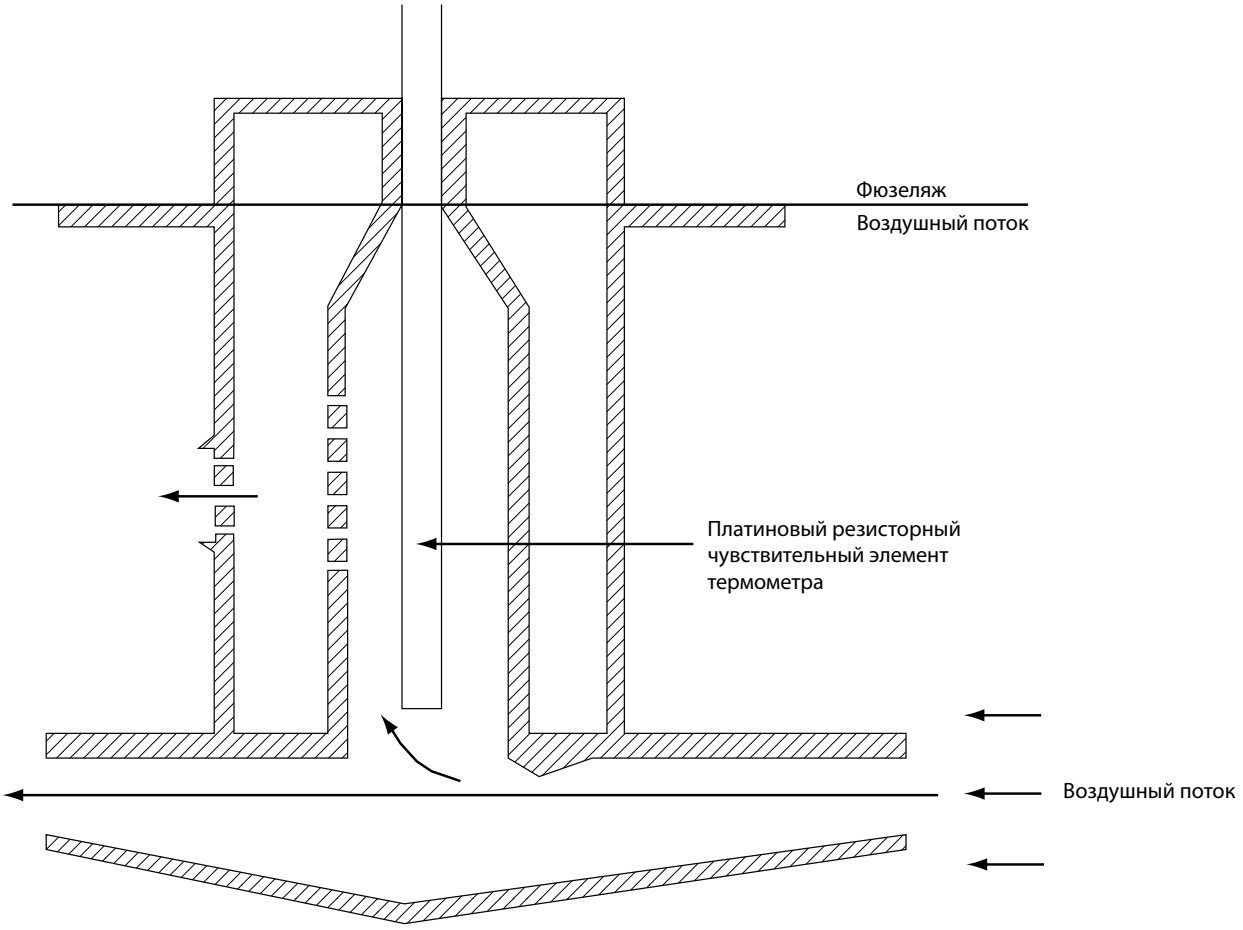


Рис. 3.4. Самолетный датчик температуры

равном 0,8, а малых числах Маха эта погрешность уменьшается до 0,3 °С. Данные о температуре, как правило, хранятся в виде 11-разрядных двоичных слов, таким образом, погрешность за счет дискретности для каждого оцифрованного значения температуры увеличивается примерно на 0,25 °С. При смачивании в облаках датчик охлаждается за счет испарения, возникающая при этом дополнительная погрешность может достигать 3 . При очень низкой воздушной скорости (например, во время взлета) скорость просасывания воздуха через датчик может оказаться недостаточной для поддержания точности измерения. Для устранения этого эффекта на некоторых воздушных судах применяются датчики с инжекций воздуха. Однако измерения на малых скоростях находятся вне зоны работы системы AMDAR АМДАР и ими можно пренебречь при рассмотрении погрешности. Несмотря на сложность применяемой процедуры обработки данных, оперативный опыт работы с системой сбора и ретрансляции данных с воздушного судна через спутник ASDAR (WMO, 1992) дает основание считать, что погрешность измерения средней температуры на крейсерской высоте полета коммерческих самолетов составляет около 1 °С.

3.4 НАПРАВЛЕНИЕ И СКОРОСТЬ ВЕТРА

Измерение трехмерного вектора ветра с самолета представляет собой достаточно сложную процедуру. Используя данные самолетной навигационной системы (чаще всего это радионавигационная система), системы измерения воздушной скорости (обычно это приемник полного и статического давления в сочетании с процессором ADC) и данные датчика температуры можно с высокой степенью точности определить скорость (V_g) воздушного судна относительно Земли (путевую скорость) и скорость потока воздуха (V_a) по отношению к самолету (истинную воздушную скорость). Вектор ветра (V), соответственно, рассчитывается по формуле:

$$V = V_g - V_a \qquad (3.11)$$

Необходимо точно измерять векторы V_g и V_a, поскольку, как правило, скорость горизонтального ветра (~30 м/с) невелика по сравнению с путевой скоростью и истинной воздушной скоростью (200 – 300/с). Ранние версии системы ASDAR зависели от данных, полученных с инерциальных навигационных систем, для обеспечения дальней навигации, и в которых использовалась информация об углах тангажа, рыскания, атаки и крена для определения полного вектора ветра. Однако в связи с появлением новых систем навигации, оснащенных многочисленными датчиками, эти данные более не являются необходимыми для получения качественной оперативной метеорологической информации (Метеорологическая служба Канады, 2003 г.). Если для определения вектора ветра используется инерциальная навигационная система, то необходимо измерять измеряться не только углы тангажа, крена и рысканья самолета, но также угол атаки набегающего на самолет воздушного потока (Рис. 3.5). При установившемся горизонтальном полете углы тангажа, рыскания и атаки невелики и их изменениями можно пренебречь. Погрешности, вызванные маневрированием самолета, могут быть существенными, причем наиболее сильно изменяется угол крена. В связи с этим данные о скорости и направлении ветра обычно забраковываются в тех случаях, когда угол крена превышает некоторое пороговое значение (обычно от 3 до 5 градусов).

Для большинства метеорологических нужд необходимо измерять только горизонтальные компоненты скорости ветра. Поэтому для их расчета в качестве входных данных требуются только воздушная скорость, угол курса и путевая скорость. Угол курса и путевая скорость определяются с помощью навигационной системы. Истинная воздушная скорость рассчитывается по числу Маха и истинной (статической) температуре в потоке SAT. Компоненты горизонтального ветра (u,v) определяются по формулам:

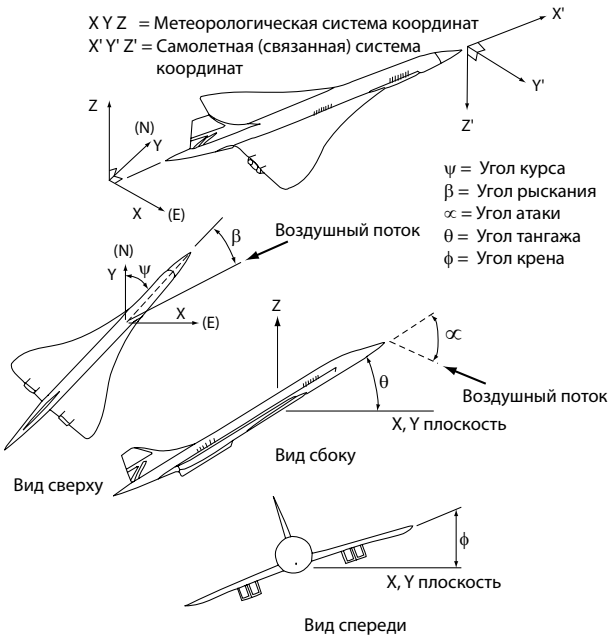


Рис. 3.5. Системы координат и схема отсчета углов положения самолета

$$u = -/V_a/\sin\varphi + u_g \quad (3.12)$$

$$v = -/V_a/\cos\varphi + v_g \quad (3.13)$$

где $/V_a/$ – модуль истинной воздушной скорости, f – угол курса по отношению к направлению на истинный север, а u_g и v_g – компоненты путевой скорости.

3.4.1 Погрешности измерений

Истинная воздушная скорость является функцией числа Маха и SAT:

$$V_a\,(\mathrm{kt}) = 38{,}867\mathrm{MT}_0 1/2 \quad (3.14)$$

$$V_a\,(\mathrm{kt}) = 38{,}867T_1^{1/2}M/(1 + 0{,}194\mathrm{M}^2)^{1/2} \quad (3.15)$$

Так как число Маха и SAT определяются с погрешностями, то суммарная погрешность воздушной скорости рассчитывается по формуле:

$$\Delta V_a = 38{,}867T_0^{1/2}\,\Delta M + 19{,}433MT_0^{-1/2}\Delta T_0 \quad (3.16)$$

где ΔV_a – погрешность измерения ветра, ΔM – погрешность определения числа Маха, а ΔT_0 – погрешность измерения температуры. Отметим, что из уравнения (3.10) следует, что погрешность определения числа Маха также вносит вклад в погрешность измерения температуры.

Если нет грубой ошибки в измерениях температуры, то наибольший вклад в погрешность измерения воздушной скорости будет вносить погрешность определения числа Маха. Например, при погрешности числа Маха, составляющей 0,2 % на крейсерском эшелоне, погрешность измерения воздушной скорости составит около 1 узла (0,5 м/с). Таким образом, если считать погрешности навигационной системы нулевыми, то погрешность определения вектора ветра, которая также зависит от угла между направлением ветра на эшелоне полета и курсом самолета составит до 0,5 м/с. При этом следует отметить, что грубая ошибка в измерении температуры приведет к грубой погрешности в определении скорости ветра.

При оценках погрешности определения скорости ветра ошибки измерения истинной воздушной скорости суммируются с погрешностями инерциальной навигационной системы. Оценки погрешности определения скорости ветра проводятся при предположении о полете самолета с нулевыми углами атаки, крена, тангажа и рыскания, а также об идеально точной установке инерциальной платформы. При значительных отклонениях углов тангажа/крена от нулевых погрешность вектора ветра, пропорциональная истинной воздушной скорости, может быть существенно большей. Например, при воздушной скорости, составляющей 150 узлов, с углом тангажа 5° и углом крена 10° погрешность определения вектора ветра будет составлять около 2 узлов (1 м/с), независимо от величины вектора истинного ветра. При воздушной скорости, составляющей 300 узлов, погрешность определения скорости ветра увеличивается до 4 узлов (2 м/с), т.е. удваивается. При низких значениях скорости ветра ошибка в определении вектора скорости ветра может привести к значительной погрешности в расчете направления ветра. Таким образом, принимая во внимание наиболее реальные условия полета, суммируя все вышеперечисленные источники погрешности и учитывая, что скорость ветра является вектором, можно предположить, что типовая погрешность определения скорости ветра составит около 4 – 6 узлов (2 – 3 м/с). Такие оценки соответствуют имеющемуся оперативному опыту измерений (см., например, Nash, 1994).

3.5 ТУРБУЛЕНТНОСТЬ

Турбулентность, в особенности турбулентность ясного неба (при отсутствии облачности), представляет собой важное и потенциально опасное явление для авиации. Хотя маршруты обычных коммерческих полетов составляются так, чтобы избежать турбулентности, тем не менее, самолеты неизбежно сталкиваются с неожиданной болтанкой; при этом отклонения от нормального горизонтального полета могут измеряться с помощью приборов, которые установлены на борту самолетов.

3.5.1 Оценка интенсивности турбулентности по вертикально перегрузке самолета

Вертикальная перегрузка самолета (перпендикулярная горизонтальной плоскости самолета, от которой ведется отсчет) измеряется в инерциальной системе отсчета. Данные о перегрузке самолета выражаются в единицах ускорения свободного падения и могут быть подразделены так, как это показано в приведенной ниже таблице. Однако интенсивность турбулентности, влияющей на полет самолета, зависит, главным образом, от воздушной скорости, массы самолета, высоты и характера самой турбулентности. В связи с этим передаваемые с борта самолета сведения о турбулентности, рассчитанные по пику перегрузки в соответствии с приблизительными соотношениями, приведенными в представленной ниже таблице, имеют ограничения по использованию, поскольку зависят от типа самолета, так как влияние отдельного порыва ветра на самолет будет различными для разных самолетов.

Масштаб турбулентности, определяемый по пику перегрузки

Уровень турбулентности	*Пик перегрузки*[a]
Отсутствует	Менее 0,15 g
Легкая	От 0,15 g до, но не включая 0,5 g
Умеренная	От 0,5 g до 1,0 g
Сильная	Более 1,0 g

[a] Измеренные перегрузки самолета, представляют собой приращение перегрузки по отношению к ускорению свободного падения (1,0 g) и могут быть как положительными, так и отрицательными

3.5.1.1 Погрешности измерения

Существуют два основных источника погрешности датчиков перегрузки самолета, а именно погрешность определения нулевого значения перегрузки и погрешность калибровки прибора. Для большинства самолетов начальной точкой отсчета перегрузки (нуля перегрузки) номинально является +1,0 g, но это значение может изменяться в пределах 3 %. Эта погрешность может быть практически устранена за счет коррекции датчика, выполняемой при стоянке самолета на земле, в результате чего остаточная погрешность (в том числе погрешность измерения) будет составлять около 3 % от измерения (Sherman, 1985).

3.5.2 Эффективная скорость порыва ветра

Другой характеристикой турбулентности является рассчитываемая эффективная скорость порыва ветра (DEVG), определяемая как мгновенная скорость вертикального порыва ветра, которая в проекции на направление среднего горизонтального ветра создает наблюдаемую перегрузку самолета. Результат воздействия порыва ветра на самолет зависит от его массы и некоторых других характеристик, но они учитываются при расчетах, поэтому эффективная скорость порыва ветра не зависит от типа самолета. Эффективная скорость вертикального порыва ветра рассчитывается по следующей формуле (Sherman, 1985):

$$U_{de} = \frac{Am\Delta n}{V_c} \qquad (3.17)$$

где U_{de} – рассчитанная эффективная скорость порыва ветра; Δn – модуль пика приращения перегрузки самолета от 1 g в единицах g; m – общая масса самолета; V_c – индикаторная воздушная скорость в момент пика ускорения; A – параметр, который зависит от типа самолета и в незначительной степени от его массы, высоты полета и числа Маха.

3.5.2.1 Погрешности измерений

Оценка погрешностей по каждому из параметров, определяющих величину U_{de}, дала следующие результаты. При установившемся горизонтальном полете эти погрешности, как правило, составляют не более 3 % для каждого параметра, но в экстремальных условиях могут привести к суммарной погрешности до 10 – 12 %. Исходя из предположения о случайном распределении ошибок, можно показать, что обычно погрешность составляет около 3 или 4 % от текущего значения U_{de}. Необходимо отметить, что однако маневры самолета могут привести к значительным значениям вертикальной перегрузки самолета, и наоборот – активные методы управления самолетом уменьшают перегрузку, вызванную порывами ветра, что приводит к существенному занижению значений вертикальной скорости порывов ветра.

3.5.3 Скорость диссипации турбулентной энергии

Cornman, Morse and Cunning (1995) предложили метод, который описывает спектр вертикальных турбулентных порывов ветра на уровне полета самолета по одному параметру – $\varepsilon^{1/3}$, скорости диссипации турбулентной энергии (EDR). Исходный спектр энергии порыва на представляющих интерес частотах аппроксимируется с помощью формулы:

$$\varphi_i(\omega) = 0{,}7V^{2/3}\,\varepsilon^{2/3}\,\omega^{-5/3} \qquad (3.18)$$

где V – истинная воздушная скорость, а ω – частота турбулентных пульсаций по самолетным данным. $\varepsilon^{1/3}$ соотносится с общей мощностью в порыве спектра (σ^2) , разделенной на параметр масштаба длины ($L^{1/3}$), таким образом, что

$$\varepsilon^{1/3} = [\sigma^2/L^{1/3}]^{\,1/2}\ (\mathrm{m}^{2/3}\,\mathrm{s}^{-1}) \qquad (3.19)$$

Учитывая передаточную функцию реакции перегрузки самолета на вертикальные порывы ветра $H(\omega)$, значение энергетического спектра вертикального порыва $\varphi_0(\omega)$ определяется по формуле:

$$\varphi_0(\omega) = |H(\omega)|^2 0{,}7V^{2/3}\varepsilon^{2/3}\,\omega^{-5/3} \qquad (3.20)$$

а значение энергии вертикальной перегрузки $\sigma_0^2\ (\omega)$ определяется по формуле:

$$\sigma_0^2(\omega) = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \varphi_0(\omega)\,d\omega \qquad (3.21)$$

$$\sigma_0^2(\omega) = 0{,}7V^{2/3}\,\varepsilon^{2/3}\int |H(\omega)|^2\omega\omega^{5/3}\,d\omega\omega \qquad (3.22)$$

Пределы интегрирования ω_1 и ω_2 выбраны таким образом, чтобы удалить усиление спектра в области

низких частот, возникающее вследствие применения вычислительной процедуры, а также для удаления низких частот из-за маневров самолета, различных помех и реакции самолета на высокочастотный шум, не моделируемый в $H(\omega)$. Обозначая приведенный выше интеграл как $I(\omega_1, \omega_2, \omega)$ получаем следующую формулу:

$$\varepsilon^{2/3}(\omega) = \sigma_0^2\ (\omega)/0{,}7V^{2/3}\, I(\omega_1, \omega_2, \omega) \quad (3.23)$$

Интеграл от передаточной функции, определяемый для каждого конкретного самолета, изменяется относительно медленно в течение полета за счет изменения веса самолета и условий полета. Поскольку EDR и энергия перегрузки будут изменяться со временем, по мере того как самолет будет попадать в различные условия турбулентности, и учитывая, что для заданного интервала времени T, σ_0^2 (ω) = σ_0^2 (t), можно записать:

$$\varepsilon^{2/3}(T) = \sigma_0^2\ (T)/0{,}7V^{2/3}\, I(\omega_1, \omega_2, T) \quad (3.24)$$

где T – время измерения для каждой оценки EDR.

На практике значения вертикальных перегрузок проходят через полосовой фильтр для обеспечения их соответствия интегралу от передаточной функции, а σ_0^2 оценивается по стандартному отклонению при использовании 10-ти секундных реализаций отфильтрованных значений. Диапазон полосы пропускания в настоящее время установлен в пределах от 0,1 до 0,8 Гц. Интеграл от передаточной функции самолета оценивается по целому ряду условий полета и указывается в справочных таблицах, что упрощает и сокращает требования, предъявляемые к бортовым вычислениям. При передаче по каналу связи «воздух – земля» эти данные могут быть сведены к срединному и пиковому значению в течение интервалов дискретных измерений. Пиковое значение, которое обычно и выбирается, является 90-процентильным значением для интервала дискретных измерений.

3.5.3.1 Погрешности измерений

В методе определения скорости диссипации турбулентной энергии EDR (так же как и в методе расчета эффективной скорости вертикального порыва ветра DEVG) потенциально заложено большое число источников ошибок. Анализ погрешности показывает, что при расчете DEVG погрешность составит порядка 5 – 10 %. Другая проблема расчетов DEVG и EDR возникает в связи с необходимостью выбора интервалов для дискретных измерений и времени усреднения. Анализ реализаций (временных рядов данных) вертикальной перегрузки самолета показывает высокую изменчивость статистических свойств на коротких интервалах дискретных измерений. Наблюдаемые вариации воздушной скорости для отдельного самолета, а также различия между скоростями различных типов самолетов приводит к изменению интервалов между дискретными измерениями, а также к изменению граничной длины волн при фильтрации данных.

3.5.3.2 Соотношения между EDR и DEVG

Проведенные подробные полевые сопоставления величин EDR и DEVG (Stickland, 1998) показали высокую корреляцию между пиковыми значениями EDR и DEVG для одних и тех же зон турбулентности. Этот результат достаточно очевиден, поскольку EDR прямо пропорциональна стандартному отклонению вертикальной перегрузки на выбранном интервале проведения измерений. Таким образом, при нормальном распределении, экстремальное значение EDR будет тесно коррелировать с пиковым значением вертикального порыва (пропорционального пиковому значению вертикальной перегрузки). Однако очевидно, что это соотношение не может быть применено к единичному событию, выходящему за пределы данного распределения, а фильтр с граничной частой 0,8 Гц, наложенный на EDR, сглаживает резкие скачки, соответствующие отдельным порывам ветра.

3.6 ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ВЛАЖНОСТЬ

Несмотря на то, что на научно-исследовательских самолетах используются различные датчики для измерения относительной влажности (или связанной с ней переменной) и в настоящее время продолжают разрабатываться измерители влажности с использованием различных технологий (основанных на емкостных датчиках, датчиках с охлаждаемым зеркалом и диодных лазерах), до сих пор нет доступного самолетного измерителя влажности. Предполагается, что создаваемый в настоящее время в Соединенных Штатах Америки измеритель, основанный на использовании диодного лазера/твердотельного детектора (май 1998 г.; Fleming, 2000; 2003) будет измерять содержание водяного пара в воздухе (отношения смеси для водяного пара WVMR) с разрешением в несколько частей на миллион по объему. Этот метод основан на поглощении узкополосного электромагнитного излучения водяным паром. Интенсивность излучения на детекторе связана с испускаемым излучением согласно закону Бера, при этом

$$I = I_0^{\ -kxp/p_0} \quad (3.25)$$

где I – принимаемый сигнал; I_0 – передаваемый сигнал; k – коэффициент поглощения; x – длина пути излучения в рабочем объеме; p – концентрация водяного пара в рабочем объеме; p_0 – концентрация водяного пара при стандартной температуре и стандартном давлении. Поскольку I_0, k, x and p_0 являются известными свойствами измерителя, концентрация водяного пара в рабочем объеме измеряется и легко преобразуется в величины WVMR.

За счет сокращения длины пути излучения в рабочем объеме оказалось возможным целиком разместить датчик влажности в корпусе стандартного самолетного датчика температуры. В связи с тем, что величина WVMR сохраняется при адиабатическом сжатии в датчике, измеренное значение может быть использовано непосредственно для передачи без учета данных о SAT. Такое представление удобно для использование в численных моделях атмосферы, для которых необходимы данные об удельной влажности (которая численно весьма близка к WVMR) в качестве входного параметра. Для численного анализа полей метеорологических параметров часто требуется значение относительной влажности в качестве переменной поля влажности. Эта величина легко вычисляется по значениям WVMR, если известны значения SAT и давления окружающего воздуха.

3.6.1 Погрешности измерения

Заявленная точность данного измерителя влажности составляет приблизительно от 2 до 4 млн$^{-1}$ по объему. Однако для многих метеорологических приложений необходимы другие психометрические параметры, такие как точка росы или относительная влажность. Точность рассчитываемых значений этих переменных зависит не только от погрешности измерения WVMR, но и от точности измерения SAT и, в меньшей степени, точности измерения давления окружающего воздуха. Например, при относительной влажности, составляющей 50 и 90 процентов, погрешность определения относительной влажности будет составлять приблизительно 4 и 6 процентов соответственно, если измерения температуры будет составлять 1 °C.

3.7 ОБЛЕДЕНЕНИЕ

Несколько типов датчиков могут быть детекторами нарастания льда на несущих поверхностях самолета. В настоящее время для этих целей используются два типа датчиков:

(a) тонкопленочный емкостный датчик, размещенный в потоке на специальном аэродинамическом профиле;

b) механический датчик (преобразователь вибраций), выставленный в воздушных поток на несущей поверхности самолета.

3.7.1 Погрешности измерения

Выходным сигналом обоих датчиков является сигнал «наличие/отсутствие льда», и погрешность в этом случае будет определяться количеством ложных сигналов срабатывания датчика. В настоящее время нет данных о количестве ложных сигналов срабатывания этих датчиков.

3.8 ДЕЙСТВУЮЩИЕ ОПЕРАТИВНЫЕ СИСТЕМЫ

В настоящее время существует целый ряд широко используемых оперативных систем типа AMDAR, включая систему ASDAR, и, кроме того, увеличивается число высокочастотных систем измерения, использующих системы связи воздушных судов для передачи метеорологических сообщений (ACARS). Все они передают данные как в режиме набора высоты/снижения, так и в режиме работы на крейсерском эшелоне.

3.8.1 Ретрансляция данных с самолета на спутник

Ретрансляция метеорологических данных с самолета на спутник была задумана как система наблюдений для первого глобального эксперимента Программы исследований глобальных атмосферных процессов после успешной разработки прототипа, который был внедрен консорциумом стран – членов ВМО в оперативную деятельность. В системе ASDAR (ВМО, 1992) используется отдельный процессор, который извлекает первичные данные из штатных систем самолета, рассчитывает необходимые метеорологические параметры, преобразует их в соответствующий формат и передает метеорологическое закодированное сообщение через Международную систему сбора данных метеорологических геосинхронных спутников. Хотя эта программа была официально завершена в декабре 2003 г., данные с этой системы все еще передаются небольшим количеством самолетов.

3.8.2 Система сбора и передачи метеорологических данных ACARS

Эта система является вариантом системы AMDAR, основанной на системе передачи данных ACARS. Система сбора и передачи метеорологических данных, используемая в Северной Америке (Taylor,

Landot and Ligler, 1990), была разработана компанией Aeronautical Radio Inc. по контракту с Федеральным управлением гражданской авиации Соединенных Штатов Америки. Эта система принимает метеорологические сводки с самолетов, осуществляющих коммерческие рейсы, которые передаются на землю через систему ACARS в различных для разных компаний форматах, и преобразует эти сводки в общепринятый формат для последующей передачи в национальные центры прогноза состояния окружающей среды в Вашингтон, Округ Колумбия, США.

3.9 БУДУЩИЕ СИСТЕМЫ AMDAR

В настоящее время разрабатывается ряд систем, аналогичных системе AMDAR, которые позволят расширить глобальный охват измерениями и увеличить количество наблюдений в пограничном слое и в нижней тропосфере. Акцент делается на использовании небольших региональных самолетов и самолетов авиации общего назначения с помощью установки на них либо стандартных систем AMDAR, либо специальных датчиков и коммуникационных систем. Эти самолеты осуществляют полеты из многочисленных малых аэропортов, которые обычно не входят в зону охвата дальнемагистральных самолетов, передающих сводки AMDAR.

3.9.1 Система автоматического управления полетами ИКАО

Разработка глобальных систем аэронавигации определяется с развитием систем связи. Таким образом, будущая аэронавигационная система связана с разработкой системы автоматического управления полетами самолетов, которая в свою очередь связана с глобальной спутниковой самолетной системой связи. Глобальная система самолетной связи имеет тенденцию трансформироваться в открытую сеть в рамках проекта по авиационной сети телесвязи (Wells and others, 1990). Эта сеть свяжет системы VHS и SATCOM в единую открытую связную сеть.

Для оптимальной по погодным условиям прокладки маршрутов рейсов коммерческих самолетов, и, в особенности, для обеспечения безопасности полетов, сведения к минимуму потребления топлива и нагрузки, приводящей к усталости фюзеляжа, а также для обеспечения комфортных условий для пассажиров требуется большая точность авиационных прогнозов. Таким образом, в автоматические сводки о местоположении самолета для управления воздушным движением могут быт включены и метеорологические сводки. Данные, которые должны включаться в эти сводки, — это в основном те же данные, что и в существующих в настоящее время системах AMDAR, в том числе и данные о турбулентности и влажности воздуха.

3.9.2 Другие системы аналогичные AMDAR

Новая система, разрабатываемая в Соединенных Штатах Америки, которая называется системой передачи тропосферных метеорологических данных с самолетов (AirDat, 2003), основана на специально разработанном датчике и системе связи, устанавливаемой на бортах региональных самолетов и малых самолетов общего назначения, осуществляющих полеты на высотах от 10000 до 25000 футов. Эти самолеты выполняют ближнемагистральные и региональные полеты с большим количеством подъемов и спусков, чем большие реактивные транспортные самолеты.

Для обеспечения расширения охвата района измерения системой AMDAR в Канаде разрабатываются аналогичные системы, использующие, как правило, небольшие самолеты, осуществляющие полеты в арктических регионах.

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Всемирная Метеорологическая Организация, 1995 г.: Наставление по кодам. Том I.1, ВМО-№. 306, Женева.

Международная организация гражданской авиации, 1964 г.: Руководство по стандартной атмосфере ИКАО. Второе издание, Doc. 7488, Монреаль.

Abbott, I.H. and A.E. von Doenhoff, 1959: *Theory of Wing Sections*. Dover Publications, Inc., Mineola, New York, 693 pp.

AirDat, 2003: *TAMDAR – Tropospheric Airborne Meteorological Data Reporting Sensor and System Overview; AirDat Infrastructure and Global Capabilities*. Information document, AirDat LLC, Evergreen, Colorado.

Cornman, L.B., C.S. Morse and G. Cunning, 1995: Real-time estimation of atmospheric turbulence severity from in situ aircraft measurements. *Journal of Aircraft*, Volume 32, Number 1, pp. 171–177.

Dommasch, D.O., S.S. Sherby and T.F. Connolly, 1958: *Airplane Aerodynamics*. New York, Pitman, 560 pp.

Fleming, R.J., 2000: Water vapor measurements from commercial aircraft: Progress and plans. *Preprints*. Fourth Symposium on Integrated Observing Systems, Long Beach, CA, American Meteorological Society, pp. 30–33.

Fleming, R.J., 2003: The WVSS-II and the UCAR air sampler: Purpose, design, status (personal communication). University Corporation for Atmospheric Research, Boulder, Colorado.

Holland, G. J., T. McGeer, and H. Youngren, 1992: Autonomous aerosondes for economical atmospheric soundings anywhere on the globe. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 73, pp. 1987–1998.

Lawson, R.P. and W.A. Cooper, 1990: Performance of some airborne thermometers in clouds. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 7, pp. 480–494.

May, R.D., 1998: Open-path, near-infrared tuneable diode laser spectrometer for atmospheric measurements of H_2O. *Journal of Geophysical Research,* 103, pp. 19161–19172.

Meteorological Service of Canada, 2003: *The Effect of Pitch and Roll Attitude on the Calculation of Wind.* A report by G. Bruce, Aeromechanical Services Ltd., 1118-1c, Rev. 1.0.

Nash, J., 1994: Upper wind observing systems used for meteorological operations. *Annales Geophysicae,* Volume 12, pp. 691–710.

Rodi, A.R. and P.A. Spyers-Duran, 1972: Analysis of time response of airborne temperature sensors. *Journal of Applied Meteorology*, Volume 11, pp. 554–556.

Sherman, D.J., 1985: *The Australian Implementation of AMDAR/ACARS and the Use of Derived Equivalent Gust Velocity as a Turbulence Indicator*. Structures Report No. 418, Department of Defence, Defence Science and Technology Organisation, Aeronautical Research Laboratories, Melbourne, Victoria.

Stickland, J.J., 1998: *An Assessment of Two Algorithms for Automatic Measurement and Reporting of Turbulence from Commercial Public Transport Aircraft*. A report to the ICAO METLINK Study Group. Observations and Engineering Branch, Bureau of Meteorology, Melbourne.

Taylor, D.L., D. Landot and G.T. Ligler, 1990: Automated meteorological reports. *Proceedings of the Aeronautical Telecommunications Symposium on Data Link Integration*, Annapolis, Maryland, May 1990, pp. 141–144.

Wells, V. E. and others, 1990: Migration of ACARS to the Aeronautical Telecommunication Network. *Proceedings of the Aeronautical Telecommnications Symposium on Data Link Integration*, Annapolis, Maryland, May 1990, pp. 209–216.

World Meteorological Organization, 1992: Development of the aircraft to satellite data relay (ASDAR) system (D.J. Painting). *Papers Presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation (TECO-92)*, Instruments and Observing Methods Report No. 49, WMO/TD-No. 462, Geneva.

World Meteorological Organization, 2003: *Aircraft Meteorological Data Relay (AMDAR) Reference Manual*, WMO-No. 958, Geneva.

ГЛАВА 4

МОРСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ

4.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Морские наблюдения в самом широком смысле этого понятия охватывают любые метеорологические и связанные с ними наблюдения за окружающей средой на границе между атмосферой и морской поверхностью, ниже поверхности моря и в атмосфере над поверхностью моря (аэрологические измерения). Подробные официальные требования к наблюдениям с морских станций приводятся в публикации ВМО (2003). Рекомендации относительно требований и процедур содержатся в публикации ВМО (2001).

В настоящей главе рассматриваются наблюдения на границе между воздушной средой и морской поверхностью, которые включают обычные приземные измерения также над поверхностью суши и рассмотренные в этом контексте в других главах. В настоящей главе также рассматриваются некоторые подповерхностные измерения, имеющие важное значение для физики моря и физической океанографии. Аэрологические измерения проводятся методами, которые в основном являются одинаковыми для измерений над поверхностью моря и над поверхностью суши; в настоящей главе они не будут рассматриваться.

Измерения и наблюдения за волнением не описываются где-либо еще в настоящем Руководстве. Визуальные методы обсуждаются в разделе 4.2.12. Методы автоматизированных наблюдений рассматриваются в разделе 4.3, хотя эти методы применяются на других типах платформ.

Наблюдения могут проводиться с использованием стационарных или подвижных платформ, в точке или дистанционно, с использованием наземных и спутниковых методов. Измерения в точке в основном представляют собой наблюдения в одном пункте, который предполагается репрезентативным для окружающего морского района, как это делается в синоптической метеорологии. Методы дистанционного зондирования обеспечивают охват большого района или объемное представление, что особенно подходит для наблюдений за морским льдом.

Измерения в точке

Эти измерения или наблюдения проводятся с самых разных платформ. Они включают суда, нанятые странами-членами ВМО для участия в схеме судов, добровольно проводящих наблюдения (СДН), океанские метеорологические станции, неавтоматические или автоматические плавучие маяки, заякоренные буи, дрейфующие буи, вышки, нефтяные и газовые платформы и буровые установки, островные автоматические метеорологические станции (АМС) и установленные на судах системы АМС. Типом платформы обычно определяется диапазон измеряемых и сообщаемых элементов. Таким образом, суда, задействованные в схеме СДН, используя как инструментальные, так и ручные методы наблюдения, сообщают данные по всему спектру наблюдений, необходимых для синоптической метеорологии. Данные этих наблюдений чаще всего компилируются и передаются на берег в коде FM 13 SHIP или нетрадиционном формате, а затем распространяются на международном уровне в соответствующем коде ВМО (например, FM 94 BUFR с 2012 г.). В отличие от этого большинство дрейфующих буев сообщают только до трех параметров, т.е. местоположение, атмосферное давление на поверхности моря и температура поверхности моря.

По рекомендации СКОММ была создана сеть региональных центров морских приборов (РЦМП) ВМО-МОК[1] для содействия стандартизации данных наблюдений, метаданных, обработанной продукции наблюдений, а также для повышения уровня стандартов для приборов и методов наблюдений. Эти РЦМП обеспечивают возможности для: (i) калибровки и технического обслуживания морских приборов и мониторинга работы приборов; (ii) оказания помощи во взаимных сравнениях приборов; (iii) подготовки кадров. Их круг обязанностей и местоположения приводятся в приложении 4.A.

Дистанционные измерения

Морские измерения могут производиться дистанционно с наземной и космической систем. В настоящее время имеются наземные системы дистанционного зондирования для измерения или наблюдения осадков (метеорологический радиолокатор), ветра у поверхности земли (доплеровский радиолокатор), поверхностных течений в океанах, приземного ветра и состояния моря (микроволновый радиолокатор для коротких расстояний и высокочастотный

[1] Рекомендовано Совместной технической комиссией ВМО/МОК по океанографии и морской метеорологии на ее третьей сессии, состоявшейся в 2009 г.

радиолокатор для больших расстояний, например для зондирования «за горизонт»). Эти методы описаны в главе 9 части II. Кроме того, методы дистанционного обнаружения и определения местоположения молний, описанные в главе 7 части II, применимы к морской среде.

Дистанционное зондирование из космоса используется для измерения многих поверхностных морских переменных. По мере развития технологии дистанционное зондирование с космических платформ во все большей мере обеспечивает получение данных о состоянии моря, ветре у морской поверхности и ее температуре по всем океанам мира. Следует, однако, отметить, что измерения в точке являются важными для валидации и калибровки этих спутниковых данных. Системы дистанционного зондирования из космоса описываются в главе 8 части II.

4.2 НАБЛЮДЕНИЯ С СУДОВ

В этом разделе содержатся подробные руководящие указания и рекомендации по проведению измерений и наблюдений на судах. Еще одним источником является публикация ВМО (1991*a*). В главе 6 публикации ВМО (2001) приводятся подробности о наблюдениях за морской поверхностью, которые должны осуществляться в рамках схемы СДН ВМО. Сведения об исследованиях качества наблюдений с судов содержатся в публикациях ВМО (1991b; 1999), Kent и др. (2003), Taylor и др. (2003) и Kent и Berry (2005). В публикации Bradley и Fairall (2007) анализируется эффективная практика наблюдений исследовательского сообщества.

4.2.1 Наблюдаемые элементы

Суда, выполняющие метеорологические наблюдения, должны быть, как правило, оборудованы для наблюдений за следующими элементами:
Все суда:
(a) местоположение судна;
(b) курс и скорость судна;
(c) атмосферное давление;
(d) температура воздуха;
(e) влажность (точка росы);
(f) скорость и направление ветра.

Суда, выполняющие неавтоматизированные наблюдения, должны, как правило, представлять информацию о вышеуказанных элементах, а также о следующем (визуально оцененные наблюдения или измерения при помощи приборов с последующей неавтоматизированной регистрацией):
(g) погода в срок наблюдения и прошедшая погоды и метеорологические явления;[2]
(h) облака (количество, тип и высота основания);
(i) видимость[24];
(j) осадки[24];
(k) температура поверхности моря;
(l) океанские волны[24] и зыбь[24] – высота, период и направление;
(m) морской лед[24] и/или обледенение[24] судна, в случае необходимости.

Что касается порядка наблюдений за этими элементами, то, как правило, инструментальные наблюдения, требующие освещения ночью, должны в идеале выполняться после неинструментальных наблюдений, с тем чтобы не ухудшать адаптацию глаз наблюдателя к темноте.

В случае неавтоматизированных наблюдений наблюдения за элементами, иными нежели атмосферное давление, должны выполняться в пределах 10 минут до стандартного времени синоптических наблюдений, в то время как атмосферное давление должно измеряться в точное время или как можно ближе к стандартному времени.

4.2.2 Необходимое оборудование

Для использования на судах пригодны следующие приборы:
(a) прецизионный, циферблатный или электронный цифровой барометр-анероид;
(b) гигрометр или психрометр;
(c) барограф, предпочтительно с открытой шкалой (желательно, но не обязательно), или цифровой барометр, который обеспечивает прослеживание барометрической тенденции;
(d) термометр для измерения температуры морской воды и подходящий сосуд для взятия пробы морской воды или постоянно погруженный датчик или датчик в корпусе судна с дистанционным указателем.

Поощряется использование анемометров с подходящей установкой как альтернатива визуальной оценки силы ветра, при том условии, что такие приборы регулярно проверяются для обеспечения их постоянного нахождения в пределах калибровки. Дождемеры редко предусматриваются для использования на проводящих наблюдения судах.

Приборы, используемые на судах, должны соответствовать требованиям, изложенным или рекомендуемым в других главах настоящего Руководства, кроме модификаций, описанных в нижеследующих

[2] Эти элементы часто оцениваются визуально.

разделах этой главы. Поставляемые на суда приборы должны проходить регулярные испытания и проверки, организуемые соответствующими метеорологическими службами.

4.2.3 Сроки наблюдений

Наблюдения за поверхностью на борту судов выполняются, как правило, следующим образом:

(a) синоптические наблюдения с проводящих наблюдения судов с неавтоматизированным представлением данных должны проводиться в основные стандартные сроки: 0000, 0600, 1200 и 1800 МСВ. При необходимости проведения дополнительных наблюдений их следует выполнять в один или несколько промежуточных стандартных сроков: 0300, 0900, 1500 и 2100 МСВ;

(b) почасовые наблюдения следует проводить, когда используется автоматизированная система и сообщение в бинарном формате (используя исходные данные в ручном режиме, судовые наблюдатели могут дополнительно обеспечить полные синоптические наблюдения в синоптические сроки, включая дополнительные визуальные элементы);

(c) в тех случаях, когда на борту судов возникают оперативные трудности, делающие практически невозможным проведение синоптического наблюдения в основной стандартный срок, фактическое время наблюдения должно быть как можно более близким к основным стандартным срокам;

(d) наблюдения следует проводить чаще, чем в стандартные сроки, в случае угрозы или преобладания штормовых условий;

(e) в тех случаях, когда наблюдаются внезапные и опасные метеорологические явления, наблюдения следует проводить немедленно с целью передачи данных, невзирая на стандартные сроки наблюдений (т.е. в пределах 300 морских миль названной тропической системы);

(f) морские наблюдения являются столь же ценными в прибрежных зонах, что и в открытом море, и наблюдения следует продолжать во время всего плавания.

4.2.4 Автоматизация наблюдений на судах и передачи данных

4.2.4.1 Автоматизация судовых наблюдений

АМС или полуавтоматизированные системы, установленные на борту судов, все более широко используются как для проведения наблюдений, так и для передачи данных. Применяются следующие два основных режима работы:

(a) данные наблюдения, которые производятся вручную, как правило, вносятся в электронный журнал компьютера, необходимым образом кодируются и форматируются до начала передачи автоматически или вручную;

(b) наблюдения производятся автоматически с использованием стандартных методов автоматической метеорологической станции, как это описано в главе 1 части II. Данные о местоположении, курсе и скорости судна получают из его навигационной системы (например гирокомпас) или рассчитываются независимым образом с использованием спутниковой навигационной системы, как правило Глобальной системы определения местоположения (ГСОМ). Передача данных таких наблюдений может осуществляться либо в чисто автоматическом режиме, либо вручную, в зависимости от имеющихся средств связи;

(c) наблюдения – это комбинация автоматизированных и ручных наблюдений, а именно к данным автоматизированных наблюдений добавляются данные визуальных наблюдений, введенных наблюдателем перед началом передачи данных (т.е. добавление данных о видимости, метеорологических кодах, количествах, типах и высотах облаков, высотах, периодах и направлениях волн, параметрах льда, а также скорости и направления ветра при проведении измерений без использования анемометра).

4.2.4.2 Передача данных судовых наблюдений

Широко распространенным является сейчас использование спутниковых систем связи для распространения данных судовых наблюдений. Подробности приводятся в разделе 6.6 публикации ВМО (2001). Существуют четыре следующих метода:

(a) Международная система сбора данных через метеорологические геостационарные спутники (ГОЕС, МЕТЕОСАТ, МТСАТ). Эта система, финансируемая главным образом метеорологическими агентствами, обеспечивает полностью автоматическую передачу данных один раз в час в заранее определенные промежутки времени. Передача данных осуществляется в одну сторону, и количество ошибок может быть значительным. Она обычно используется в сочетании с некоторые системами АМС, установленными на судах и на заякоренных буях;

(b) коммерческие спутниковые системы, действующие через систему ИНМАРСАТ-С, которая находится на большинстве океанских судов, согласно требованиям Конвенции СОЛАС. Данные метеорологических наблюдений как правило направляются на сухопутную земную станцию

(СЗС) с использованием специального кода доступа (СКД) 41 или регионального варианта СКД41, хотя для отправки данных АМС в сжатой форме используется также система сообщения данных ИНМАРСАТ. ИНМАРСАТ используется большинством неавтоматизированных станций;

(c) коммерческие спутниковые системы, такие как Iridium Short Burst Data, использующие сообщения в двоичном формате для снижения расходов и повышения своевременности данных;

(d) система Аргос: эта система спроектирована главным образом для привязки и передачи данных и ограничена количеством и орбитальными характеристиками полярно-орбитальных спутников, несущих полезную нагрузку Аргос. Система Аргос использовалась как для передачи, так и для обработки данных судовых наблюдений в ГСТ (ВМО, 1995a), однако при использовании этой системы могут быть задержки в несколько часов, а расходы являются значительными. Она, как правило, используется для небольших автономных судовых систем АМС и для дрейфующих буев.

В целях снижения коммуникационных издержек некоторые НМС пользуются методами компрессии данных для уменьшения объема данных, которые передаются с судна на берег при каждом наблюдении. Эта услуга обычно предоставляется по специальной договоренности между НМС и провайдером коммуникационного обслуживания.

4.2.5 Ветер

Наблюдения за скоростью и направлением ветра могут выполняться либо посредством визуальных оценок, либо с помощью анемометров или анемографов. Данные измеренных параметров ветра являются более предпочтительными по сравнению с визуальными оценками.

На оснащенных приборами судах данные наблюдений следует усреднять за 10-минутные интервалы времени. Если наблюдения выполняются на движущемся судне, необходимо проводить различие между относительным и истинным ветром; для всех метеорологических целей должны сообщаться параметры истинного ветра (хотя для судов, проводящих климатические наблюдения в схеме СДН, сообщаются также данные о кажущемся ветре). При вычислении параметров истинного ветра по результатам наблюдений за относительным ветром и с учетом скорости и курса судна можно использовать простую векторную диаграмму или таблицу (Bowditch, 2002). На практике это векторное преобразование часто является источником ошибок в сообщаемых данных о ветрах. Программное обеспечение электронного судового журнала, например TurboWin, будет обычно рассчитывать параметры истинного ветра в автоматическом режиме.

АМС рассчитывают параметры истинного ветра, используя данные измерений относительного ветра и данные о курсе и скорости судна. Эти последние данные желательно получать при помощи магнитного компаса и информации о скорости судна. Их также можно получить на основе данных о направлении движения судна, полученных из приемника ГСОМ, однако в таком случае не учитывается дрейф.

Особенно важным для наблюдений за ветром является регистрация судовых метаданных (тип наблюдения за ветром, тип и размер судна, позиция анемометра и высота). Метаданные используются, в частности, для правильного толкования данных и повышения согласованности данных (например поправка на смещение), и они обеспечивают прослеживаемость соответствия стандартам.

4.2.5.1 Визуальные наблюдения

Визуальные наблюдения основаны на оценке состояния внешнего вида поверхности моря. Скорость ветра получают по шкале Бофорта (см. таблицу). Направление ветра определяют, наблюдая за ориентацией гребней ветровых волн (т. е. волн, возникающих в результате воздействия ветра, а не зыби) или направлением полос пены, которая движется по направлению ветра. Характеристики величин шкалы Бофорта относятся к условиям в открытом море. Практика показывает, что оценки значений направления ветра, получаемые визуальными методами, имеют хорошее качество.

Высота волны не всегда является надежным критерием, поскольку зависит не только от скорости ветра, но также и от области разгона и продолжительности воздействия ветра, глубины мелководья и наличия бегущей по морю зыби. Поэтому шкала Бофорта учитывает взаимосвязь между состоянием моря и скоростью ветра. Однако при оценке скоростей ветра должны приниматься во внимание и другие факторы, влияющие на эту взаимосвязь. Такими факторами являются запаздывание изменения состояния поверхности моря по сравнению с усилением ветра, сглаживание или ослабление воздействия ветра на морскую поверхность при сильном дожде и влияние сильных поверхностных течений (например, приливных) на видимое состояние поверхности моря. Критерии, принимаемые для открытого моря, становятся менее надежными на мелководье или вблизи берега из-за приливных течений и ограничений, вызываемых сушей. В таких районах или когда поверхность моря становится плохо видимой (например ночью), сила относительного ветра по шкале Бофорта может оцениваться по звуковым явлениям, вызываемым ветром,

по судовым предметам, таким, как флаги, и по дыму из трубы. В последнем случае также может оцениваться направление относительного ветра, например, при наблюдении за дымом из трубы. По этим оценкам может быть рассчитана скорость и направление истинного ветра (Метеорологическое бюро Соединенного Королевства). Если нет никаких иных средств для оценки направления ветра, полезным инструментом может быть движение облачности на низкой высоте.

4.2.5.2 Инструментальные измерения

Если приборы для измерения ветра устанавливаются на судах, то данное оборудование должно обеспечивать измерение как скорости, так и направления ветра, а также быть способным сводить к минимуму влияние качки (правильно сконструированные чашечные анемометры и флюгеры с демпферами способны гасить воздействия килевой и бортовой качки до такой степени, что они становятся незначительными).

Метаданные должны предоставляться для указания используемого приборного обеспечения, того, каким образом оно установлено на борту судна (где именно на судне и на какой высоте), а также для сообщения подробных сведений о типе судна, поскольку на измерения параметров ветра влияет воздушный поток над структурой судна (Yelland и др., 2001).

В большинстве случаев трудно обеспечить правильную установку судовых приборов для измерения

Балл по шкале Бофорта	*Описательный термин*	*Эквивалентная скорость ветра*		*Спецификации для наблюдений*
		м/с	*узлы*	*С борта судна (в открытом море)*
0	Штиль	0–0,2	<1	Море как зеркало
1	Тихий ветер	0,3–1,5	1–3	Образуется рябь, напоминающая чешую, но без пенистых гребней
2	Легкий ветер	1,6–3,3	4–6	Небольшие слабые волны, еще короткие, но более выраженные; гребни гладкие и без разрыва
3	Слабый ветер	3,4–5,4	7–10	Крупные слабые волны; гребни начинают разрываться; гладкая пена; возможно, разбросанные белые барашки
4	Умеренный ветер	5,5–7,9	11–16	Небольшие волны, становящиеся более длинными; довольно частые белые барашки
5	Свежий ветер	8,0–10,7	17–21	Умеренные волны, принимающие более выраженную продолговатую форму; образуется много белых барашков (иногда появляются некоторые брызги)
6	Сильный ветер	10,8–13,8	22–27	Начинают образовываться крупные волны; повсюду более распространены гребни с белой пеной (вероятно, некоторые брызги)
7	Крепкий ветер	13,9–17,1	28–33	Море вздымается, и белая пена от разрывающихся волн начинает вытягиваться в полосы вдоль направления ветра
8	Очень крепкий ветер	17,2–20,7	34–40	Умеренно высокие волны большей длины; кромки гребней начинают разрываться на брызги; пена вытягивается в четко выраженные полосы вдоль направления ветра
9	Шторм	20,8–24,4	41–47	Высокие волны; плотные полосы пены вдоль направления ветра; гребни волн начинают опрокидываться, падать и переворачиваться; брызги могут влиять на видимость
10	Сильный шторм	24,5–28,4	48–55	Очень высокие волны с длинными свешивающимися гребнями; появляющаяся в результате пена (большими пятнами) вытягивается в полные белые полосы вдоль направления ветра; в целом поверхность моря принимает белый вид; «падение» моря становится тяжелым и напоминает удары; видимость ухудшается
11	Жестокий шторм	28,5–32,6	56–63	Исключительно высокие волны (небольшие и средние суда могут иногда теряться из виду за волнами); море полностью покрыто длинными белыми клочьями пены, располагающимися вдоль направления ветра; повсюду кромки гребней волн выдуваются в пену; видимость ухудшается
12	Ураган	32,7 и более	64 и более	Воздух наполнен пеной и брызгами; море полностью белое от брызг; видимость очень серьезно ухудшается

параметров ветра (Taylor и др., 2003; Yelland, Moat и Taylor, 2001, Moat и др., 2006). Местные воздействия, вызываемые надстройкой, мачтой и рангоутом, должны быть сведены к минимуму, насколько это возможно, посредством выдвижения прибора вперед и на максимальную высоту, насколько это практически возможно. Если прибор крепится на рее, то предпочтительно применять автономные датчики для измерения скорости и направления ветра, поскольку таким образом достигается более равномерное распределение их веса на рее, и приборы могут быть установлены дальше от борта. Независимо от того, крепится ли прибор на рее или на кронштейне, установленном на фок-мачте, каждый приборный блок должен монтироваться на расстоянии от мачты, составляющем не менее 10 размеров ее диаметра. Если это практически невозможно, то хорошим способом является крепление двух приборов по одному с каждой стороны фок-мачты, с тем чтобы всегда использовать тот прибор, установка которого является более открытой. Верхушка фок-мачты, если таковая имеется, обычно считается самым лучшим местом для размещения анемометра.

Морская среда является агрессивной, и поэтому чашечные или пропеллерные анемометры требуют регулярного технического обслуживания и калибровки, с тем чтобы выдавать надежные данные о ветре. Ультразвуковые анемометры не имеют никаких движущихся частей, требуют меньшего технического обслуживания, и поэтому они все чаще используются на судах.

Иногда в море применяются различные виды переносных анемометров (часто для содействия швартовке судна). Их главный недостаток состоит в том, что им трудно найти репрезентативное место для их установки, и поэтому проводимые с их помощью измерения дают большой разброс. Только наблюдатель, который понимает природу воздушного потока над судном при различных условиях, будет способен выбрать наилучшее место для проведения таких наблюдений и таким образом достичь удовлетворительных результатов. Этот метод может быть полезен, если визуальные оценки силы ветра затруднены или невозможны, например при слабых ветрах ночью.

4.2.6 Атмосферное давление, тенденция давления и характеристика тенденции давления

4.2.6.1 Методы наблюдений

Давление может измеряться либо при помощи прецизионного барометра-анероида, циферблатного барометра-анероида, либо электронного цифрового барометра.

При проведении неавтоматических наблюдений характеристику и значение тенденции давления за последние 3 часа обычно получают по морскому барографу, предпочтительно имеющим шкалу с крупными делениями с ценой 1 гПа. Однако все более часто используются цифровые барометры с жидкокристаллическим дисплеем тенденции давления.

В случае АМС характеристика и значение барической тенденции за последние 3 часа рассчитываются по значениям давления за последние 4 часа (Н, Н-1, Н-2, Н-3).

4.2.6.2 Приборы

Все барометры должны соответствовать общим требованиям, изложенным в главе 3 части I, и должны поставляться с паспортом, содержащим поправки (если таковые имеются), которые должны применяться к показаниям каждого отдельного прибора. Барометры должны иметь шкалу, которая дает возможность отсчитывать показания с точностью до 0,1 гПа. Требования к погрешности оперативных измерений и эксплуатационным характеристикам прибора изложены в части I, глава 1, приложение 1.B. Требуемая погрешность измерений менее 0,1 гПа (после приведения к уровню моря: < 0,2 гПа). Достижимая погрешность измерения никогда не должна быть больше 0,3 гПа. Морские барографы должны иметь встроенное демпферное устройство, например масляную ванную, в которой находится анероидная коробочка или успокоитель, соединенный с рычажным механизмом, для предохранения от больших скачков на ленте в результате быстрых колебаний давления, вызываемых порывистым ветром и движением судна. Как барометр, так и барограф, должны также сообщаться с атмосферой посредством датчика статического давления, с тем чтобы показания можно было снимать более точно и на них не сказывались воздействия закрытых мостиков или ветра внутри помещения. Если это невозможно, необходимо дать инструкции для обеспечения того, чтобы двери на крыле мостика открывались перед проведением наблюдения. Это особенно важно на новых судах с герметизированными жилыми модулями или на судах, которые перевозят опасные грузы и на которых рулевая рубка может быть герметически закрыта.

Как правило, большинство национальных метеорологических служб (но не все) устанавливают свои прецизионные анероиды и электронные барометры на давление «на уровне станции», и поэтому данные наблюдений необходимо корректировать с учетом высоты барометра, с тем чтобы получить выходные данные о давлении на уровне моря. Эта поправка к высоте рассчитывается автоматически программным

обеспечением электронного судового журнала, таким как Turbowin. Циферблатные барометры-анероиды обычно устанавливаются таким образом, чтобы показывать давление на уровне моря.

4.2.6.3 Установка и эксплуатация

Цифровые барометры-анероиды и барографы

Барометры-анероиды и барографы должны устанавливаться амортизирующем материале в таком положении, чтобы они как можно меньше зависели от сотрясения, вибрации или движения судна. Наилучшие результаты обычно получаются при размещении приборов как можно ближе к центру надводной части судна. Барографы следует устанавливать так, чтобы пишущий рычаг прибора был ориентирован поперек судна (для уменьшения риска его соскальзывания с ленты).

4.2.6.4 Поправки

Следует предусмотреть внесение следующих поправок:

(i) ошибка (смещение) прибора;
(ii) приведение к уровню моря;
(iii) поправка на температуру (если это применимо и имеются соответствующие таблицы).

Барометры должны быть должным образом компенсированы на температуру; в противном случае приборы следует снабдить таблицей температурных поправок и средствами для измерения температуры. Таблица для приведения давления к уровню моря должна предоставляться, когда барометры устанавливаются на высоту станции, хотя это не является обязательным для судов, использующих электронные судовые журналы, которые способны автоматически вносить поправку на высоту (Bowditch, 2002, таблицы 29 – 34).

4.2.6.5 Источники ошибок

Вопрос об ошибках обсуждается в главе 3 части I, однако значительные ошибки, в особенности на судах, могут быть вызваны воздействием ветра на давление в том помещении, в котором находится барометр. По мере возможности эти ошибки должны быть сведены к минимуму путем помещения прибора в кожух, соединенный с датчиком статистического давления, или путем соединения отверстия устройства непосредственно с этим датчиком статистического давления.

На неавтоматизированной станции самые частые (человеческие) ошибки объясняются отсутствием приведения к уровню моря, неправильной оценкой высоты барометра или неумышленной двойной поправкой (поправка, внесенная применительно к барометру, который уже показывает давление на уровне моря).

4.2.6.6 Проверка по эталонным приборам

Аналоговые барометры и барографы следует проверять как только это возможно, но как минимум приблизительно с трехмесячными интервалами, по эталонному барометру портового метеорологического бюро или барометру эталонного сравнения. Однако это не всегда может быть возможно, поскольку движения судна могут характеризоваться высокой динамикой. Отчет о всех сравнениях должен вноситься портовым метеорологом в журнал, а к данному барометру должна прикрепляться этикетка с отметкой о калибровке, в которой указывается дата проверки барометра и та поправка, которая должна вноситься.

Цифровые барометры характеризуются гораздо лучшей стабильностью, а у некоторых моделей периоды калибровки могут составлять целых два года.

4.2.7 Облачность и погода

Визуальные наблюдения за облачностью и погодой следует проводить по тем же правилам, что и правила, которые применимы к наземной станции (см. главы 14 и 15 части I) (см. также приложение 4.B в том, что касается описаний видов осадков). Подробные инструкции и рекомендации по проведению этих наблюдений должны предоставляться портовым метеорологом с учетом того, что большинство наблюдателей в море являются добровольными наблюдателями. Почти любое программное обеспечение электронного судового журнала содержит обширные изображения облаков, с тем чтобы содействовать идентификации типа облачности.

При отсутствии инструментальных пособий должна проводиться оценка высоты основания облака. Для повышения их квалификации в этой области наблюдателей следует поощрять к использованию любой возможности проверить свои оценки по известным высотам, например когда можно наблюдать как облако проходит над гористым побережьем, хотя в подобных обстоятельствах основание облака может быть ниже у горы, нежели в открытом море.

Метод определения высоты основания облака с помощью прожектора мало пригоден на судне из-за короткой базовой линии. Предпочтение необходимо отдавать прибору, который не требует базовой линии, такому как лазерный облакомер (см. главу 15 части I). Его следует устанавливать таким образом, чтобы вахтенный штурман мог использовать его и считывать его показания с навигационного мостика.

4.2.8 Видимость

В море при отсутствии пригодных объектов невозможно оценивать видимость с такой же точностью, как на наземных станциях.

На большом судне оценку видимости, когда она очень низкая, можно получить, используя находящиеся на борту объекты (например фок-мачта), однако следует сознавать, что эти оценки могут содержать ошибку, поскольку судно может воздействовать на воздух. Для бóльших дистанций полезным ориентиром является появление земли при плавании вблизи берегов и если местоположение береговых знаков зафиксировано, то расстояние до них в моменты их появления или исчезновения может быть измерено по карте. Подобным образом можно оценивать видимость в открытом море, когда в поле зрения находятся другие суда и расстояние до них известно, например по радиолокатору. При отсутствии других объектов в качестве основы для оценки может послужить появление горизонта при наблюдениях с различной высоты. Хотя в такие методы могут вкрадываться ошибки из-за анормальной рефракции, они являются все же единственно доступными в определенных обстоятельствах. Ночью полезным для определения видимости является появление навигационных огней.

Когда видимость неодинакова во всех направлениях, ее следует оценивать или измерять в направлении наименьшей видимости, а в бортовом журнале следует делать соответствующую запись (исключая уменьшение видимости из-за выбросов из выхлопной трубы судна).

Информация об измерителях видимости приводится в главе 9 части I. Для использования на судах пригодны только те типы измерителей видимости, которые могут быть использованы при достаточно короткой базисной линии или коротком оптическом расстоянии. Таковыми являются измерители дальности видимости прямого рассеяния. К сожалению, тепловое воздействие самого судна и его выхлопных газов может привести к тому, что измерения будут непрезентативными.

4.2.9 Температура и влажность воздуха

Наблюдения за температурой и влажностью воздуха должны проводиться при помощи гигрометра или психрометра с хорошей вентиляцией.

Приборы должны правильно устанавливаться в потоке воздуха, идущего непосредственно с моря, который не был в контакте с судном и не проходил над ним, и должны быть соответствующим образом защищены от радиации, осадков и брызг.

Допустимым было сочтено применение пращевых или аспирационных психрометров, установленных с наветренной стороны мостика. Если применяются неавтоматические психрометры, то показания термометров должны сниматься как можно скорее после прекращения действия вентиляции. Ручным гигрометрам необходимо несколько минут для адаптации к открытой окружающей среде, если они хранились в помещении перед их использованием.

Удовлетворительной была признана работа емкостных гигрометров даже при работе в среде с высоким содержанием соли. Электронные датчики влажности и температуры следует использовать на АМС, и их можно использовать для ручных наблюдений. Они обеспечивают высокую точность и нуждаются в ежегодной повторной калибровке.

В случае неавтоматизированных наблюдений, если используется жалюзийная будка, то их должно быть две, при этом с каждой стороны судна закрепляется по одной такой будке, с тем чтобы наблюдение можно было также проводить с наветренной стороны. При такой установке термометры в гигрометре могут быть полностью открыты для воздушного потока и не подвергаются воздействию искусственных источников тепла и водяного пара. В качестве альтернативы можно также использовать одну переносную жалюзийную будку, которая вывешивается на любой стороне, которая является подветренной, с тем чтобы обеспечить такую же установку. Батистовый фитиль, вставленный в смоченный термометр в жалюзийной будке, следует менять не реже одного раза в неделю, и более часто в штормовую погоду.

В случае АМС или дистанционного цифрового дисплея не требуется более ручного снятия показаний приборов, находящихся внутри метеорологической будки, и единый экран может быть установлен и выставлен достаточно далеко от конструкции корабля, с тем чтобы обеспечивать репрезентативные измерения относительной влажности и температуры воздуха.

При общем обслуживании психрометров следует выполнять рекомендации, содержащиеся в главе 4 части I. Для влажного термометра следует использовать дистиллированную воду. Если это невозможно, то, как правило, больше подходит конденсат по сравнению с обычной пресной водой. Никогда нельзя использовать воду, загрязненную морской водой (примесями морской воды), поскольку любые примеси соленой воды существенным образом повлияют на температуру по смоченному термометру.

4.2.10 Осадки

Измерение осадков в море рассматривается в публикациях ВМО (1962; 1981). В качестве пособия для судовых наблюдателей в приложении 4.В дается описание осадков в море, которое может быть использовано для подготовки сводок о текущей погоде.

Хотя их обычно не включают в сводки с СДН, данные измерений осадков, сообщаемые кодовой цифрой i_R = 4, могут, тем не менее, включаться в сводки со стационарных станций или судов, оборудованных дождемером, при этом используется соответствующая кодовая цифра i_R.

4.2.10.1 Измерения и приборы

Полное измерение включает определение как количества, так и продолжительности осадков. Количество осадков должно измеряться при помощи осадкомера, приспособленного для использования на борту судна. Отсчеты предпочтительно делать каждые 6 часов. Количество осадков до 10 мм должно фиксироваться с точностью до 0,2 мм. Бóльшие количества должны отсчитываться с точностью до 2 % от общего количества. Требуемая точность измерения должна быть равной точности, установленной для разрешающей способности прибора. Продолжительность осадков должна записываться с округлением единиц измерения до 5 минут.

Получение надежных данных измерений осадков на борту судна является трудной задачей из-за аэродинамического воздействия надстройки судна, влияния бортовой и килевой качки, попадания брызг в осадкомер и изменений местоположения судна. Оборудование, используемое на судах для измерения осадков, должно быть сконструировано и установлено таким образом, чтобы избежать или свести к минимуму, насколько это возможно, влияние первых трех названных факторов.

Измерения осадков на фиксированных станциях (плавучие маяки, океанские корабли погоды, большие буи, вышки и т.д.) являются особенно ценными, потому что исключается влияние движения судна, и данные могут, таким образом, включаться в климатологические анализы без корректировки. Однако должны, тем не менее, учитываться проблемы, связанные с движением платформы и загрязнением солью.

Осадкомер на кардановом подвесе

Наиболее распространенным прибором, используемым для измерения осадков на борту судов, является осадкомер, укрепленный на кардановом подвесе; это устройство не является весьма эффективным, особенно в плохую погоду, поскольку оно не может удерживать осадкомер все время в горизонтальном положении. Эффективное устройство в виде карданового подвеса является очень сложным и дорогостоящим и используется только на специальных судах. Как правило, при использовании осадкомера более лучшим вариантом представляется применение стационарной установки прибора с дистанционной измерительной приставкой.

Конический морской осадкомер

Конический морской осадкомер обычно закрепляется высоко на мачте. Вода отводится по пластмассовой трубке в удаленный приемный сосуд, находящийся на палубе или рулевой рубке. Такое устройство может быть полезным для измерения осадков, если при его установке соблюдены меры предосторожности. Приемное отверстие осадкомера должно быть зафиксировано на плоскости, параллельной палубе судна.

Плювиограф

Для морских условий разработаны три типа плювиографов. В одном из них приемный сосуд закрепляется на открытом месте, а регистрирующее устройство устанавливается внутри помещения. Дождевая вода по трубке поступает из приемного сосуда в камеру, находящуюся рядом с регистрирующим устройством. Перо, связанное с поплавком в камере, записывает изменения уровня воды в камере на ленте вращающегося барабана. Слив осадков из камеры происходит автоматически через сифон, как только их общее количество достигает 20 мм.

В электроконтактном плювиографе связь между приемным сосудом и записывающим устройством осуществляется электрическим способом. Дождевая вода, попавшая в приемник, некоторое время хранится в камере. По достижении отметки, соответствующей 0,5 мм осадков, вода, касаясь стрелки, замыкает электрическую цепь. Затем электродвигатель закрывает входной клапан и одновременно открывает выпускной клапан. После слива воды клапаны возвращаются в исходное положение, а на регистрирующее устройство посылается единичный импульс. Ошибки возникают в том случае, когда движение судна или буя вызывает колебания уровня воды большие, чем если бы он поднимался постепенно. Этот недостаток можно ликвидировать, используя перистальтический насос. Такое приспособление всякий раз, когда происходит электрический контакт, сливает определенное количество воды (а не всю накопленную воду), и таким образом прибор становится менее чувствительным к колебаниям уровня воды; при этом нет необходимости в клапанах.

Наблюдения за осадками при помощи радиолокаторов требуют применения узкого пучка радиолучей и

поверочных осадкомеров, а также наличия специального оборудования для контроля режима работы локатора и выполнения корректирующих операций. Радиолокаторы, установленные на борту судов для других целей, не имеют этих особенностей и обычно не используются для определения количества осадков.

Третьим типом плювиографа является специально сконструированный судовой осадкомер, в котором используется горизонтальный и вертикальный, действующий во всех направлениях, приемный сосуд, с тем чтобы можно было проводить измерения осадков при высоких скоростях ветра (Hasse и др., 1998). Благодаря измерению количества воды, которая собирается вертикальной поверхностью приемного сосуда, можно вносить поправку на воздействие ветра, используя для этого параметры скорости ветра, измеренные одновременно в месте размещения прибора. Интенсивность и количество осадков измеряются и рассчитываются отдельно для верхнего и бокового приемных сосудов, и скорректированные значения осадков получают посредством средневзвешенного значения, зависящего от скорости ветра.

Установка

Устанавливать осадкомер следует так, чтобы сводить к минимуму первые три влияния, упомянутые выше. Наилучшим местом для установки судового осадкомера представляется место, расположенное по возможности дальше впереди судна и выше. Однако в конкретных случаях могут быть найдены и другие места, обеспечивающие в то же время более легкий доступ к приборам.

4.2.10.2 Интенсивность осадков в море

Конечно, плювиограф может использоваться для измерения интенсивности осадков. Были сделаны попытки облегчить визуальную оценку интенсивности осадков посредством установления связи их с видимостью. Установлено, что существует связь между видимостью и интенсивностью слабых или умеренных осадков, выпадающих преимущественно из сплошной облачности. Однако в других условиях, например во время ливневых дождей, никакой устойчивой связи не обнаружено. Даже в первом случае наблюдатели должны понимать, насколько трудно с достаточной степенью точности дать оценку видимости в море, по которой можно было бы удовлетворительно оценить интенсивность осадков.

4.2.11 Температура поверхности моря

Измеряемая температура должна быть такой, чтобы она отражала условия в поверхностном перемешанном слое, лежащем непосредственно под поверхностной пленкой океана.

Температуру поверхности моря следует измерять очень тщательно. Это связано с тем, что она также используется для получения разности с температурой воздуха, которая служит мерой стратификации температуры, влажности и других характеристик приводных воздушных масс. По этим причинам температура морской воды должна отсчитываться с точностью до 0,1 °C.

Для измерений температуры поверхности моря невозможно использовать стандартный прибор из-за большого разнообразия размеров и скоростей судов, а также соображений стоимости, удобства эксплуатации и технического обслуживания.

За температурой поверхности моря можно наблюдать путем:

(a) отбора пробы воды с поверхности моря специально предназначенным для этой цели ведром;
(b) измерения температуры воды в заборниках;
(c) измерения температуры воды электрическим термометром, опускаемым прямо в морскую среду либо укрепленным в корпусе судна (т. е. используя установленный внутри корпуса контактный датчик);
(d) использования инфракрасного радиометра, установленного на судне в направлении поверхности моря.

В течение многих лет в основном используются методы (a) и (b). При исследовании расхождений в температуре, полученной этими двумя методами, было выявлено (ВМО, 1972), что температура воды в заборнике в среднем на 0,3 °C выше температуры, измеренной в пробах, полученных с помощью ведра. В последние годы в связи с увеличением скорости и высоты судов более широко стал использоваться метод (c), который дает наиболее согласованные результаты. Что касается радиометров, то они редко применяются на судах, но могут использоваться на некоторых оффшорных платформах. Из всех этих методов измерение температуры в приемном патрубке заборника является наименее желательным в связи с необходимостью особых предосторожностей для получения хороших результатов.

4.2.11.1 Измерения с помощью морского ведра

Морское ведро опускается за борт судна для взятия пробы морской воды и поднимается обратно на палубу, затем в ведро опускают термометр и измеряют температуру воды. Проба воды должна отбираться с подветренного борта в носовой части судна и на достаточно большом расстоянии от сливных труб судна. Отсчет по термометру надо производить сразу, как только термометр примет температуру

воды, обеспечивая при этом, чтобы на него не падал прямой солнечный свет. Когда ведро не используется, его следует подвешивать в тени для просушки.

Морское ведро должно иметь такую конструкцию, чтобы оно легко наполнялось водой в момент взятия пробы и чтобы обмен теплом вследствие радиации и испарения был минимальным. Соответствующий термометр должен быть малоинерционным и иметь удобную шкалу для отсчета и желательно постоянно закреплен в ведре. Если для отсчетов термометр должен выниматься из ведра, то необходимо, чтобы он имел небольшую теплоемкость и был вставлен в оправу со стаканчиком достаточного объема, чтобы температура воды в нем при вытаскивании термометра из ведра сильно не изменялась в процессе отсчета показаний. Конструкция ведра должна соответствовать цели организации, нанимающей судно для наблюдений.

Предполагается, что данные измерений при помощи хорошо сконструированных ведер (не просто обыкновенные ведра из брезента или иной конструкции) четко согласуются между собой при широком диапазоне условий. Однако они менее удобны в работе, чем приборы, прикрепленные к корпусу судна, и их использование иногда ограничивается погодными условиями или размером и скоростью судна.

4.2.11.2 Термометры в заборнике и в цистерне

Термометр, встраиваемый в водозаборную трубу при постройке судна, обычно не подходит для измерений температуры поверхности моря. Следовательно, организация, нанимающая судно, должна, с позволения соответствующей судовой компании, устанавливать термометр, пригодный для этой цели. Хотя в настоящее время это редко является практическим вариантом, термометр предпочтительнее устанавливать в специальной трубе, обеспечивающей адекватную теплопроводность между резервуаром термометра и водозаборником и, близко к последнему.

В случае установки термометра прямого считывания в тесном месте наблюдатель должен быть предупрежден о возможных ошибках при отсчетах температуры из-за параллакса. Дистанционная система отсчета с дисплеем, установленным где-нибудь в другом месте (например, в машинном отделении или в рубке), позволяет решить эту проблему. Наблюдатель должен также знать, что на судах с большой осадкой или при наличии в поверхностном слое воды существенного температурного градиента температура, измеренная в водозаборном устройстве, обычно значительно отличается от температуры поверхностного слоя моря и будет меняться в зависимости от загрузки судна балластом. И наконец, температура в заборнике, безусловно, не должна измеряться в тех случаях, когда судно не движется, потому что в это время нет циркуляции охлаждающей воды. Следует отметить, что установка модернизированного водозаборника или установка в корпусе контактного датчика температуры поверхности моря (ТПМ) может часто занимать много времени и отличаться сложностью, что нередко вынуждает портовых метеорологов или техников работать в трудных условиях (внутренние отсеки судов, ограниченный доступ и т. д.).

Кингстонная коробка в днище судна является той полостью, где могут располагаться приемные патрубки и где можно производить измерения температуры забортной воды. Это хорошее место для установки датчика дистанционного термометра. К таким устройствам применимы те же ограничения, о которых упоминалось выше.

Хотя большинство находящихся в заборнике термометров будут давать только мгновенные отсчеты показаний температуры, некоторые суда могут быть оборудованы датчиками температуры, которые могут проводить выборочные измерения с заданной частотой и усреднять их за определенный период времени. В таком случае для обеспечения более репрезентативных измерений ТПМ может быть использован модульный алгоритм фильтрации, с тем чтобы исключить экстремальные отсчеты по расчетному усредненному значению.

4.2.11.3 Термометры, укрепляемые на корпусе

Термометры, укрепляемые на корпусе, очень удобны в обращении и дают точные средние значения температуры поверхности моря. Это непременно дистанционные приборы с датчиками, которые либо выведены «через корпус» наружу и имеют непосредственный контакт с водой, либо закреплены внутри судна на корпусе («магнитный тип»), за исключением случая двойного корпуса. Оба типа приборов показывают хорошо согласующиеся результаты, но датчик, выведенный «через корпус», имеет несколько более высокую чувствительность.

Датчики должны устанавливаться впереди всех сливных отверстий на глубине от 1 до 2 м ниже ватерлинии. Когда имеют место значительные изменения осадки судна, может понадобиться установка нескольких датчиков. Это может создать большие трудности при установке приборов и монтаже электропроводки, поэтому такие работы лучше всего выполнять при постройке судна. При последующей установке магнитных датчиков нет необходимости ставить судно в сухой док.

4.2.11.4 Буксируемые термометры

Разработано несколько методов буксировки датчика дистанционного термометра в море в месте, где отбираются пробы воды ведром. Существующие различия касаются способов подводки кабеля на борт судна и приспособлений для установки датчика в море.

Кабель должен выдерживать буксировку датчика и обеспечивать в то же время хорошую электрическую связь, несмотря на сильное натяжение, которое при этом может возникать. В более ранних системах применялся толстый нейлоновый трос, внутри которого находился двужильный высокопрочный телефонный кабель. В других конструкциях используется поливинилхлоридный шланг (типа поливочного садового шланга), внутри которого свободно пропускается двужильный кабель.

Для установки датчика используется небольшое ведро с неплотно набитой прорезиненной щетиной для предохранения от повреждений при ударах и вибрации. Ведро имеет два маленьких отверстия, через которые вода может медленно вытекать, и нет необходимости постоянно его погружать. Требуется около восьми секунд, чтобы ведро опорожнилось, поэтому волновые движения с периодом две-три секунды не оказывают отрицательного воздействия на измеряемые значения температуры.

В другом варианте обходятся без ведра, а для установки и защиты датчика используют шланг. На последних 2–3 м шланга, внутренний диаметр которого 12 мм, делаются отверстия диаметром 8 мм. Конец шланга закрывается, оставляется только небольшое отверстие для стока. Канат определенной длины, прикрепленный к концу шланга, стабилизирует прибор и позволяет ему плавно скользить по поверхности моря, при этом вода, попадающая в шланг, омывает датчик.

Эти приспособления дают показания, которые хорошо согласуются с измерениями, проводимыми с помощью точного морского ведра, и могут легко применяться. Однако в связи с ограниченностью опыта наблюдений в настоящее время нет достаточного количества данных о возможном их обрастании водорослями и т. п. Таким образом, как и при работе с ведром, необходимо будет опускать и поднимать прибор в каждом случае.

4.2.11.5 Радиометры

Любое вещество в зависимости от его температуры излучает тепловую энергию в виде инфракрасного излучения. Количество энергии и длина волны излучения зависят от температуры вещества и его излучательной способности. Таким образом, радиометры, которые реагируют на инфракрасное излучение, могут применяться для измерения температуры вещества. При направлении на поверхность моря радиометр измеряет температуру только самого верхнего слоя воды толщиной примерно 1 мм, так как излучательная способность воды близка к единице. Этот самый верхний слой часто называют поверхностной пленкой океана. В верхнем слое океана толщиной несколько сантиметров могут наблюдаться большие градиенты температуры, при самой низкой температуре вверху, особенно при относительно спокойных условиях.

Радиометры могут быть ручными (направляемыми вперед и вниз), устанавливаться на стреле или кронштейне, вынесенными над водой, или на самолете или спутнике. Радиометрические измерения не дают температуру поверхностного слоя моря в том смысле, как это определено выше, а скорее температуру испаряющей поверхностной пленки океана. Радиометры применяются лишь на немногих судах.

4.2.12 Океанские волны

Основными темами настоящего раздела являются определения и описания поведения волн, а также визуальных методов наблюдения за ними. Автоматизированные методы кратко упомянуты в разделе 4.3, посвященном заякоренным буям, хотя они применяются и для других типов платформ.

4.2.12.1 Определения и описания волнения

Разгон ветра: протяженность обширной водной поверхности, над которой дует ветер, имеющий почти постоянное направление и скорость.

Ветровое волнение или ветровые волны: система волн, наблюдаемых в точке, находящейся в пределах поля ветра, который вызывает волны.

Зыбь: любая система водных волн, которая вышла за пределы района ее образования (либо наблюдаемая после исчезновения вызвавшего волны поля ветра.

Длина волны: горизонтальное расстояние между последовательными гребнями или подошвами волны. Оно равно периоду волны, умноженному на ее скорость.

Высота волны: вертикальное расстояние между подошвой и гребнем волны.

Период волны: время между прохождением двух последовательных гребней волн через фиксированную точку. Оно равно длине волны, деленной на ее скорость.

Скорость волны: расстояние, которое проходит волна за единицу времени. Оно равно длине волны, деленной на ее период.

Наблюдение должно включать измерение или оценку следующих характеристик движения волны на поверхности моря для каждой различимой системы волн, т. е. ветрового волнения и зыби (основных и вторичных волн):

(a) направление (откуда движутся волны) по шкале 01 – 36 (как для направления ветра);
(b) период в секундах;
(c) высота.

В качестве руководства должны использоваться следующие методы наблюдения за характеристиками отдельных волновых систем.

Ветровые океанские волны образуются в больших системах, определяемых полем ветра, вызвавшим волнение, и относительным положением точки, в которой производятся наблюдения. Учитывая различие в определениях ветрового волнения и зыби, наблюдатель должен распознавать узнаваемые системы волн, наблюдая за направлением их перемещения, формой и периодом волн.

На рисунке 4.1 показан график, представляющий собой типичную кривую, полученную с помощью волнографа. Кривая показывает высоту поверхности моря, отсчитываемую от фиксированной точки в функции времени, т. е. отражает вертикальные колебания плавающего на поверхности моря тела, как это видит наблюдатель. На графике дана обычная картина волнения на поверхности моря, возмущенной ветром, в результате чего образуется ветровое волнение.

Волны неизменно перемещаются нерегулярными группами с акватории слабо развитого волнения, при этом расстояние между ними составляет от двух или более длин волн. При ветровом волнении нерегулярность больше, чем при зыби. Кроме того, можно наблюдать, хотя это невозможно отразить на волнограмме, что группы, состоящие из двух или более хорошо выраженных волн, при ветровом волнении перемещаются в направлениях, отличающихся друг от друга на 20 или 30°. В результате интерференции пересекающихся волн гребни ветровых волн довольно короткие. Зыбь характеризуется большей регулярностью. Она перемещается в виде достаточно правильных последовательностей в четко выраженном направлении и, как правило, имеет длинные и гладкие гребни. Типичную невозмущенную зыбь можно наблюдать в тех акваториях, где в течение периода времени от нескольких часов до одного дня и более был слабый ветер или полное безветрие. В большинстве районов моря ветровые волны и зыбь смешиваются.

4.2.12.2 Визуальные наблюдения с торговых судов

Наблюдатель, который пытается наблюдать за характеристиками каждой из распознаваемых волновых систем (ветровых волн и зыби) отдельно, должен иметь в виду тот факт, что более высокие компоненты ветровых волн со сравнительно длинными гребнями и большими периодами похожи на зыбь. Может показаться возможным расчленить скопление волн разной высоты, периода и направлений (образующих вместе систему ветрового волнения) на две разные волновые системы и считать меньшие волны ветровыми, а большие зыбью, однако это может оказаться неправильным.

Различать ветровые волны и зыбь следует, основываясь на одном из нижеследующих критериев:

Направление волн. Если среднее направление всех волн с более или менее аналогичными характеристиками (в частности, высотой и длиной) отличается на 30° или более от среднего направления волн, отличных по внешнему виду (в частности, по высоте и/или длине), тогда следует считать, что эти две группы волн принадлежат к разным системам волн.

Форма и период. Когда типичные волны зыби, характеризующиеся регулярной формой и длинными гребнями, появляются под углом приблизительно до 20° от направления ветра, их следует рассматривать как отдельную волновую систему, если их период по крайней мере на 4 секунды больше, чем период волн большего размера наблюдающегося ветрового волнения.

В целях измерения среднего периода и высоты системы волнения следует рассматривать только характерные волны; это более высокие волны в центре каждой группы хорошо выраженных волн (рисунок 4.1). Низкие и слабо выраженные волны (A) в зоне между группами должны исключаться из волнограммы.

Фактически требуется средний период и средняя высота приблизительно 15 – 20 хорошо выраженные волн из центров групп. Разумеется, эти волны не могут быть последовательными. Менее значительные волнообразные возмущения (B), которые, как ясно видно, образуются под действием ветра на вершинах волн большого размера, также должны исключаться из волнограммы.

Время от времени встречаются волны, которые буквально возвышаются над окружающими волнами (C). Такие волны могут возникать поодиночке или группами из двух или трех волн. Наблюдателю не следует сосредоточиваться только на этих

максимальных волнах; для того чтобы определить средний период и среднюю высоту порядка 15 – 20 волн, ему необходимо учитывать хорошо выраженные волны средней высоты. Следовательно, сообщаемая высота волны будет меньше, чем максимальная высота наблюдаемых волн. В среднем фактическая высота приблизительно каждой десятой волны будет превышать высоту, которую должен сообщить наблюдатель. Обычной практикой является определение высоты характерных волн, измеряемой волнографами в качестве средней высоты одной трети самых высоких волн; следует аппроксимировать высоту волн, которая будет визуально оцениваться наблюдателем.

Наблюдатель должен помнить, что необходимо регистрировать только измерения либо весьма хорошие оценки. Грубые оценки имеют небольшую ценность. Приоритетное значение должно иметь качество наблюдений, а не их количество. Если из трех элементов (направление, период, высота) можно измерить или действительно хорошо оценить только два или даже один, например ночью, их сообщение все же будет ценным.

Эти соображения должны учитываться во всех методах наблюдений, описываемых ниже. Более подробная информация о волнении содержится в публикациях ВМО (1998) и ВМО (2001), раздел 4.4.1.

Направление волнения

Направление, откуда перемещаются волны, легче всего определить, если наблюдатель следит за перемещением гребней, а затем поворачивается на 90° в ту сторону, откуда движутся волны. Таким образом наблюдатель получает направление распространения волн.

Период волны

Это единственный элемент, который можно измерить на борту идущего торгового судна. Если имеется секундомер, то нужен один наблюдатель, либо необходимо иметь двух наблюдателей и часы с секундной стрелкой. Наблюдатель отмечает какой-либо небольшой предмет, плавающий на воде на некотором расстоянии от судна; если таких предметов нет, то, как правило, можно найти ясно видимый клок пены, остающийся заметным в течение нескольких минут, нужных для наблюдений. Секундомер включается в тот момент, когда предмет появляется на гребне волны. По мере продвижения гребня предмет исчезает в ложбине, а затем снова появляется на следующем гребне и т. д. Отмечается время, когда предмет виден на вершине каждого гребня. Наблюдения следует продолжать как можно дольше. Их прекращают тогда, когда предмет вследствие движения судна становится далеким и неразличимым. Очевидно, что продолжительность наблюдений будет наибольшей, если выбрать предмет, находящийся как можно дальше по носу судна, но так чтобы его было четко видно.

Другой метод заключается в наблюдении за двумя и более хорошо выраженными последовательными волнами отдельной группы без остановки секундомера; после прохождения последнего хорошо выраженного гребня группы или перед предполагаемым исчезновением предмета секундомер останавливают, а затем включают вновь при прохождении первого хорошо выраженного гребня новой группы. Наблюдатель подсчитывает общее число периодов волн, пока оно не достигает по крайней мере 15 – 20.

Наблюдения можно также проводить путем отслеживания килевой и бортовой качки носовой части судна. Наблюдатель выбирает точку на самом высоком или самом низком уровне цикла и начинает отсчет времени с нее. Когда она возвращается к той же точке, наблюдатель регистрирует данное время. Посредством повторения этой процедуры несколько раз можно определить надежные данные наблюдения. Этот метод срабатывает также во время ночного наблюдения, когда наблюдатель чувствует подъем и падение ощущениями своего собственного организма.

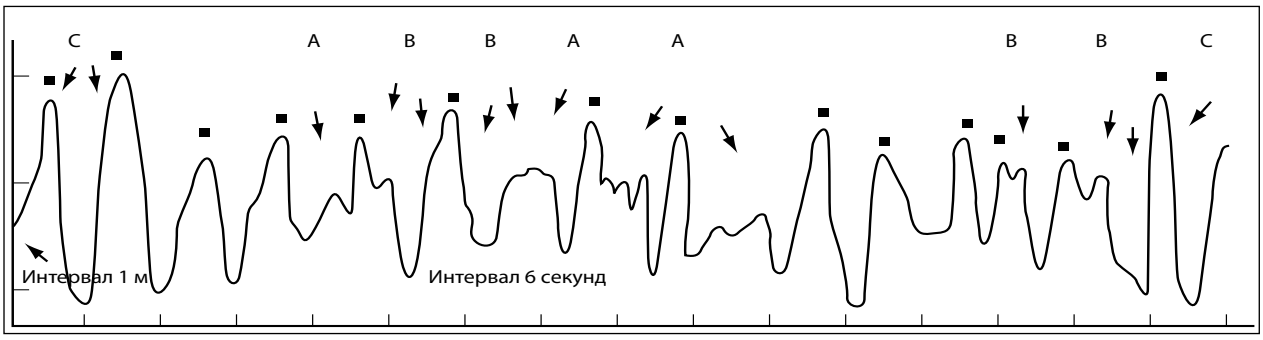


Рис. 4.1. Типичные волны ветрового волнения и зыби, полученные с помощью волнографа

При измерениях периода волн менее 5 секунд и малых скоростях ветра такого рода наблюдение может быть затруднено, но такие волны представляют меньший интерес, чем длиннопериодные волны.

Высота волн

При некотором опыте можно получить весьма надежные оценки. Для оценки высоты волн длиной значительно меньше длины судна наблюдатель должен занять положение на судне как можно ниже, например посередине, где килевая качка минимальна, и на том борту судна, откуда приходят волны. Следует использовать возникающие иногда моменты, когда бортовая качка временно прекращается.

В тех случаях, когда длина волны больше длины судна, вышеизложенный метод не подходит, так как все судно поднимается на волну. В этой ситуации наилучшие результаты получаются тогда, когда наблюдатель перемещается вместе с судном вверх или вниз до тех пор, пока он не окажется на такой высоте, с которой в момент нахождения судна в ложбине при отсутствии крена вершины приближающихся волн будут казаться на одной линии с горизонтом (рисунок 4.2). Тогда высота волны будет равна высоте, на которой находится глаз наблюдателя над уровнем воды (a). В случае бортовой качки необходимо убедиться, что приближающаяся волна находится на одной линии с горизонтом в тот момент, когда судно не имеет крена; в противном случае оценка высоты будет завышена (b).

Несомненно, самый трудный случай, когда длина волны превышает длину судна, а высота волны мала. Лучшая оценка получается, если спуститься как можно ближе к воде, но даже тогда оценка высоты будет лишь приблизительной.

4.2.12.3 Наблюдения с океанских кораблей погоды и других специальных судов

Океанские корабли погоды обычно обеспечиваются соответствующими регистрирующими приборами. Однако при проведении визуальных наблюдений следует придерживаться вышеуказанной процедуры; кроме того, судно должно двигаться носом на волну. Для измерения периода волн с борта можно сбросить какой-нибудь предмет. Для измерения высоты нужно краской нанести отметки на борту в средней части борта судна (с интервалами 0,5 метра).

Длину лучше всего наблюдать, сбросив буй с кормы на такое расстояние, чтобы гребни двух последовательных волн одновременно проходили буй и наблюдателя. Расстояние между ними и есть длина волны.

Скорость можно определить, отмечая время прохождения волны от кормы до буя, делая при этом поправку на скорость судна.

4.2.12.4 Волнение в прибрежных водах

Дополнительными понятиями, связанными с определением состояния поверхности моря в прибрежных зонах, являются:

Бурун: возникает при обрушении волны в результате продвижения ее на очень мелкую воду глубиной порядка удвоенной высоты волны.

Прибой: волны, обрушивающиеся между береговой линией и наиболее удаленной линией бурунов.

Барашки: наблюдаются при частичном обрушении гребней волн, вызванном действием ветра, увеличением крутизны волн при встречном оттоке или приливно-отливном или увеличением крутизны волн из-за набегания на мелководье, недостаточно мелкое, чтобы вызвать буруны.

Нельзя ожидать, что наблюдения за волнением с береговой станции будут репрезентативными для условий в открытом море. Это связано с тем, что на волны влияют глубина, приливы, а также отражение от таких объектов, как крутые скалы или молы. Кроме того, место наблюдения может быть защищено мысами или, с меньшей вероятностью, мелями, при этом и те и другие могут влиять на высоту волн и направление их перемещения. Эти явления подробно описаны в публикации ВМО (1991*b*).

Когда, несмотря на наличие таких трудностей, необходимо провести наблюдения, волны следует выбирать так же, как в открытом море. Если они

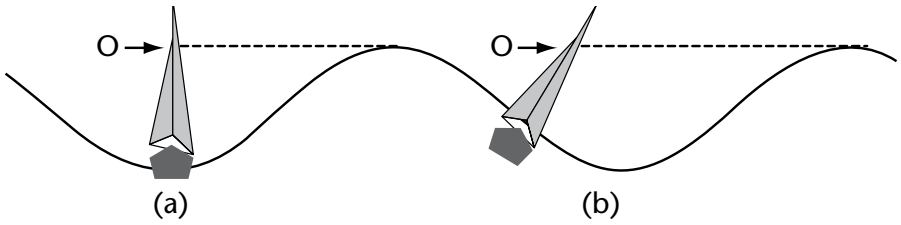


Рис. 4.2. Влияние крена судна на оценку высоты волн

нужны для исследовательских целей, то необходимо указывать точную среднюю глубину в срок наблюдения и сам срок.

4.2.12.5 Терминология для ветровых волн и зыби

Для таких случаев, как передача метеорологической информации и прогнозов для мореплавания, публикаций, лоций и т. п., когда информация не включается в закодированные сообщения, рекомендуется следующая терминология:

Для длины волны зыби:

короткая	0 – 100 м
средняя	100 – 200 м
длинная	более 200 м

Для высоты волны зыби:

низкая	0 – 2 м
средняя	2 – 4 м
большая	более 4 м

Для высоты ветровых волн:

полный штиль (спокойная поверхность)	0 м
штиль (рябь)	0 – 0,1 м
сглаженное волнение (небольшие волны)	0,1 – 0,5 м
слабое волнение	0,5 – 1,25 м
умеренное волнение	1,25 – 2,5 м
сильное волнение	2,5 – 4 м
очень сильное волнение	4 – 6 м
высокое волнение	6 – 9 м
очень высокое волнение	9 – 14 м
исключительно сильное волнение	более 14 м

Во всех случаях точное граничное значение длины или высоты включается в более низкую категорию; так, например, если высота ветровых волн 4 м, то отмечается сильное волнение. Когда состояние морской поверхности такое сложное, что ни один из вышеуказанных описательных терминов не подходит, следует пользоваться термином «нерегулярное волнение».

4.2.13 Лед

В море встречается несколько форм плавающего льда. Самая распространенная форма – это лед, образовавшийся в результате замерзания поверхностного слоя воды, а именно морской лед. Сообщение данных о морском льде рассматривается в публикации ВМО (1970).

Другие формы – это речной лед и лед материкового происхождения. Речной лед встречается в гаванях и эстуариях, где он находится в движении за счет приливных течений и, как правило, лишь временно является помехой для судоходства. Лед материкового происхождения – айсберги – рассматривается отдельно ниже.

Как айсберги, так и морской лед могут представлять опасность для судоходства и всегда влияют на навигацию. Кроме того, морской лед влияет на обычные процессы энергообмена между океаном и атмосферой над ним. Протяженность морского ледяного покрова может существенно различаться в разные годы и в большой степени влиять как на соседние океанские акватории, а также на погоду на больших территориях земного шара. Поэтому распространение льда представляет значительный интерес для метеорологов и океанографов. Хотя широкомасштабные наблюдения за распространением морского льда изменились революционным образом за счет использования изображений со спутников, наблюдения на береговых станций, судах и с самолетов по-прежнему играют важную роль при детальных наблюдениях и привязке спутниковых наблюдений к подлинным данным наземных наблюдений.

Наблюдения за плавучим льдом в настоящее время почти полностью основываются на визуальной оценке. Инструментальные наблюдения выполняются только обычным радиолокатором и новыми методами, такими как пассивные микроволновые датчики и бортовые радиолокаторы бокового обзора. Однако айсберги плохо отражают лучи радиолокаторов и их не всегда можно обнаружить с помощью этой техники.

4.2.13.1 Наблюдения за обледенением

Обледенение может быть чрезвычайно опасно из-за своих последствий для малых судов, в частности для судов водоизмещением менее 1000 тонн. Даже на более крупных судах в результате обледенения антенн может выходить из строя радиоаппаратура и радиолокаторы. Может также ухудшаться видимость с мостика. Возникали проблемы из-за обледенения грузов, находящихся на палубе больших контейнеровозов. Помимо возможного воздействия на остойчивость судна, обледенение может вызывать трудности при разгрузке судна в порту назначения, когда контейнеры и их найтовы накрепко примерзают к палубе. Рыболовецкие суда особенно уязвимы к обледенению. Более подробная информация дается в публикации ВМО (1991*b*); а что касается метеорологических аспектов, то подробности можно найти в публикации ВМО (1974).

В море встречается два основных вида обледенения: вследствие замерзания морской воды и вследствие

замерзания пресной воды. Первое происходит в результате попадания брызг морской воды, возникающих при взаимодействии судна или установки с волнами, а также в результате попадания брызг, сдуваемых с гребней волн, либо по той и другой причинам одновременно. Пресноводное обледенение может быть вызвано замерзающим дождем и/или моросью; и иногда обледенение вызывает мокрый снег при последующем понижении температуры; обледенение также может возникнуть в результате замерзания тумана. И тот, и другой виды обледенения могут иметь место одновременно.

Наиболее важными метеорологическими элементами, влияющими на обледенение в море, являются скорость ветра и температура воздуха. Чем выше скорость ветра относительно судна и чем ниже температура, тем больше скорость нарастания льда. По-видимому, не существует предельной температуры воздуха, ниже которой уменьшается риск обледенения.

В кодовой форме ВМО (ВМО, 1995b), применяемой для передачи по радио метеосводок с судов, находящихся в море, предусмотрено включение сведений об обледенении. Эта информация может даваться либо в коде, либо открытым текстом. В одной пятизначной группе кодовая форма дает возможность передавать сведения о причинах обледенения, толщине и скорости нарастания льда. Сводкам открытым текстом должно предшествовать слово ICING, и особенно ценными являются сводки, содержащие характеристики обледенения, опасные для судов.

4.2.13.2 Формирование и развитие морского льда

Лед толщиной менее 30 см

Первым признаком образования льда является появление маленьких ледяных игл или пластинок в верхнем слое воды толщиной несколько сантиметров. Эти иглы, которые так и называются – ледяные иглы, образуются в больших количествах и придают морской воде маслянистый вид. По мере понижения температуры ледяные иглы срастаются и образуют ледяное сало, которое имеет матовый оттенок. Если на поверхность воды, близкую к замерзанию, но все еще свободную от льда, выпадает снег, то она может покрыться слоем снежуры. Под действием ветра и волн эти формы могут видоизменяться, образуя шугу, и все они классифицируются как начальные виды льда. При дальнейшем выхолаживании в зависимости от его скорости и солености воды образуются ледяная корка (склянка) или нилас, Склянка образуется, когда вода с низкой соленостью замерзает в виде тонкого слоя хрупкого льда, который почти не содержит соли, в то время как при замерзании воды с высоким содержанием соли, особенно если это происходит быстро и при слабом ветре, образуется лед, обладающий эластичностью, – нилас. Этот вид льда в зависимости от толщины подразделяется на темный и светлый нилас; вторая, более развитая форма, достигает максимальной толщины 10 см.

Под действием ветра и волн склянка или нилас могут ломаться, образуя блинчатый лед, который впоследствии смерзается и утолщается, образуя серый и серо-белый лед, достигающий со временем толщины 30 см. Эти виды льда объединяют под общим названием – молодой лед. При штормовой погоде лед может ломаться, образуя мелкобитый лед или ледяные поля разных размеров.

Лед толщиной от 30 см до 2 м

Следующий этап развития льда, известный как однолетний лед, подразделяется на три категории: тонкий, средний и толстый. Тонкий однолетний лед имеет толщину 30 – 70 см, средний – от 70 до 120 см, толстый однолетний лед в полярных районах к концу зимы может достигать толщины приблизительно 2 м.

Старый лед

Толстый однолетний лед, сохранившийся в течение летнего сезона таяния, классифицируется как старый лед. Этот лед подразделяется на двухлетний и многолетний в зависимости от того, сколько летних сезонов пережили ледяные поля. Перед наступлением сезона таяния толщина старого льда обычно колеблется от 1,2 до 3 м и более. К концу летнего сезона таяния толщина старого льда может значительно уменьшаться. Старый лед часто можно распознать по голубоватой поверхности, в то время как однолетний лед имеет зеленоватый оттенок.

Снежный покров

Зимой лед, как правило, покрывается снегом, который изолирует его от воздуха и замедляет скорость его роста. В зависимости от климатических условий высота снежного покрова в разных районах существенно различается. Высота снежного покрова может также сильно меняться на небольших расстояниях в зависимости от ветра и топографии льда.

Разрушение морского льда

Пока сохраняется снежный покров, в окружающее пространство отражается почти 90 % приходящей радиации. Однако с началом лета, когда температура воздуха поднимается выше 0 °C, снег начинает таять и на поверхности образуются пресноводные снежницы. Снежницы поглощают приблизительно 90 %

приходящей радиации и быстро увеличиваются по мере таяния окружающего снега и льда. В конце концов снежницы проникают до нижней поверхности ледяных полей, и образуются так называемые проталины. Такой медленный процесс разрушения характерен для льдов Северного Ледовитого океана и морей, в которых движение ограничено береговой линией или островами. Там же, где лед свободно дрейфует в более теплые воды (например, в Антарктике, в восточной части Гренландского моря и в море Лабрадор), процесс разрушения льда ускоряется за счет волновой эрозии и более высокой температуры воздуха и воды.

Движение морского льда

По своей подвижности морской лед делится на два основных типа. Один тип – это дрейфующий лед, который находится в непрерывном движении под действием ветра и течений, второй – это припай, т. е. лед, прикрепленный к берегу или островам и остающийся неподвижным. Когда сплоченность льда достигает высокой степени, т. е. 0,7 или более, то термин «дрейфующий лед» может заменяться на термин «паковый лед».

Напор ветра на дрейфующий лед заставляет ледяные поля двигаться приблизительно в направлении ветра. Под воздействием отклоняющей силы вращения Земли (силы Кориолиса) в северном полушарии ледяные поля отклоняются приблизительно на 30° вправо от направления приземного ветра. Поскольку приземный ветер сам отклоняется на ту же величину, но в противоположном направлении от геострофического ветра (дующего по изобарам), то направление движения ледяных полей вследствие только ветрового дрейфа можно считать параллельным изобарам.

Скорость ветрового дрейфа льда меняется не только в зависимости от скорости ветра, но также от сплоченности дрейфующего льда и степени его деформации (см. подраздел ниже). Очень разреженный лед (1/10 – 3/10) может более свободно перемещаться под действием ветра, чем сплоченный лед (7/10 – 8/10), когда свободное пространство ограничено. Скорость дрейфа сплоченного льда, вызванного ветром, в среднем составляет 2 % скорости ветра, а скорость дрейфа разреженного льда может быть значительно больше. Поскольку дрейфующий лед находится на плаву, на него воздействуют устойчивые по направлению течения, существующие в верхних слоях океана, независимо от того, являются ли они приливными по своей природе или вызваны другими силами. Зачастую очень трудно определить, чем вызван дрейф – ветром или течением, но когда действуют обе силы, результирующее движение представляет собой векторную сумму того и другого. Преобладающий вклад обычно вносит напор ветра, особенно в оффшорных районах.

Деформация морского льда

Когда лед подвергается давлению, поверхность его деформируется. В результате, если это начальные виды льда или молодой лед, могут возникнуть наслоения, когда ледяное поле надвигается на соседнее; в случае более толстого льда в зависимости от того, какие силы сжатия оказывают влияние, могут возникнуть гряды льда и торосы. В процессе образования торосов и гряд льда, когда куски льда нагромождаются выше общего его уровня, большие массы льда погружаются, чтобы поддерживать тяжесть гряд и торосов. Подводная часть гряд может быть в 3 – 5 раз больше их надводной части, и поэтому такие деформации являются серьезным препятствием для судоходства. Вновь образовавшиеся гряды, как правило, менее опасны для судоходства, чем подвергшиеся атмосферным влияниям старые и монолитные гряды.

4.2.13.3 **Айсберги**

Айсберги представляют собой большие массы плавающего льда, отколовшегося от ледников, в том числе от шельфовых. Глубина подводной части айсберга по сравнению с надводной колеблется в широком диапазоне в зависимости от вида айсбергов. Подводная масса антарктических айсбергов, отколовшихся от находящегося на плаву шельфового льда, как правило, меньше, чем подводная масса айсбергов, отколовшихся от ледников Гренландии. У типичного столообразного антарктического айсберга, самая верхняя часть которого высотой 10 – 20 м состоит из старого снега, над поверхностью видна, как правило, одна часть его массы, а пять частей находятся под водой; у арктического айсберга со значительно меньшим количеством снега, состоящего почти полностью из льда, это соотношение, как правило, составляет 1:8.

Размеры айсбергов уменьшаются тремя путями: откалывание, таяние и волновая эрозия. Когда от него откалывается кусок льда, говорят об обрушении айсберга; это нарушает его равновесие, в результате чего он может поплыть под другим углом или опрокинуться. Характерной чертой айсбергов являются большие подводные выступы, которые трудно заметить. В холодной воде айсберг тает в основном по ватерлинии, в то время как в теплой воде — снизу и часто раскалывается. Особенно опасно приближаться к тающему в теплой воде айсбергу, поскольку он неустойчив, может расколоться или опрокинуться в любой момент. Вокруг быстро разрушающихся айсбергов может находиться много обломков и небольших айсбергов, представляющих особую опасность для судоходства.

Айсберги плохо отражают лучи радиолокаторов и поэтому не всегда могут быть обнаружены с их

помощью. Фрагменты их разрушения (обломки и небольшие айсберги) зачастую еще труднее обнаружить с помощью судового радиолокатора, так как они скрываются за фоновыми помехами, создаваемыми ветровыми волнами и зыбью. Эти мелкие обломки особенно опасны для судов, так как несмотря на низкий профиль, масса их достаточно велика, чтобы повредить судно, которое сталкивается с ними на обычной крейсерской скорости. Некоторые небольшие айсберги из чистого льда почти не видны на поверхности воды, и их крайне трудно обнаружить.

4.2.13.4 Наблюдения за морским льдом и айсбергами

Ключом к хорошим наблюдениям за льдом является хорошее знание номенклатуры льдов и опыт работы. Для моряков лучшим руководством по определению льдов является иллюстрированная публикация ВМО (1970).

На судоходство влияют следующие четыре важные характеристики морского льда:

(a) толщина: стадия развития (т. е. начальные виды льда, молодой лед, однолетний лед или старый лед, а также виды, на которые они подразделяются);
(b) количество: сплоченность (оцениваемая десятыми долями поверхности моря, покрытой льдом);
(c) вид льда, как-то припай или дрейфующий лед, и размер составляющих ледяных полей;
(d) движение: особенно с учетом его влияния на деформацию.

Поскольку айсберги представляют собой опасность для судоходства, особенно ночью или при плохой видимости, важно также сообщать количество айсбергов, находящихся в поле зрения во время наблюдения, особенно в водах, где они наблюдаются редко.

Информация о морском льде может передаваться открытым текстом или с использованием кодов. В ВМО для международного использования приняты два кода для морского льда. Самой простой является группа ICE , прибавляемая к кодовой форме SHIP. Код ICEAN был разработан для использования его специалистами в целях передачи результатов анализа и прогноза морского льда.

Существуют два основных правила наблюдений на судах и береговых станциях:

(a) обеспечивать широкое поле обзора путем производства наблюдений с максимально высокой точки над поверхностью моря (например, с верхней части маяка, с мостика или с марсовой площадки судна);
(b) не пытаться передавать информацию о состоянии морского льда за пределами радиуса, равного более половины расстояния между точкой наблюдения и горизонтом.

ВМО разработала систему обозначений для нанесения на карты фактической или прогнозируемой ледовой обстановки. Эти обозначения предназначены для международного обмена информацией о морских льдах, а также для радиофаксимильной передачи ледовых данных.

4.2.14 Наблюдения за особыми явлениями

При описании водяных смерчей направление вращения следует всегда указывать так, как будто это видится сверху.

4.2.15 Работа флота, добровольно проводящего наблюдения

Важный первый шаг при наборе судов добровольного наблюдения – это получение разрешения судовладельцев и капитана судна. Когда разрешение выдано и судно определено, портовый метеоролог должен сделать следующее:

(a) смонтировать прошедшие калибровку приборы, обеспечив при этом наиболее оптимальную установку;
(b) обеспечить необходимые формуляры или установить программное обеспечение для электронного судового журнала;
(c) провести обучение наблюдателей, связанное с уходом за приборами и их эксплуатацией;
(d) провести учебную подготовку наблюдателей по всем аспектам практики наблюдений;
(e) провести демонстрацию использования программного обеспечения для электронного судового журнала и компиляции данных наблюдений;
(f) зарегистрировать необходимые метаданные судна (в действующем формате ВМО № 47);
(g) провести демонстрацию методов передачи данных наблюдений;
(h) объяснить суть морской прогностической продукции НМС.

После осуществления найма судна портовый метеоролог должен в идеальном варианте постараться посещать его по меньшей мере один раз в три месяца (в зависимости от передвижений судна и ресурсов персонала; если это практически невозможно, можно рассмотреть вопрос о ежегодных посещениях), с тем чтобы проверять точность приборов и возобновить поставку формуляров, документов и т.д. Портовому метеорологу следует воспользоваться этой

возможностью для повышению интереса к метеорологии и объяснения взаимной заинтересованности моряков и метеорологов в получении точной информации о метеорологических наблюдениях.

Для АМС и цифровых датчиков может быть установлен более длительный период проверки сроком в один год.

Полная информация о схеме СДН ВМО приводится в публикации ВМО (2001).

4.2.16 Другие добровольные наблюдения вне рамок схемы судов добровольного наблюдения

В некоторых случаях компания (обычно нефтяная или газовая), эксплуатирующая судно или платформу, проводит наблюдения/измерения для своего собственного пользования и предоставляет их через ГСТ, при этом портовый метеоролог в этом практически не участвует. Монтаж и техническое обслуживание оборудования для передачи метеорологической и океанографической информации, а также обучение работе с ним, обычно осуществляются в соответствии с контрактом. В том случае, если судно/станция не были наняты портовым метеорологом, следует приложить усилия для обеспечения того, чтобы соответствующие метаданные также были доступны через соответствующие каналы ВМО.

4.3 ЗАЯКОРЕННЫЕ БУИ

Заякоренные буи характеризуются широким разнообразием конфигураций (например с точки зрения конструкции заякоривания, типов датчиков, схем выборки, техники подъема, телеметрии и т.д.), обслуживающих целый ряд оперативных и исследовательских применений и дисциплин. Главное внимание в настоящем разделе, в котором не содержится информации о широком спектре возможностей, используемых в современных функционирующих системах, уделяется требованиям к морским метеорологическим измерениям с оперативных метеорологических заякоренных буев. С информацией, касающейся других систем, связанных с требованиями к исследовательским применениям, можно ознакомиться в других публикациях и на веб-сайтах, например:

- тропические заякоренные буи АТЛАС: http://www.pmel.noaa.gov/tao/proj_over/mooring.shtml;
- океанские климатические станции: http://www.pmel.noaa.gov/OCS/;
- тропические заякоренные буи ТРИТОН в западной части Тихого океана: http://www.jamstec.go.jp/jamstec/TRITON/real_time/php/top.php;
- более современные заякоренные буи м-ТРИТОН в Индийском океане: http://www.jamstec.go.jp/iorgc/iomics/index.html;
- руководство OCSA по проведению качественных метеорологических измерений и измерений потока в море (Bradley и др., 2007).

Типичный заякоренный буй, сконструированный для работы на больших океанских глубинах, оборудован датчиками для измерения следующих переменных:

(a) скорость ветра;
(b) направление ветра;
(c) атмосферное давление;
(d) температура поверхности моря;
(e) высота и период волн;
(f) температура воздуха;
(g) температура точки росы или относительная влажность.

Ниже приводятся следующие дополнительные элементы, измеряемые некоторыми заякоренными буями:

(a) максимальный порыв ветра;
(b) волновой спектр (направленный или ненаправленный);
(c) солнечная радиация (направленная вниз коротковолновая радиация);
(d) поверхностное течение или профили течения;
(e) соленость поверхностного слоя;
(f) подповерхностная температура и соленость на глубине до 500 м или 750 м;
(g) атмосферная видимость;
(h) осадки;
(i) приземная концентрация CO_2.

Что касается волн, то обычно измеряются или оцениваются следующие переменные, при этом используются следующие определения (см. также 4.2.12.1 для дополнения этих определений):

Характерная высота волн: оценка средней высоты одной трети наиболее высоких волн;

Максимальная высота волн: максимальная высота одной волны, наблюдаемая за определенный период времени;

Средний период прохождения волнами нулевого уровня: период волн, соответствующий прохождению нулевого уровня высоты поверхности. Он также может оцениваться по второму порядку частоты спектра волновой энергии;

Пиковая высота: высота волны, соответствующая пику спектра волновой энергии (часть спектра с наивысшей энергией волны);

Пиковый период: период волн, соответствующий пиковой высоте спектра волновой энергии;

Период волнового спектра: период волн, соответствующий средней частоте спектра.

Помимо метеорологических и океанографических измерений необходимо следить за местоположением буев и различными параметрами их состояния с целью контроля качества данных и технического обслуживания. Технология использования заякоренных буев усовершенствована до такой степени, что считается обычной работа буев без технического обслуживания в течение срока от 6 месяцев до двух лет даже в самых суровых условиях. Продолжительность оперативной жизни буя определяется в основном сроком службы датчиков, которые часто заменяются через 12 – 18 месяцев.

В настоящее время считается, что наблюдения с заякоренных буев являются более качественными, чем наблюдения с судов, с точки зрения точности и надежности измерений (Wilkerson и Earle, 1990; Ingleby, 2010). Действительно считается, что заякоренные буи обычно сообщают данные наблюдений высшего качества в широком диапазоне морских метеорологических переменных, и помимо их использования прогнозистами и включения в модели численного прогнозирования погоды (ЧПП) эти данные могут быть также использованы для получения информации о климатологии океанических районов, эталонных данных, прошедших «наземную проверку», для калибровки/валидации спутников и оценки приземных потоков (например Bourras, 2006).

Ниже приводятся типичные погрешности измерений, проведенных с оперативных буев:

скорость ветра	1 м/с или 5 % для показателя более 20 м/с
направление ветра	10°
температура ветра	0,2 °C
давление на уровне моря	0,2 гПа
температура поверхности моря	0,2 °C
температура точки росы	0,5°
характерная высота волн	10 % или 0,2 м
направление волн	10°
период волн	1 с

Стандартный комплект датчиков, установленный на заякоренных буях, осуществляет выборочные измерения скорости ветра, максимального порыва ветра (например порыв в течение 3 – 5 секунд, в зависимости от национальных требований); направления ветра; барометрического давления; температуры воздуха; температуры воды; и ненаправленных спектров энергии океанских волн, на основе которых определяются характерная высота волн и пиковый (или средний) период волны. Для измерителей волн цунами стандартным измерением является высота столба воды.

4.3.1 Атмосферное давление

Атмосферное давление и его изменчивость как во времени, так и пространстве, имеют исключительно важное значение для ЧПП и для анализа и прогнозирования. Измерение атмосферного давления на большинстве буев осуществляется при помощи цифровых барометров-анероидов. Давление определяется по электрической емкости между параллельными, чувствительно реагирующими на давление пластинами. Емкость между этими пластинами увеличивается по мере повышения давления. Проводятся следующие измерения давления:

(a) давление на уровне станции – это фактическое измерение при помощи барометра на высоте станции, выраженное в гектопаскалях (гПа); в некоторых случаях могут использоваться два барометра, и их значения усредняются;

(b) давление на уровне моря – это давление, приведенное к уровню моря по давлению на уровне станции и выраженное в единицах гПа. Для установленных в море буев эта величина весьма близка к давлению на уровне станции. Большое различие наблюдается между давлением на уровне моря и давлением на уровне станции, данные о котором поступают с буев, размещенных на озерах, находящихся на большой высоте. Преобразование в давление на уровне моря осуществляется с использованием процедур, описанных в WBAN (1964) и WBAN (1963).

Многие буи, размещенные в регионах, подверженных ураганам или воздействиям интенсивных систем низкого давления, способны измерять дополнительные данные среднего давления за одну минуту. Эти данные регистрируются после того, как почасовые данные о давлении становятся ниже предопределенного порогового значения (например 1008 гПа в тропиках). Ниже приводятся условия получения дополнительных данных о давлении:

(a) минимальное барометрическое давление за минимум одну минуту в гПа, показанное первым (и вторым, если он установлен) барометром – это минимальное среднее барометрическое давление за одну минуту в течение часа;

(b) время – это минута в течение часа, когда наблюдается минимальное давление.

4.3.2 Измерения ветра

Измерения ветра являются самыми важными измерениями, которые проводятся с заякоренных буев.

Они имеют существенное значение для прогнозистов морской погоды.

Определения:
направление ветра – это направление, откуда дует ветер, выраженное в градусах по часовой стрелке от истинного севера. Это средний векторный показатель направления ветра;

скорость ветра – это средняя скалярная величина скорости ветра за выборочный интервал (обычно 10 минут);

максимальная скорость ветра – это наивысшая, документально зарегистрированная скорость ветра. Порывы ветра определяются по высшей скользящей средней величине, зарегистрированной в течение короткого интервала времени (например 5 секунд).

Измерение ветра обычно производится при помощи крыльчатого (например США, Канада) или чашечного анемометра и флюгера (СК, Ирландия, Франция). Для предотвращения механического износа на заякоренных буях началось использование ультразвуковых датчиков скорости и направления ветра, не имеющих никаких подвижных частей. Измерение направления ветра обычно проводится при помощи компаса, и поэтому относительное направление ветра, измеренное с буя, может быть скорректировано для получения истинного направления.

В США и Канаде на их метеорологических заякоренных буях обычно используется четырехлопастной роторный датчик-флюгер. Конечные измерения – это статистические оценки параметров ветра на основе временных рядов мгновенных выборочных измерений ветра, проведенных с минимальной частотой 1 герц (Гц) за конкретный период времени. Скорость дискретизации является функцией номинальной нагрузки. На большинстве заякоренных буев используется 8-минутный период сбора данных. Последующие стандартные измерения ветра производятся каждый час.

В некоторых странах-членах (например США, Канада) их метеорологические заякоренные буи осуществляют статистическую обработку данных в конце периода их сбора, а итоговое сообщение обновляется при помощи новых статистических данных и шести 10-минутных сегментов. Статистическая обработка включает расчет среднего значения как параметров направления и скорости, так и стандартного отклонения скорости. Почасовые данные не представляют собой данные от нулевой минуты до 59-ой минуты. Они представляют собой скорее самые последние полные шесть 10-минутных сегментов до конца последнего сбора данных. В то же время обязательным является отсчет 10-минутных сегментов от 0, 10, 20 и т.д. минут.

В случае заякоренных буев США и Канады скорость ветра на уровне в 10 и 20 м выше площадки измерения выводится при помощи алгоритма (Liu и др., 1979), используя высоту анемометра, скорость ветра, постоянную относительную влажность в 85 %, постоянное давление на уровне моря 1 013,25, и температуру воздуха и воды. Если отсутствуют данные о температуре либо воздуха, либо воды, то предполагается нейтральная стабильность. Предполагаемая нейтральная стабильность может вызвать ошибку до 5 %. Если отсутствуют оба этих параметра, то скорость ветра не указывается ни на высоте 10 м, ни на высоте 20 м над уровнем площадки.

На английских, французских и ирландских заякоренных буях серии К традиционно использовались чашечный анемометр и флюгер с самостоятельной ориентацией для измерения скорости и направления ветра за 10-минутный период сбора данных ежечасно. Однако во время работы соленая вода проникает через уплотнения, и фактически происходит сбой в работе приборов, когда кристаллы соли образуются в смазочном материале, что ведет к механической поломке движущихся частей. Эти заякоренные буи обладают двойными системами измерения параметров метра для повышения устойчивости к воздействию внешней среды в случае поломки анемометра. Для еще большей надежности приборов СК заменяет их новой системой измерения параметров ветра, в которой используются звуковой анемометр и электронный компас.

4.3.3 Температура

Температура – это одно из основных метеорологических измерений. Для проведения измерений температуры обычно используются электронные термисторы, градуированные в градусах Цельсиях (°C). Измерения температуры могут также быть использованы для выведения давления на уровне моря и скорости ветра на стандартной высоте по измерениям атмосферного давления и вера на нестандартной высоте, соответственно.

4.3.3.1 Температура воздуха

Измерения температуры воздуха, как правило, являются весьма надежными; однако важно отметить, что физическая позиция датчиков температуры может негативно воздействовать на проводимые измерения. Защитные оболочки датчиков температуры могут стать причиной нерепрезентативных отсчетов в условиях слабого ветра. Выборочные измерения температуры воздуха проводятся с частотой, установленной в период выборочных измерений (например в США и Канаде используется частота в 1 Гц, а на французских, английских и

ирландских буях серии К – 0,1 Гц в течение выборочного периода в 10 секунд).

4.3.3.2 Температура воды

Хотя с измерениями температуры воды связано, как правило, мало проблем, следует отметить, что глубина погружения датчиков температуры воды меняется в зависимости от корпуса буя и что датчики температуры на буях крепятся к внутренней части корпуса. Поскольку корпуса буев характеризуются высокой теплопроводимостью, то измеряемые температуры могут соответствовать средней температуре воды вокруг погруженного в воду корпуса, а не температуре воды вблизи датчика. В весьма стратифицированном слое воды, особенно в полуденные часы в условиях спокойного ветра, температура воды, сообщаемая с буя, может быть на 2 – 3 °C ниже температуры поверхностной пленки воды.

4.3.6 Оценки океанских волн

Оценки состояния моря являются, вероятно, самыми сложными измерениями, которые проводятся с заякоренных буев, и они имеют исключительно важное значение для морских прогнозистов, мореплавателей, инженеров океанских судов и сооружений, а также ученых. При использовании буя все основные измерения волнения осуществляются определенным образом на основе временного ряда движения буев[3] . НЦБД (2003) представляет полную информацию об измерениях волнения, проведенных Национальным центром по буям для сбора данных США (НЦБД).

Состояние моря – это описание характеристик волн на поверхности моря в данное время и в данном месте. Его можно было бы представить в виде волнового спектра или более просто – в показателях характерной высоты волн и определенном измерении периода волн (АМО, 2000). Многие заякоренные буи проводят измерение плотности спектральной изменчивости (Международная ассоциация гидротехнических исследований (МАГИ), Список параметров состояния океана), которая будет упоминаться в качестве спектральной плотности волн. На большинстве буев все не связанные с направлением параметры волнения, высот и периодов, крутизны и т.д. выводятся из спектральных плотностей волнения. Кроме того, многие буи измеряют направленный волновой спектр, из которого они выводят усредненные и основные направления волнения, а также первые и вторые нормированные полярные координаты по коэффициентам Фурье, которые рассылаются центрами с использованием буквенно-цифровых кодов ВМО FM-65 WAVEOB (ВМО, 1995).

4.3.7 Оценки ненаправленного волнения океана

На большинстве буев для измерения их перемещения используются акселерометры. Будучи прикрепленными таким образом, чтобы оставаться в вертикальном положении по отношению к корпусу буя или в стабильном параллельном положении по отношению к земной вертикали, акселерометры используются на буях для осуществления подавляющего большинства измерений волнения океана. Вертикальная стабилизация в тех случаях, когда она применяется, достигается благодаря использованию датчика перемещения, килевой и бортовой качки, эталонная плоскость которого монтируется на платформе со стабилизацией гравитации и обеспечивает естественный период порядка 40 секунд. Этот тип оборудования является дорогостоящим и имеет встроенную механическую систему для сохранения вертикального положения акселерометра в случае наклона буя и датчика.

Оперативные системы измерения ненаправленного волнения сообщают оценочные данные о ускорении или спектрах перемещения. При отсутствии прямых данных о них спектры перемещения выводятся на основе спектров ускорения в качестве части расчетов, связанных с обработкой данных о волнении на берегу. На основе этих спектров рассчитываются средний период волн, их доминирующий период, характерная высота и крутизна волн. Эти параметры ненаправленного волнения определяются следующим образом:

Средний период волн, выраженный в секундах, может быть рассчитан разными способами. Это может быть период, который соответствует частоте волн, согласно которой их спектр делится на равные зоны, или он может быть основан на моменте второго порядка частоты спектральной ненаправленной плотности. Он может быть также оценен посредством метода пересечения нуля.

Доминирующий период волн или пиковый период волн, выраженный в секундах, – это период волн, соответствующий центральной частоте полосы частот при максимальной ненаправленной спектральной плотности.

Характерная высота волн, H_{m0}, оценивается по изменчивости перемещения волн, выведенному из спектра перемещения в соответствии со следующим уравнением:

---

[3] НЦБД не проводит больше измерений волн на станциях C-MAN с использованием лазерных датчиков высоты волн.

$$H_{m0} = 4\left[\int_{f_l}^{f_u} S(f)df\right]^{\frac{1}{2}}$$

где: $S(f)$ – это спектральная плотность перемещения, df – ширина частотной полосы, f_u – верхний предел частоты, f_l – нижний предел частоты.

4.3.8 Оценки направленных океанских волн

Системы измерения направленного движения волн требуют, помимо параметров вертикального ускорения или движения (перемещения), измерения азимута буя, килевой и бортовой качки. Эти данные позволяют рассчитать восточный-западный и северный-южный волновой уклон. На большинстве буев используется несколько разных методов и комплектов датчиков для измерения этих углов.

Для обслуживания всего диапазона пользователей рекомендуется (Swail и др., 2010), чтобы системы измерения направленного спектра волн позволяли надежно оценивать так называемый стандарт «First 5». С технической точки зрения речь идет о пяти определяющих переменных для конкретной частоты волн (или периода волн). Первой переменной является энергия волн, которая связана с их высотой, а остальными четырьмя являются первые четыре коэффициента ряда Фурье, которые определяют направленное распределение этой энергии. Для каждой полосы частот определяется не только направление волн, но также и их дисперсия (момент второго порядка), их ассиметрия (момент третьего порядка) и куртозис (четвертый момент). Ассиметрия показывает то, каким образом сконцентрировано распределение по направлениям (налево или направо от среднего значения), а куртозис определяет пиковость распределения. Получение этих трех дополнительных параметров (дисперсия, ассиметрия и куртозис) для каждой полосы частот позволяет улучшить репрезентативность волнового поля.

Данные измерений волнения с заякоренных буев также используются для валидации измерений волн, полученных при помощи высокочастотных радаров.

4.3.9 Высота водного столба для обнаружения цунами

Большинство установленных на буях цунаметров используют технологию DART® II и сообщают об уровне воды (фактически высота водного столба) на основе измерений давления и температуры на дне моря и преобразованных в высоту водного столба путем умножения величины давления на абсолютную константу 670 мм на 1 фунт на 1 квадратный дюйм.

4.3.10 Относительная влажность

Датчики влажности, используемые на буях, включают цепь, которая измеряет влажность благодаря изменению емкости тонкого полимера, подверженному колебаниям водяного пара. Газопроницаемая мембрана защищает электронные части от водных брызг и частиц, но пропускает воздух в защитную оболочку прибора. Чувствительный к температуре датчик включает датчик температуры, который осуществляет корректировку температуры при расчете относительной влажности. Датчик выставляется на установленную частоту в период выборочных контрольных измерений (например 1 Гц для заякоренных метеорологических буев США и Канады). В английских, французских и ирландских буях серии К мгновенное значение электрической гидрометрической цепи получают в момент наблюдения.

4.3.11 Океанские датчики

Для понимания и предсказания данных об океанах необходимо осуществлять мониторинг их характеристик. Многочисленные буи способствуют мониторингу океанов посредством измерения параметров поверхностных течений, профилей океанских течений, температуры вблизи поверхности и качества воды. В число параметров качества воды могут входить мутность воды, окислительно-восстановительный потенциал (Eh), pH, хлорофилла и растворенный кислород. Данные с буев проходят контроль качества в режиме реального времени и, если это возможно, эти данные распространяются по Глобальной сети телесвязи (ГСТ).

4.3.11.1 Поверхностные океанские течения

Сбор данных измерений поверхностных течений осуществляется в целях содействия торговле, безопасности функционирования, поисково-спасательным операциям, ликвидации разлива нефти и определения течений поблизости от входов в порт, которые влияют на океанские перевозки. Данные измерений поверхностных течений при помощи буев также используются для валидации измерения этих течений высокочастотными радарами. Большинство буев получают эти данные при помощи смонтированных на них акустических доплеровских измерителей течения.

4.3.11.2 Профили океанских течений

Профили океанских течений показывают движение океанов на разных уровнях столба воды. Эта информация является существенной для оценки дисперсии разливов нефти, для операций по поиску и спасению, измерения стрессов, создаваемых течениями для оффшорных платформ, и валидации океанских

моделей. В настоящее время эти данные поступают от направленных вниз систем, установленных на буях или в клетках. На оффшорных нефтяных платформах профиль течений может быть нисходящим, начиная с определенных уровней столба воды или восходящем по отношению к установленной на корме системе.

На большинстве буев используется технология профилометров Доплера как основных датчиков для сбора данных о текущем профиле океана. Они испускают короткие высокочастотные импульсы акустической энергии вдоль узких лучей. Элементы рассеяния (предположительно пассивный нектон и планктон), находящиеся внутри столба воды, возвращают отраженную энергию, а приборы преобразуют сдвиги частот Доплера вдоль луча в ортогональные наземные координаты для получения данных об океанских течениях на различных уровнях столба воды.

4.3.11.3 Соленость

Необходимо знать соленость воды для инициализации океанских моделей, позволяющих готовить океанские прогнозы и предсказывать циркуляцию в океанах (которая в значительной мере определяется плотностью). Как правило, показатель солености выводится из данных измерений проводимости морской воды. Некоторые приборы сообщают данные о солености непосредственно (посредством внутренних расчетов), а другие сообщают данные о проводимости, температуре и глубине, которые необходимы для расчета солености. Измерения солености основаны на практической шкале солености, использующей эмпирическое соотношение между соленостью и проводимостью морской воды (хотя недавно в соответствии с резолюцией XXV-7 Ассамблеи ЮНЕСКО МОК утвердила новое Международное термодинамическое уравнение состояния морской воды – ТЕОС-10). Показатель солености сообщается в практических единицах солености (PSU).

4.3.12 Осадки

На некоторых заякоренных буях были установлены сифоновые дождемеры.

4.3.13 Измерения солнечной радиации

Солнечная радиация оказывает серьезное воздействие на физические, биологические и химические процессы вблизи границы между атмосферой и океаном, и поэтому она представляет интерес для ученых и инженеров. Проведенные на поверхности измерения солнечной радиации использовались для калибровки радиометров видимого диапазона, установленных на спутниках. Датчик размещается как можно выше на платформе, чтобы на него не падала тень. Солнечный радиоактивный поток измеряется в ваттах на квадратный метр, а активная радиация фотосинтеза (АРФ) измеряется в микромолях на квадратный метр в секунду.

4.3.14 Видимость

Датчики видимости размещаются на некоторых станциях, где видимость является серьезной проблемой для безопасности навигации. Датчик измеряет затухание света в небольшом объеме воздуха между источником и приемником света. Важно отметить, что это измерения в одной точке и что существует несколько похожих, но отличных друг от друга определений.

4.4 АВТОМАТИЧЕСКИЕ ПЛАВУЧИЕ МАЯКИ

По большинству параметров эти платформы аналогичны заякоренным буям. Однако, поскольку они имеют бóльшие размеры и способны нести большую приборную нагрузку, на них проще размещать дополнительные датчики, такие как датчики видимости. В условиях суровой погоды такие датчики могут подвергаться воздействию морских брызг, которые образуются самим плавучим маяком. В то же время, для большинства условий их рабочие характеристики соответствуют характеристикам приборов, устанавливаемых на наземных автоматических метеорологических станциях.

4.5 ВЫШКИ И ПЛАТФОРМЫ

На вышках (обычно на относительном мелководье поблизости от берега) и на платформах в более удаленных районах можно эксплуатировать стандартные автоматические метеорологические станции, аналогичные по своей конструкции наземным автоматическим метеорологическим станциям (см. главу 1 части II). Часто размещаются дополнительные датчики, например датчики волнения и датчики для измерения среднего уровня воды выше реперной точки, облакомеры и измерители дальности. К числу фиксированных платформ могут относиться крупные гравитационные структуры, мобильные самоподъемные морские буровые установки и полупогруженные буровые платформы. Самоподъемные и полупогруженные буровые платформы и буровые суда могут считаться стационарными платформами, поскольку они заякорены или динамически позиционированы, с тем чтобы оставаться в одном и том же

месте во время их эксплуатации. На неавтоматических платформах и буровых установках данные измерений могут дополняться визуальными наблюдениями за облачностью, видимостью и погодой, обеспечивая таким образом полный набор синоптической информации. Визуальные наблюдения с нефтяных/газовых платформ следует проводить в соответствии с процедурами, рекомендованными в пункте 4.2. Однако имеются случаи, когда применяются иные процедуры. Например, платформа может включать данные о волнении с ближайшего заякоренного буя для измерения волнения и данные о ТПМ с находящегося неподалеку судна снабжения.

Некоторые неавтоматические фиксированные или стационарные (оффшорные нефтяные и газовые) платформы могут включать в свои метеорологические сводки данные о характерной высоте волн и некоторые данные об измерении периода волн (используя для этого те же части кода FM13 SHIP, что и для заякоренных буев), пользуясь при этом выходными данными с близлежащего буя для измерения волнения или с бортового радара для измерения волнения.

Платформы и вышки представляют собой удобные структуры для установки метеорологических датчиков. Установка и техническое обслуживание могут быть менее сложными и более экономичными по сравнению с заякоренным буем, обеспечивая лучшую частоту и надежность данных. На качество данных не влияет движение судна или буя, и оно в меньшей степени подвержено ошибкам, возникающим в результате повреждения датчиков ударами волн.

В то же время датчики температуры и влажности требуют очень тщательного позиционирования, поскольку часто имеются источники тепла и выхлопных газов, которые изменяют местную окружающую среду, в результате чего условия окружающей среды характеризуются нерепрезентативными величинами. Измерения параметров ветра могли бы проводиться на высотах более 100 м над среднем уровнем моря, и они требуют корректировки для приведения полученных значений к эквиваленту приземного ветра на высоте в 10 м (отметим, что в идеальном варианте желательно знать также данные реального наблюдения и его высоты). Если вышки находятся вблизи берега, то высота прилива может существенно изменить эффективную высоту датчика ветра.

В заключение, таким образом, фиксированные вышки и оффшорные платформы могут обеспечить экономически эффективный источник получения данных, при этом заякоренные буи необходимо использовать в более удаленных районах, где нет никакой иной альтернативы.

4.6 ДРЕЙФУЮЩИЕ БУИ

Дрейфующие буи использовались в течение многих лет в океанографии, главным образом для измерения течений на поверхности моря. Однако разработка надежных спутниковых систем отслеживания и ретрансляции данных (ВМО/МОК, 1995*a*) привела к резкому увеличению количества океанских дрейфующих буев и к существенному расширению возможностей датчиков дрейфующих буев для метеорологических и океанографических целей.

Описание систем дрейфующих буев и их эксплуатации содержатся в публикации ЮНЕСКО (1988). Позднее группа экспертов ВМО/МОК по сотрудничеству в области буев для сбора данных (ГСБД) опубликовала Surface Velocity Programme Barometer Drifter Design Reference (ВМО/МОК, 2005). См. также ежегодные отчеты и материалы практических семинаров ГСБД, такие как ВМО/МОК (2004*a* и 2004*b*).

Эволюция технологии дрейфующих буев была обусловлена потребностями океанографических исследований, с одной стороны, и оперативной метеорологией, с другой стороны. Таким образом, три основных различных типов буев могут быть охарактеризованы следующим образом:

(a) дляокеанографическихисследований,иособенно для Эксперимента по циркуляции Мирового океана (Программа по изучению поверхностных течение – SVP, 1988-1993), была разработана конструкция дрейфующего буя, следующего за поверхностным течением, оборудованного также для измерения температуры поверхности моря, и такие буи были установлены в большом количестве в океанах земного шара;

(b) для оперативной метеорологии конструкция дрейфующих буев была разработана на основе буев, разработанных для первого Глобального эксперимента в рамках Программы изучения глобальных атмосферных процессов. Эти буи измеряют главным образом атмосферное давление, температуру поверхности моря и температуру воздуха;

(c) для полярных применений были разработаны различные буи на плавучих льдинах для измерения традиционных атмосферных переменных, а также состояние льда и снега (температура льда/снега и температурные профили льда, толщина льда, нагрузка на лед, состояние воды подо льдом). Путем прослеживания местоположения буя на льду можно оценивать движение ледовой массы. Были предприняты усилия по разработке буев, которые одновременно удовлетворяли требо-

ваниям океанографических исследований и оперативной метеорологии, в результате чего были разработаны:

(i) дрейфующий буй SVP-B, который в основном является дрейфующим буем, следующим за поверхностным течением, к которому добавлен датчик атмосферного давления;

(ii) дрейфующий буй SVP-BW (или «минимет»), который по существу представляет собой дрейфующий буй SVP-B, который может измерять параметры ветра, используя так называемую технологию Wind Observation Through Ambient Noise (WOTAN) (наблюдения за ветром при помощи шума окружающей среды);

(iii) буй, измеряющий профиль ветра и температуры, который представляет собой в основном метеорологический дрейфующий буй с дополнительно установленным на нем датчиком скорости ветра и подповерхностной термисторной цепью для измерения температурного профиля до глубин порядка 100 м. Направление ветра измеряется на этих буях посредством ориентации всего буя по ветру, используя профилированную мачту или фиксированный ветровой флюгер;

(iv) дополнительная установка датчиков солености на дрейфующих буях SVP.

Дрейфующие буи представляют собой устройства одноразового применения, и таким образом их рабочие характеристики являются компромиссом между предъявляемыми требованиями и их стоимостью для владельца. Наряду со стоимость аппаратного обеспечения, следует учитывать, что стоимость обработки и распространения данных через спутниковую систему АРГОС является значительной и может быть ограничивающим фактором, хотя решению этой проблемы способствует использование в последнее время телекоммуникационной системы спутниковых данных ИРИДИУМ. В то же время, функционирование датчиков дрейфующих буев является адекватным, в случае необходимости, для целей синоптической метеорологии и океанографии. Отметим, что качество наблюдений за скоростью ветра является спорным, в результате чего их данные не используются оперативными центрами (Ingleby, 2010).

Ниже приводятся типичные погрешности измерений оперативных систем:

температура поверхности моря	0,21 °C[a]
атмосферное давление	0,84 гПа[b]
скорость ветра	3,5 м/с или 10 %[abc]
направление ветра	18,5°[b]
подповерхностная температура	0,1 °C

[a] Источник: O'Carroll (2008)

[b] Источник: Статистические данные ЕЦСПП по мони торингу буев, январь 2010 г.

[c] В связи с небольшой высотой размещения датчика (приблизительно 1 м над уровнем моря) эти погрешности относятся только к низким скоростям ветра и небольшому волнению.

ПРИЛОЖЕНИЕ 4.A

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ЦЕНТРЫ МОРСКИХ ПРИБОРОВ ВМО-МОК (РЦМП)

1. Учитывая потребность в высококачественных морских метеорологических и океанографических измерениях, проводимых в океанах мира, для удовлетворения требований программ ВМО и ЮНЕСКО/МОК и совместно финансируемых программ, необходимость в технических средствах для регулярной калибровки и технического обслуживания морских приборов и мониторинга их работы на региональной основе, с тем чтобы обеспечить соответствие данных океанских наблюдений и соответствующих метаданных высоким стандартам для приборов и методов наблюдений, необходимость в документировании методов измерений в целях понимания погрешностей, вносимых каждым типом приборного обеспечения, а также разработки методов коррекции подобных погрешностей для обеспечения предоставления и использования согласованных комплектов данных, было рекомендовано следующее:[4]

Региональные центры по морским приборам (РЦМП) должны обладать следующими возможностями для выполнения своих соответствующих функций:

Возможности:

(a) РЦМП должен иметь необходимые технические средства и лабораторное оборудование и иметь доступ к ним, с тем чтобы выполнять функции, необходимые для калибровки метеорологических и соответствующих океанографических приборов, установленных для удовлетворения общих потребностей морских и совместно финансируемых программ ВМО и ЮНЕСКО/МОК;2

(b) РЦМП должен обслуживать комплект стандартных метеорологических и океанографических приборов или эталонов и обеспечивать согласованность своих собственных стандартов измерений и измерительных приборов с Международной системой единиц (СИ);

(c) РЦМП должен иметь квалифицированный управленческий и технический персонал, обладающий необходимым опытом для выполнения своих функций;

(d) РЦМП должен разработать свои индивидуальные технические процедуры для калибровки метеорологических и соответствующих океанографических приборов, пользуясь своим собственным калибровочным оборудованием;

(e) РЦМП должен разработать свои индивидуальные процедуры обеспечения качества;

(f) РЦМП должен участвовать в межлабораторных сравнениях стандартных калибровочных приборов и методов и организовывать эти сравнения;

(g) РЦМП должен использовать, в случае необходимости, ресурсы и возможности своего изучаемого региона в наивысших интересах данного региона;

(h) РЦМП должен, по мере возможности, пользоваться международными стандартами, применяемыми для калибровочных лабораторий, такими как ИСО/МЭК 17025;

(i) Авторитетный орган3 должен оценивать работу РЦМП как минимум раз в пять лет для поверки его возможностей и эффективности.

Соответствующие функции:

(a) РЦМП должен оказывать помощь членам/странам-членам своего региона в проведении калибровки их национальных метеорологических эталонов и соответствующих приборов для океанографического мониторинга в соответствии с возможностями РЦМП;

(b) РЦМП должен участвовать в проводимых СКОММ и/или региональных взаимных сравнениях приборов или организовывать их, следуя соответствующим рекомендациям СКОММ;

(c) РЦМП должен вносить позитивный вклад в деятельность членов/стран-членов, связанную с качеством измерений;

(d) РЦМП должен консультировать члены/страны-члены по запросам, касающимся эксплуатации и обслуживания приборов, а также наличия соответствующих руководящих материалов;

(e) РЦМП должен активно участвовать в организации региональных семинаров по метеорологическим и соответствующим океанографическим приборам и измерениям;

(f) РЦМП должен сотрудничать с другими РЦМП в области стандартизации метеорологических и соответствующих океанографических измерений и датчиков;

(g) РЦМП должен регулярно информировать членов/страны-члены и сообщать на ежегод-

[4] Рекомендовано Совместной технической комиссией ВМО-МОК по океанографии и морской метеорологии на ее третьей сессии, проведенной в 2009 г.

ной основе Комитету управления СКОММ об услугах, предложенных членам/странам-членам и осуществленной деятельности. СКОММ, в свою очередь, следует постоянно информировать исполнительные советы ВМО и ЮНЕСКО/МОК о ходе работы и деятельности РЦМП и предлагать, в случае необходимости, соответствующие изменения.

2. Механизм официального назначения РЦМП ВМО и ЮНЕСКО/МОК предполагает следующее:

(a) руководящие указания, касающиеся определения функций и принятия РЦМП, предлагаются СКОММ и утверждаются Исполнительными Советами ВМО и ЮНЕСКО/МОК;

(b) от представившего свою кандидатуру РЦМП требуется представление декларации о соответствии, перечисление возможностей предлагаемого центра, декларация о предлагаемой совокупности возможностей по экспертизе приборов, декларация об официальном обязательстве в отношении добровольного размещения центра и представление СКОММ подтверждения имеющихся возможностей;

(c) процедура создания РЦМП инициируется СКОММ, а процесс назначения координируется СКОММ и Секретариатом ВМО/МОК в соответствии с процедурой, утвержденной СКОММ и документально оформленной в техническом отчете СКОММ № 53;

(d) в случае создания нескольких РЦМП в пределах региона ВМО и/или МОК необходимо обеспечить координацию работы центров для сведения к минимуму дублирования предоставляемых услуг.

3. Список региональных центров морских приборов (РЦМП)

В качестве РЦМП были назначены следующие центры:

Регион	*Центр*	*Местонахождение*
РА II	Национальный центр по океаническим стандартам и метрологии	Тианьджин, Китай
РА IV	Национальный центр по буям для сбора данных, США	Космический центр Стенниса, Миссисипи, США

ПРИЛОЖЕНИЕ 4.B

ОПИСАНИЯ ОСАДКОВ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СУДОВЫМИ НАБЛЮДАТЕЛЯМИ

Осадки бывают либо более или менее равномерными (прерывающиеся или непрерывные), либо ливневыми.

О всех осадках, кроме ливневых, необходимо сообщать как о прерывающихся или непрерывных.

Неливневые осадки обычно выпадают из слоистых облаков (в основном из высокослоистых (Altostratus) и слоисто-дождевых (Ninbostratus) облаков). Ливневые осадки выпадают из мощных конвективных облаков (главным образом из кучево-дождевых облаков (Cumulonimbus) или средних или мощных кучевых (Cumulus) облаков вертикального развития) и обычно характеризуются своим внезапным началом и концом выпадения и значительными колебаниями интенсивности. Капли и градины при ливневых осадках обычно большего размера, чем при неливневых осадках.

Капли в осадках могут быть переохлажденными (т. е. их температура может быть ниже 0 °C). При попадании на поверхность капли переохлажденного дождя образуют смесь воды со льдом, имеющую температуру около 0 °C.

Виды осадков

Описания, представленные ниже, соответствуют определениям, которые даны в *Международном атласе облаков*, т. I, часть III.2 (ВМО, 1975):

Морось: довольно равномерные осадки в виде очень мелких капель воды. Диаметр капель обычно менее 0,5 мм. Эти капли кажутся почти парящими, так что становятся заметными даже легкие движения воздуха. Морось выпадает из сплошных и достаточно плотных слоистых облаков, обычно низких и иногда касающихся поверхности (туман). Для целей кодирования морось должна классифицироваться как слабая, умеренная или сильная:

(a) *слабая морось* может легко ощущаться кожей лица и обнаруживаться на окнах рулевой рубки, но она дает очень небольшой сток с палубы, крыш и т. п.;

(b) *умеренная морось* образует на окнах, настилах, стенах надстроек струйки воды;

(c) *сильная морось*: то же, что при умеренной мороси. Кроме того, уменьшает видимость до менее 1000 м.

Дождь: осадки в виде капель воды, выпадающих из облаков. Диаметр и концентрация капель меняются в значительном диапазоне в зависимости от интенсивности осадков и особенно в зависимости от их природы (непрерывный дождь, ливневый дождь, ливень и т. д.). Непрерывный дождь обычно выпадает из более или менее однородного слоя или слоев сплошной плотной облачности слоистых форм. При кодировании дождь должен подразделяться на слабый, умеренный или сильный. Эти термины определяются следующим образом:

(a) *слабый дождь* может состоять из редких больших или многочисленных небольших капель. Скорость накопления воды на палубе мала, лужи образуются очень медленно;

(b) *умеренный дождь*: отдельные капли ясно не прослеживаются. Наблюдаются брызги дождя. Лужи образуются быстро. С крыш слышится легкий или шуршащий шум;

(c) *сильный дождь*: ливень, который создает сильный шум на тентах и настилах и образует за счет всплесков на поверхностях палубы туманообразную водяную пыль.

Снег: осадки, состоящие из отдельных или связанных между собой кристаллов льда (снежинок), выпадающих из облаков. Форма, размер и концентрация снежинок меняются в широком диапазоне в зависимости от условий во время снегопада. По интенсивности кодируется как слабый, умеренный или сильный.

Ливневые осадки: эти осадки характеризуются внезапным началом и концом и обычно быстрыми и иногда сильными колебаниями интенсивности. Выпадающие капли и твердые частицы обычно большего размера, чем при неливневых осадках. Появление ливневых или неливневых осадков (дождь или снег) зависит от облаков, в которых они образовались. Ливневые осадки выпадают из мощных конвективных облаков и определяются следующим образом:

(a) *ливневый дождь и ливневый снег* при кодировании должны подразделяться по интенсивности на слабый, умеренный и сильный. Описание слабого, умеренного и сильного дождя и снега одно и то же. Надо, однако, помнить, что видимость при погоде с ливнями обладает большей изменчивостью, чем при погоде аналогичной категории с непрерывным дождем;

(b) *сильные ливни* – это исключительно интенсивные и обильные ливневые дожди. Они бывают главным образом в тропических районах.

Снежная крупа: осадки в виде белых и непрозрачных ледяных крупинок, выпадающих из облаков. Эти крупинки обычно имеют коническую или округлую форму. Их диаметр может достигать 5 мм. Эти крупинки, имеющие снегообразную структуру, отличаются хрупкостью и легко разрушаются; когда они падают на твердую поверхность, то отскакивают от нее и часто разрушаются. В большинстве случаев снежная крупа выпадает как ливень, часто вместе с хлопьями снега, обычно при температуре воздуха у поверхности близкой к 0 °C. Для целей регистрации интенсивность снежной крупы, когда она выпадает в чистом виде, определяется по видимости так же, как и интенсивность снега.

Град: осадки в виде прозрачных, полупрозрачных или совершенно непрозрачных частиц льда (градины), обычно сферической, конической или неправильной формы диаметром 5-50 мм (более мелкие частицы аналогичного происхождения могут классифицироваться как мелкий град или как ледяная крупа), и выпадают либо разрозненно, либо сцепленными в бесформенные комья. Град всегда выпадает во время ливней и обычно наблюдается при сильных грозах. Для целей кодирования град должен подразделяться на слабый, умеренный и сильный. Интенсивность определяется по степени скопления градин следующим образом:

(a) *слабый град*: небольшое количество выпавших градин; на плоских поверхностях не наблюдается заметного их скопления;
(b) *умеренный град*: наблюдается медленная аккумуляция градин. Их количество становится достаточным, чтобы палубы стали белыми;
(c) *сильный град*: быстрое накопление градин. Редко наблюдается на море в средних широтах.

Ледяной дождь: осадки в виде прозрачных ледяных частиц, выпадающих из облаков. Эти частицы, почти сферической формы, имеют иногда конические вершинки. Их диаметр может достигать 5 мм и более. Обычно они нелегко разбиваются и при падении на твердую поверхность отскакивают от нее с громким звуком. Ледяной дождь всегда выпадает в виде ливней. При кодировании ледяной дождь подразделяется на слабый, умеренный и сильный. Интенсивность определяется степенью накопления, как и при выпадении града.

Ледяная крупа: осадки в виде прозрачных ледяных частиц, выпадающих из облаков. Эти частицы обычно имеют сферическую или неправильную форму, реже коническую. Их диаметр менее 5 мм. Обычно ледяная крупа нелегко разбивается и при падении на твердую поверхность отскакивает от нее с громким звуком. Осадки в виде ледяной крупы выпадают обычно из высокослоистых или слоисто-дождевых облаков. Интенсивность определяется так же, как и интенсивность града.

Снежные зерна: осадки в виде очень мелких непрозрачных белых частиц льда, выпадающие из облаков. Эти частицы имеют довольно плоскую или удлиненную форму; их диаметр обычно менее 1 мм. Когда снежные зерна падают на твердую поверхность, они не отскакивают от нее. Как правило, они выпадают в небольших количествах, в основном из слоистых облаков или из тумана и никогда не бывают ливневыми. Эти осадки фактически соответствуют мороси и выпадают при температуре воздуха приблизительно от 0 до –10 °C. Поскольку существует только одна кодовая характеристика, относящаяся к снежным зернам (WW – 77), то классифицировать интенсивность этих осадков нет необходимости..

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

AMS, 2000: *Glossary of Meteorology*, Second Edition, American Meteorological Society

Bowditch, N. and the National Imagery and Mapping Agency, 2002: *The American Practical Navigator: An Epitome Of Navigation*. 2002 Bicentennial edition, NIMA Pub. No. 9, Bethesda.

Bourras, D., 2006: Comparison of five satellite-derived latent heat flux products to moored buoy data. J. Atmos. Oceanic Technol., 19, 6291-6313.

Bradley, F. and C. Fairall, 2007: A Guide to Making Climate Quality Meteorological and Flux Measurements at Sea. NOAA Technical Memorandum OAR PSD-311, NOAA/ESRL/PSD, Boulder, CO, 108 pp. ftp://ftp.etl.noaa.gov/user/cfairall/wcrp_wgsf/flux_handbook/fluxhandbook_NOAA-TECH%20PSD-311v3.pdf

Ingleby, B., 2010, Factors affecting ship and buoy data quality: A data assimilation perspective. Submitted to J. Atmos. and Oceanic Tech.

Kent, E. C. and D. I. Berry, 2005: Quantifying Random Errors in Voluntary Observing Ships Meteorological Observations, *Advances in the Applications of Marine climatology, The Dynamic Part of the WMO Guide to the Applications of Marine Climatology* - JCOMM TR No. 13 REV. 1 - WMO/TD No. 1081 REV. - June 2005 (available from ftp://ftp.wmo.int/Documents/PublicWeb/amp/mmop/documents/JCOMM-TR/J-TR-13-Marine-Climatology/REV1/joc1167.pdf

Kent E. C., P. K. Taylor and S. A. Josey, 2003: Improving Global Flux Climatology: *The Role of Metadata, In Advances in the Applications Of Marine Climatology: The Dynamic Part of the WMO Guide to the Applications of Marine Meteorology*, WMO/TD-No. 1081, 89–97. Available from http://www.wmo.int/pages/prog/amp/mmop/jcomm_reports.html#JCOMMTR13

Liu et al., 1979 – Liu, W.T., Katsaros, K.B., and Businger, J.A., 1979: Bulk parameterization of air-sea exchanges of heat and water vapor including the molecular constants at the interface, J. Atmos. Sciences, 36, 1722–1735

Moat, B. I., M. J. Yelland and A. F. Molland, 2006: Quantifying the airflow distortion over merchant ships, part II: application of model results, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 23(3), 351-360. Available from http://dx.doi.org/10.1175/JTECH1859.1

NDBC, 2003: Non-directional and Directional Wave Data Analysis Procedures, NDBC Technical Document 03-01, National Data Buoy Center, Stennis Space Center MS, 51 pp.

NDBC, 2009: *Handbook of Automated Data Quality Control Checks and Procedures*, NDBC Technical Document 09-02, National Data Buoy Center, Stennis Space Center

O'Carroll, A, J. Eyre, R. Saunders., July 2008, Three-way error analysis between AATSR, AMSR-E, and in situ sea surface temperature observations, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*

Swail , V., R.E. Jensen, B. Lee, J. Turton, J. Thomas, S. Gulev, M. Yelland, P. Etala, D. Meldrum, W. Birkemeier,
W. Burnett, and G. Warren, 2010: *Wave measurement needs and developments for the next decade*. OceanObs09.

Taylor, P. K., E. C. Kent, M. J. Yelland and B. I. Moat, 2003: *The Accuracy of Marine Surface Winds From Ships and Buoys, In Advances in the Applications Of Marine Climatology: The Dynamic Part of the WMO Guide to the Applications of Marine Meteorology*, WMO/TD-No. 1081, 27-40. Available from http://www.wmo.int/pages/prog/amp/mmop/jcomm_reports.html#JCOMMTR13

United Kingdom Meteorological Office, 1995: *Marine Observers Handbook*. Eleventh edition, UK Met Office No. 1016, London.

United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 1988: *Guide to Drifting Data Buoys*. WMO/IOC Manuals and Guides 20.

WBAN 1964 – WBAN, 1963: Manual of Barometry, Vol 1, Ed 1, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.

Wilkerson, J.C. and M.D. Earle, 1990: A study of differences between environmental reports by ships in the voluntary observing program and measurements from NOAA buoys. *Journal of Geophysical Research*, Volume 95, Number C3, pp. 3373–3385.

World Meteorological Organization, 1962: *Precipitation Measurements at Sea*. Technical Note No. 47, WMO-No. 124.TP.55, Geneva.

World Meteorological Organization, 1970: *WMO Sea-ice Nomenclature*. Volumes I and III, WMO-No. 259.TP. 145, Geneva.

World Meteorological Organization, 1972: *Comparative Sea-surface Temperature Measurements* (R.W. James and P.T. Fox). Report on Marine Science Affairs No. 5, WMO-No. 336, Geneva.

Hasse, L., Grossklaus, M., 5 Uhlig, K., and Timm, P.: *A ship rain gauge for use in high winds*, J. Atmos. Ocean. Tech., 15, 380-386, 1998.

World Meteorological Organization, 1974: *The Meteorological Aspects of Ice Accretion on Ships* (H.C. Shellard). Report on Marine Science Affairs No. 10, WMO-No. 397, Geneva.

Всемирная Метеорологическая Организация, 1975: *Международный атлас облако*. Том I, ВМО-№ 407,

Женева.

World Meteorological Organization, 1981: *Precipitation Measurement at Sea* (G. Olbrück). Marine Meteorology and Related Oceanographic Activities Report No. 1, Geneva.

World Meteorological Organization, 1989: *Wind Measurements Reduction to a Standard Level* (R.J. Shearman and A.A. Zelenko). Marine Meteorology and Related Oceanographic Activities Report No. 22, WMO/TD-No. 311, Geneva.

World Meteorological Organization, 1991*a*: C*ompendium of Lecture Notes in Marine Meteorology for Class III and Class IV Personnel* (J.M. Walker). Second edition, WMO-No. 434, Geneva.

World Meteorological Organization, 1991*b*: *The Accuracy of Ship's Meteorological Observations: Results of the VSOP-NA* (E.C. Kent, B.S. Truscott, P.K. Taylor and J.S. Hopkins). Marine Meteorology and Related Oceanographic Activities Report No. 26, WMO/TD-No. 455, Geneva.

World Meteorological Organization/Intergovernmental Oceanographic Commission, 1995*a*: *Guide to Data Collection and Location Services using Service Argos.* Data Buoy Cooperation Panel Technical Document No. 3, Geneva and Paris.

Всемирная Метеорологическая Организация, 1995*b*: *Наставление по кодам*, тома I.1 и I.2, ВМО-№ 306, Женева.

World Meteorological Organization/Intergovernmental Oceanographic Commission, 1996: *Guide to Moored Buoys and Other Ocean Data Acquisition Systems* (E.A. Meindl). Data Buoy Cooperation Panel Technical Document No. 8, Geneva and Paris.

Всемирная Метеорологическая Организация, 1998: *Руководство по анализу и прогнозированию волнения*. Второе издание, ВМО-№ 702, Женева.

World Meteorological Organization, 1999: *The accuracy of meteorological observations from Voluntary Observing ships: Present status and future requirements* (P.K. Taylor and E.C. Kent). Final Report of the First Session of the Commission for Marine Meteorology Working Group on Marine Observing Systems Subgroup on Voluntary Observing Ships (Athens 1999), WMO TC CMM 1999, Geneva.

Всемирная Метеорологическая Организация, 2001: *Руководство по морскому метеорологическому обслуживанию*. Третье издание, ВМО-№ 471, Женева.

Всемирная Метеорологическая Организация, 2003: *Наставление по глобальной системе наблюдений*. Тома I и II, ВМО-№ 544, Женева.

World Meteorological Organization/Inter-governmental Oceanographic Commission, 2004a: Data Buoy Cooperation Panel: Annual Report for 2003. Data Buoy Cooperation Panel Technical Document No. 25, Geneva and Paris. (available through http://www.jcommops.org/dbcp).

World Meteorological Organization/Intergovernmental Oceanographic Commission, 2004b: Research, Applications and Developments involving Data Buoys. Presentations at the Data Buoy Cooperation Panel Technical Workshop, (Angra Dos Reis, Brazil, October 2003). Data Buoy Cooperation Panel Technical Document No. 24, Geneva and Paris.

World Meteorological Organization/Intergovern-mental Oceanographic Commission, 2009:Surface Velocity Programme Barometer Drifter Design Reference. Data Buoy Cooperation Panel Technical Document No. 4, revision 2.2, Geneva and Paris.

Yelland, M.J., B. I. Moat and P. K. Taylor, 2001: *Air flow distortion over merchant ships*. Progress Report to the Atmospheric Environment Service, Canada, 32 pp. (имеется по адресу http://eprints.soton.ac.uk/67256).

ГЛАВА 5

СПЕЦИАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ПРОФИЛИРОВАНИЯ АТМОСФЕРНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ И ТРОПОСФЕРЫ

5.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Специальные методы профилирования были разработаны для получения данных с высоким временным и пространственным разрешением, которые необходимы для анализа, прогнозирования и научных исследований явлений малого метеорологического масштаба и для различных специальных применений. В настоящей главе дается общий обзор существующих наземных систем, которые можно использовать для этих целей. Глава делится на две основные части: методы дистанционного зондирования и контактные методы измерений. Некоторые из этих методов могут применяться для измерений по всей тропосфере, другие используются в нижней тропосфере, в частности в атмосферном пограничном слое.

Методы дистанционного зондирования основаны на взаимодействии с атмосферой электромагнитной или акустической энергии. При использовании таких методов измерительный прибор и подлежащая измерению переменная разнесены в пространстве в отличие от измерений в точке (in situ или контактные измерения). С прикладной точки зрения эти методы можно разделить на пассивные и активные. Пассивные методы основаны на использовании собственного теплового излучения атмосферы (микроволновые радиометры). Активные системы (содары, радарные ветровые профайлеры, системы радиоакустического зондирования – RASS, и лидары) излучают собственные сигналы и принимают отраженный от различных неоднородностей атмосферы сигнал, несущий информацию об определенных параметрах атмосферы. Эти методы дистанционного зондирования с поверхности Земли описаны в разделе 5.2. Другие методы дистанционного зондирования, о которых говорится в этой главе, описаны в главах 8 и 9 части I.

В разделе 5.3 содержится описание контактных методов наблюдений с помощью приборов, размещенных на различных платформах, с целью проведения непосредственных наблюдений в атмосферном пограничном слое (аэростаты, радиозонды атмосферного пограничного слоя, специально оснащенные башни и мачты, специально оснащенные привязные аэростаты). В главах 12 и 13 части I описываются более широко используемые методы с применением шаров-зондов для проведения измерений профилей структурных параметров атмосферы.

Литература по методам зондирования весьма обширна. С общими вопросами и сопоставлениями можно ознакомиться в книгах Derr (1972), WMO (1980), Martner and others (1993) и в материалах специального выпуска (*Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*) (том II, № 1, 1994).

5.2 МЕТОДЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ С ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

5.2.1 Акустические зонды (содары)

Действие содаров (акустических радаров) основано на эффектах сильного взаимодействия звуковых волн с атмосферой. Согласно теории рассеяния звука, звуковой импульс, излучаемый в атмосферу, рассеивается в ней под влиянием изменений индекса рефракции, вызываемых мелкомасштабными турбулентными флуктуациями температуры и скорости, которые происходят естественным образом в атмосфере и тесно связаны с наличием больших градиентов температуры и влажности в инверсиях. В случае обратного рассеяния (180°) возвратное эхо определяется лишь теми флуктуациями температуры, которые по масштабу составляют половину излучаемой акустической длины волны, а в других направлениях возвратное эхо вызывается колебаниями как температуры, так и скорости, за исключением угла в 90°, когда рассеяние не происходит.

Полезные сведения об акустическом зондировании содержатся в следующих публикациях: Brown and Hall (1978), Neff and Coulter (1986), Gaynor, Baker and Kaimal (1990) and Singal (1990).

Разработано несколько различных типов акустических содаров, но оперативное применение нашли два обобщенных типа – моностатический содар и моностатический доплеровский содар.

Моностатический содар состоит из вертикально направленного источника пульсирующего звука и расположенного в том же месте приемника. Небольшая часть каждого звукового импульса рассеивается обратно в приемник под воздействием тепловых флуктуации, происходящих естественным образом в воздухе. Приемник измеряет интенсивность отраженного акустического

сигнала. Как и в обычном радиолокаторе, временная задержка между передачей импульса и приемом эха указывает на дальность до цели. В бистатическом содаре приемник расположен на некотором удалении от излучателя (разнесенный прием), что необходимо для приема сигналов, вызываемых флуктуациями скорости.

Моностатический доплеровский содар наряду с измерением интенсивности отраженного сигнала также анализирует частотный спектр передаваемых и принимаемых сигналов для определения сдвига доплеровской частоты между передаваемым и обратно рассеянным звуком. Это различие возникает в связи с движением температурных флуктуаций в воздухе и позволяет измерять радиальную скорость ветра в атмосфере. В доплеровском содаре, наиболее широко используемом для измерения ветра, для определения компонентов ветра в трех направлениях обычно используются три луча: один направлен вертикально, а два других отклонены от вертикали. По этим компонентам рассчитываются вертикальная и горизонтальная составляющие ветра. Векторно ветер может быть представлен на графике «время-высота» с шагом по высоте 30 – 50 м.

Максимальная высота, достигаемая акустическими содарами, зависит от параметров системы, но изменяется также в зависимости от атмосферных условий (например, от наличия температурных инверсий). Имеющиеся в продаже системы могут обычно достигать высоты зондирования 600 м и более с разрешением по высоте в несколько десятков метров.

Содар может иметь следующие характеристики:

Параметр	Типовое значение
Частота импульса	1 500 Гц
Длительность импульса	0,05 – 0,2 сек
Период повторения	2 – 5 сек
Ширина луча	15°
Акустическая мощность	100 Вт

Моностатические содары обычно дают возможность построить график время-высота для мощности обратно рассеянного эхо-сигнала. Такие графики содержат ценную информацию о внутренней структуре атмосферного пограничного слоя и могут в принципе использоваться как для мониторинга высоты инверсии и глубины слоя перемешивания (характеризующих состояние устойчивости атмосферы), так и для мониторинга глубины тумана. Однако правильная интерпретация таких графиков требует значительного опыта и глубоких знаний, а также, желательно, дополнительной информации, основанной на данных контактных измерений в совокупности со знанием общей метеорологической ситуации.

Системы моностатических доплеровских содаров обеспечивают измерения профилей ветра, а также информацию об интенсивности температурных инверсий. Такие системы представляют собой экономически эффективный метод получения данных о ветре в атмосферном пограничном слое и особенно пригодны для непрерывного мониторинга температурных инверсий и ветра вблизи промышленных предприятий, где существуют потенциальные проблемы загрязнения.

Основным ограничением применения содаров, помимо ограниченного охвата по высоте, является их чувствительность к шумовым помехам. Они могут вызываться воздушным движением, осадками или сильным ветром. Такое ограничение не позволяет использовать содары в качестве всепогодных систем. Содары сами излучают звук, характер и уровень которого может раздражать проживающих неподалеку людей, что исключает их использование в условиях урбанизированной окружающей среды, пригодной по другим параметрам.

В некоторых системах для снижения влияния внешних источников шума и уменьшения раздражающего воздействия на людей используется поглощающая пена. Однако физические свойства такой пены изменяются со временем, и ее необходимо периодически заменять для предотвращения ухудшения характеристик прибора.

5.2.2 Радиолокаторы для измерения профилей ветра

Измерители профилей ветра представляют собой доплеровские радиолокаторы очень высокой частоты (ОВЧ, международное стандартное сокращение-V.H.F., диапазон частот от 30 до 300 МГц) и ультравысокой частоты (УВЧ , международное стандартное сокращение U.H.F., диапазон частот от 300 до 3 ГГц), сконструированные для измерения профиля ветра при любых метеорологических условиях. Эти радиолокаторы регистрируют обратное рассеяние сигналов под влиянием неравномерностей индекса рефракции, вызванных турбулентными вихрями в масштабах половины длины волны, излучаемой радиолокатором (условие Брэгга). Поскольку турбулентные вихри перемещаются со средней скоростью ветра, скорость их поступательного движения является непосредственной мерой среднего вектора скорости. В отличие от традиционных метеорологических радиолокаторов, они способны проводить измерения даже при отсутствии осадков и облаков. Ветровые радиолокационные профайлеры обычно измеряют радиальную скорость воздуха в трех или более направлениях – вертикально и при отклонении 15° от вертикали в северном и восточном

Параметр профайлера	*Стратосфера*	*Тропосфера*	*Нижняя тропосфера*	*Атмосферный пограничный слой*
Частота (МГц)	50	400	400	1 000
Пиковая мощность (КВт)	500	40	2	1
Высотный диапазон (км)	3–30	1–16	0,6–5	0,3–2
Вертикальное разрешение (м)	150	150	150	50–100
Тип антенны	Поле диполей	Поле диполей	Поле диполей	Зеркальная антенна или фазированная решетка
Размер антенны	100 100	10 10	6 6	3 3
Эффект воздействия дождя или снега	Слабый	Сильный	Сильный	Очень сильный

направлениях. На основе измерения этих компонентов определяют горизонтальную и вертикальную составляющие ветра. Упрощенные системы позволяют измерять радиальную скорость лишь в двух направлениях при отклонении от вертикали. При этом, предполагая, что вертикальная составляющая скорости ветра пренебрежимо мала, определяют только горизонтальную составляющую скорости ветра. Четырехлучевой ветровой профайлер имеет большее практическое значение, чем трехлучевой, поскольку на процесс измерения не оказывает существенного воздействия вертикальный ветер (Adachi и др., 2005).

Дополнительные сведения можно найти в публикациях: Gossard and Strauch (1983), Hogg and others (1983), Strauch and others, (1990) Weber and Wuertz (1990) and WMO (1994).

Согласно природе механизма рассеяния, радиолокаторы, измеряющие профиль ветра, должны функционировать в полосе частот 40 – 1 300 МГц. При частотах выше 1 300 МГц характеристики радиолокатора значительно ухудшаются из-за резкого повышения поглощения радиоволн более высоких частот в атмосфере. Выбор рабочей частоты осуществляется с учетом требуемой высоты зондирования и вертикального разрешения. На практике системы выпускаются для трех полос частот – около 50, 400 и 1000 МГц, и эти системы работают в низком режиме (более короткий импульс – меньшая высота) и высоком режиме (более длительный импульс – большая высота), достигая большей вертикальной дальности в ущерб вертикальному разрешению. В приведенной ниже таблице представлены типовые характеристики.

Ветровые профайлеры способны работать без персонала и проводить непрерывные наблюдения за ветром почти непосредственно над точкой расположения. Эти особенности составляют их принципиальное преимущество перед системами измерения ветра, основанными на использовании радиозондов.

Любой конкретный ветровой профайлер имеет минимальную и максимальную дальность, ниже и выше которых измерения проводиться не могут. Минимальная дальность измерений зависит от длительности передаваемого импульса, времени восстановления радиолокационного приемника, а также от мощности мешающих эхо-сигналов от близлежащих объектов на Земле. Таким образом, размещать ветровые профайлеры нужно так, чтобы свести к минимуму эхо-сигналы от местных объектов. Часто для размещения ветровых профайлеров выбирают долины или впадины, с тем чтобы поверхность земли была видна только на очень небольшом расстоянии. Эти соображения особенно важны для стратосферных ветровых профайлеров. Влияние отражений от мешающих объектов на поверхности земли на более высокочастотные радиолокаторы может быть уменьшено с помощью соответствующей защиты.

Сигнал, принимаемый ветровым профайлером, как правило, уменьшается с увеличением высоты, что в конечном итоге ограничивает высоту, до которой он может проводить измерения. Эта максимальная дальность, зависящая от характеристик радиолокатора, возрастает при увеличении произведения средней мощности передатчика на апертуру антенны, но ее абсолютное ограничение определяется используемой частотой радиолокатора. Эти факторы означают, что крупные и мощные стратосферные ветровые профайлеры способны проводить измерения до самых больших высот. Однако для конкретного профайлера максимальная высота значительно изменяется в зависимости от метеорологических условий, и бывают случаи, когда возникают пробелы в данных на меньших высотах.

В связи с важностью проведения измерений до максимально возможной высоты ветровой

профайлер в течение нескольких минут собирает данные, с тем чтобы интегрировать полученные слабые сигналы. Обычно требуется 6 – 12 минут для проведения трех серий наблюдений, необходимых для измерения скорости ветра. Во многих системах такие наблюдения объединяются для получения ежечасного измерения.

Поскольку ветровые профайлеры чувствительны к весьма слабым отраженным сигналам от атмосферных неоднородностей, они могут также обнаруживать сигналы от самолетов, птиц и насекомых. Как правило, такие ложные сигналы „вводят в заблуждение» и могут привести к ошибочным данным о ветре. В таких случаях сравнивается или комбинируется несколько независимых измерений, для того чтобы либо убедиться в согласованности измерений, либо отвергнуть ложные данные.

В полосах частот 1 000 МГц и 400 МГц осадки, вероятно, представляют собой более крупную цель, чем неоднородности индекса рефракции. Следовательно, полученная в результате измерений вертикальная скорость зависит от рефракции и не может использоваться в оперативных целях.

Крупные стратосферные ветровые профайлеры стоят дорого, и для них требуются антенны (в виде поля излучателей) большого размера, как правило, 100 x 100 м, а также относительно мощные передатчики. Ввиду больших размеров часто бывает затруднительно найти для них соответствующую площадку, а их разрешение по высоте и минимальные возможные высоты измерений недостаточно хороши для некоторых применений. Преимущество их заключается в том, что они позволяют регулярно проводить измерения ветра до высоты более 20 км, и эти измерения не подвергаются влиянию никаких погодных явлений за исключением самых сильных ливней.

Для синоптических и мезомасштабных измерений, очевидно, наиболее подходят тропосферные ветровые профайлеры, работающие в полосе частот 400 – 500 МГц. Размеры их невелики, и они почти не подвержены влиянию осадков.

Ветровые профайлеры атмосферного пограничного слоя не так дороги, для них не требуется больших антенн. Вертикальная скорость не может быть измерена в дожде, но дождевые капли увеличивают радиолокационный вертикальный разрез атмосферы, что фактически приводит к увеличению полезного диапазона по вертикали для измерения горизонтального ветра.

Ветровые радиолокационные профайлеры – активные устройства, и получение необходимого разрешения на использование частот – серьезная проблема во многих странах. Однако вопрос о распределении частот для работы таких профайлеров активно рассматривается на национальном и международном уровне.

5.2.3 Радиоакустические системы зондирования

Радиоакустическая система зондирования (RASS) используется для измерения профиля виртуальной температуры в нижней тропосфере. С помощью доплеровского микроволнового радиолокатора прослеживается короткий акустический импульс высокой интенсивности, который излучается из того же места вертикально в атмосферу. Методика измерения основана на том, что акустические волны являются продольными и обуславливают изменения плотности окружающего воздуха. Эти изменения приводят к соответствующим изменениям локальных значений индекса рефракции атмосферы, что, в свою очередь, вызывает обратное рассеяние электромагнитной энергии, излучаемой микроволновым доплеровским радиолокатором, которая распространяется вместе с акустическим импульсом. Микроволновый радиолокатор измеряет скорость распространения этих возмущений индекса рефракции, набирающих высоту с локальной скоростью звука. Длина акустической волны выбирается так, чтобы она укладывалась в половине длины волны микроволнового радиолокатора (условие Брэгга), в этом случае энергия, обратно рассеянная от нескольких акустических волн, согласованным образом суммируется в приемнике, значительно увеличивая мощность отраженного сигнала. На основе измерения скорости распространения акустического импульса можно рассчитать виртуальную температуру, поскольку она пропорциональна квадрату разности скорости распространения импульса и вертикальной скорости движения воздуха.

По этой методике имеется обширная литература, в частности работы May и др. (1990), Lataitis (1992*a*; 1992*b*) and Angevine и др. (1994).

Для получения профиля виртуальной температуры разработаны разнообразные экспериментальные методы с применением качающейся акустической частоты. Однако для практического применения предстоит разработать ветровые профайлеры повышенной мощности и чувствительности. Разработано несколько RASS, в которых к радиолокаторам профилей упомянутого выше типа добавлены акустический источник и соответствующая обработка данных. Для частот радиолокатора 50, 400 и 1 000 МГц требуются акустические частоты порядка 110, 900 и 2 000 Гц. На частоте 2 000 Гц

высота зондирования ввиду акустического ослабления, как правило, ограничена 1 – 2 км. На частоте 900 Гц в применяемых на практике системах высота зондирования может достигать 2 – 4 км, а на частоте 110 Гц при использовании крупных профайлеров с частотой 50 МГц максимально достижимая высота зондирования при благоприятных условиях может составлять 4 – 8 км.

Сравнения с радиозондовыми измерениями показывают, что при хороших условиях виртуальная температура может измеряться с точностью до 0,3 °C с разрешением по высоте 100 – 300 м. Однако при сильном ветре и осадках точность таких измерений может резко уменьшиться.

Измерения с помощью RASS – перспективный метод получения профилей виртуальной температуры, но потребуются дополнительные исследования, прежде чем их можно будет с уверенностью использовать на оперативной основе в диапазонах высоты, разрешения и точности, которые отвечают требованиям пользователей.

5.2.4 Микроволновые радиометры

Тепловое излучение в микроволновом диапазоне формируется в атмосфере главным образом молекулярным кислородом, водяным паром и жидко-капельной влагой и зависит от их температуры и пространственного распределения. Для такого газа, как молекулярный кислород, распределение которого по высоте при заданном приземном давлении хорошо известно, тепловое излучение содержит информацию, прежде всего, о температуре атмосферы. Вертикальные профили температуры в нижней атмосфере могут быть получены с помощью наземных пассивных микроволновых радиометров, измеряющих микроволновое тепловое излучение молекулярного кислорода в спектральной полосе частот около 60 ГГц. Спектральные измерения в верхней части полосы частот 22 – 30 ГГц, которая расширяется с ростом давления в условиях абсорбции излучения водяными парами, дают информацию о количестве водяного пара, жидко-капельной влаги и вертикальном распределении водяного пара. Кроме того, спектральные измерения в двух полосах в комбинации с измерениями температуры облаков инфракрасного спектра дают информацию о совокупном объеме и вертикальном распределении жидко-капельной влаги. Дополнительные сведения можно почерпнуть в публикациях Hogg и др. (1983) и Westwater, Snider и Falls (1990), Solheim и др. (1998), Ware и др. (2003) и Westwater и др. (2005).

Спутниковые микроволновые радиометры , работающие на различных частотах, максимально чувствительны к температуре в конкретных диапазонах атмосферного давления. График чувствительности как функции давления представляет собой колоколообразную кривую (весовая функция). Частоты спутниковых радиометров выбираются таким образом, чтобы пики весовых функций были оптимально распределены по высотам, представляющим интерес. Профили температуры над атмосферным пограничным слоем рассчитывают с помощью численных методов решения обратных задач, используя измеренное излучение и весовые функции. Относительно большая ширина весовых функций и излучение земной поверхности не позволяют получить точные профили температуры вблизи поверхности Земли в атмосферном пограничном слое при зондировании с использованием космических радиометров.

Достаточно изучены принципы наземного зенитного микроволнового радиометрического зондирования температуры и влажности. Температурные весовые функции вертикально направленных зондирующих радиометров имеют узкие пики у поверхности земли, величина которых снижается с высотой. Кроме того, чувствительность к эмиссиям молекулярного кислорода и водяного пара не ухудшается излучением от поверхности земли. Это дает возможность получения точных данных о температуре и влажности при относительно высоком разрешении в атмосферном пограничном слое и нижних слоях тропосферы. Методы обращения для вертикально направленных микроволновых радиометров основаны на климатологии температур и влажности для данного места, которая, как правило, определяется по данным радиозондов.

Наземные и спутниковые микроволновые радиометры эффективно дополняют друг друга. Спутниковые измерения обеспечивают приблизительное разрешение во времени и пространстве в верхних слоях тропосферы, а наземные измерения дают высокое разрешение во времени и пространстве в атмосферном пограничном слое и нижней тропосфере. Полученные наземными радиометрами наборы данных можно использовать в цифровых моделях погоды для уточнения краткосрочных прогнозов (1 – 12 ч) путем предоставления данных по верхним слоям воздуха в интервале между измерениями радиозондов. Или же приблизительные значения радиояркостных температур, полученные наземными радиометрами, могут непосредственно вводиться в цифровые модели погоды. Такой подход улучшает результаты путем избежания ошибок, возникающих в процессе решения обратных задач для получения профиля метеорологических параметров. Подобный метод включения приблизительных данных излучения спутникового радиометра

непосредственно в погодные модели продемонстрировал несколько лет назад более точные результаты и сейчас широко используется.

Основные преимущества наземных микроволновых радиометров заключаются в их способности проводить непрерывные измерения по времени и в их способности измерять водозапас облаков. Непрерывные измерения температуры, влажности и жидко-капельной составляющей облаков можно использовать для уточнения ноукастинга и краткосрочных прогнозов осадков. Эти непрерывные измерения можно также использовать для обнаружения тенденции или времени изменения зафиксированных изменений температуры (для исследований по выбросам газов, загрязнению воздуха, по определению тепловых выбросов городов, для прогнозов неблагоприятных условий погоды и для выпуска предупреждений) (Kadygrov, Shur и Viazankin, 2003).

В ходе длительных арктических исследований, исследований на средних широтах и в тропиках были широко продемонстрированы надежность и точность микроволновых радиометров, обеспечивающих получение профилей метеорологических параметров (Güldner и Spänkuch, 2001; Liljegren и др., 2005). Результаты 13-месячной эксплуатации радиометрических приборов MP3000 (Gaffard и Hewison, 2003) демонстрируют, что значение среднего квадратичного отклонения разницы температуры, полученной радиозондом, и температуры, полученной микроволновым радиометром, находится в диапазоне 0,5 К (у поверхности земли) – 1,8 К (на высоте 5 км). Опыт Гюлднера и Шпанкула (Güldner и Spänkuch, 2001), которые использовали радиометрические приборы TP/WVP-3000 в течение 18 месяцев и ежедневно проводили сравнение полученных данных с данными радиозонда, говорит о схожих значениях среднего квадратичного отклонения в диапазоне 0,6 К (у поверхности земли) – 1,6 К (на высоте 7 км в летнее время и 4 км в зимнее время). Величина среднего квадратичного отклонения данных по водяному пару не превышает 1 г/м^3 на всех высотах (Gaffard и Hewison, 2003; Güldner и Spänkuch, 2001).

Наземные микроволновые радиометры, дающие профили метеорологических параметров, демонстрируют существенные экономические и практические преимущества во всех случаях, когда требуются измерения температуры, влажности и водозапаса облаков нижней тропосферы с высоким временным разрешением и в тех случаях, когда умеренное вертикальное разрешение является приемлемым. За последние несколько лет рыночные цены на радиометры, регистрирующие профили данных, существенно снизились и в настоящее время ниже средней ежегодной цены рабочей силы и материалов для проведения измерений радиозондом два раза в сутки.

5.2.5 Лазерные локаторы (лидары)

Электромагнитная энергия в оптическом диапазоне длин волн и вблизи него (от ультрафиолетового через видимый диапазон к инфракрасному), генерируемая лазерами, рассеивается молекулами атмосферного газа и взвешенными частицами. Такого рассеяния достаточно, чтобы применить принцип локации для проведения наблюдений в атмосфере с помощью лидара (LIDAR-Light Detection And Ranging , дословно обнаружение света и дальнометрия). Оптическое рассеяние можно в целом разделить на упругое и неупругое. Когда длина волны излучения лазера, рассеянной атмосферными составляющими, отличается от первоначальной длины волны лазера, процесс называется упругим рассеянием. Наиболее широко применяемым процессом упругого рассеяния, используемым в экспериментальных атмосферных лидарных системах, является рассеяние Рамана, которое представляет собой результат обмена энергией между потоком падающих фотонов и молекулярным ротационным и вибрационным состояниями рассеивающих молекул. В процессе неупругого рассеяния длины падающей и рассеянной волн одинаковы. Это может быть рассеяние Рэлея или Ми, что зависит от разновидностей частиц и их размеров по отношению к длине падающей волны лазера (см. главу 9 части II). Оба эти основных процесса рассеяния могут происходить в атмосфере одновременно.

Дополнительную информацию можно почерпнуть в работах Hinkley (1976), WMO (1982), Thomas (1991) и Syed Ismael и Browell (1994).

Большинство лидаров действует в моностатическом режиме, при котором приемник расположен в том же месте, что и лазерный передатчик. В типичной лидарной системе для излучения импульсов когерентного света в атмосферу используется импульсный лазер. Средняя мощность используемых лазеров варьирует от нескольких милливатт до десятков ватт. Оптический телескоп, установленный рядом с лазером, используется для захвата энергии обратного рассеяния. Свет, собираемый телескопом, фокусируется на фотоумножитель или фотодиод. Полученная информация обычно поступает на электронно-лучевую трубку для оперативного мониторинга и далее в компьютер для более детального анализа.

Величина обратного сигнала зависит как от величины рассеяния от цели, так и от двустороннего ослабления между лидаром и целью – такое

ослабление зависит от части энергии луча, рассеянной на его пути, и от поглощения атмосферными газами. Процессы рассеяния и поглощения используются в различных лидарах для проведения разнообразных измерений.

Лидары, основанные на неупругом рассеянии (их называют лидарами Рэлея или Ми либо просто лидарами), используются, главным образом, для исследований облаков и аэрозолей. Измерение высоты нижней границы облаков с помощью лидара является очень простым: можно легко выявить быстрое увеличение сигнала, которое вызывает обратное рассеяние от нижней границы облаков, и, измерив время прохождения лазерного импульса от передатчика до нижней границы облаков и обратно в приемник, можно определить высоту нижней границы облаков (см. главу 15 части I).

Лидары используются также для обнаружения аэрозоля, присутствующего в относительно чистом воздухе, и для составления карт некоторых структурных особенностей, таких как термическая устойчивость и высота инверсий. Содержание природного аэрозоля в нижней атмосфере достаточно велико, что позволяет лидарам непрерывно измерять скорость движения воздуха в отсутствие осадков, подобно метеорологическим радиолокаторам. Их можно также использовать для составления карт и измерения концентраций антропогенных частиц, например тех, которые поступают в атмосферу из промышленных дымовых труб.

Лидарные наблюдения внесли весомый и наиболее документированный вклад в исследования концентраций стратосферных аэрозольных частиц, на которые оказывают сильное влияние крупные вулканические извержения. Эти частицы играют важную роль в глобальном радиационном балансе.

Гораздо труднее получить количественные данные об облаках ввиду изменений формы и распределения капель, содержания воды, различий между водой, льдом и смешанными фазами, а также свойств взвешенных частиц и аэрозолей. Действительно, такие измерения требуют комплексных многопараметрических исследовательских систем, проводящих несколько измерений одновременно с использованием гипотез, описывающих оптические свойства среды, и сложных математических методов преобразования данных.

Дифференциальный абсорбционный лидар (DIAL) основан на использовании сильной зависимости изменения коэффициента поглощения атмосферных газов от длины волны. Система DIAL обычно использует лазер, который может быть настроен на две близко расположенные частоты, одна из которых энергично поглощается частицами газа, а другая нет. Различие в результатах измерений как функция частоты может быть использовано для оценки концентрации исследуемого газа. Это наиболее перспективный метод дистанционного зондирования для определения состава атмосферы, успешно использовавшийся для измерения концентраций воды, диоксида серы, диоксида азота и в особенности озона.

Применение Рамановского рассеяния представляет особый интерес ввиду того, что рассеянная радиация сдвинута по частоте, и этот сдвиг зависит от вида молекул (линии Стокса). Мощность сигнала обратного рассеяния связана с концентрацией этих молекул. Рамановские лидары не требуют специальной длины волны или настройки лазера; длины волн лазера могут быть выбраны в части спектра, свободной от атмосферного поглощения. С помощью измерения спектра Рамана можно проводить измерения выборочных составляющих атмосферы с пространственным разрешением, что использовалось для получения тропосферных профилей водяного пара, молекулярных азота и кислорода и малых газовых составляющих атмосферы. Основные недостатки сводятся к малой чувствительности на большом расстоянии ввиду малых поперечных сечений рассеяния и потребности в лазерах высокой мощности, что небезопасно для глаз при практическом применении.

Лидарные системы предоставляют большой объем полезной информации для научных исследований, однако их эксплуатация имеет ограничения. Это связано с тем, что они относительно дороги и для их разработки, установки и эксплуатации требуется весьма квалифицированный персонал. Кроме того, некоторые лидары могут работать лишь при определенных условиях, таких как ночные измерения либо отсутствие осадков.

5.3 КОНТАКТНЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

5.3.1 Шаропилотные наблюдения

Шаропилотные наблюдения часто используются для получения данных о ветре в атмосферном пограничном слое и обычно выполняются с помощью оптических теодолитов или радиолокаторов слежения. В главе 13 части I представлено более общее описание средств для измерения ветра.

При проведении зондирования в нижней тропосфере желательно, чтобы скорость подъема шара

была невелика, что позволяет иметь большее число точек измерений по вертикали. Уменьшение скорости подъема достигается либо с помощью тормозного парашюта, либо подбором оптимального соотношения веса и объема оболочки..

Для слежения с помощью радиолокатора под шаром подвешивается небольшая радиолокационная мишень (пассивный радиолокационный отражатель -как правило, металлизированный уголок). При зондировании в нижней тропосфере радиолокатор должен обеспечивать измерение данных с короткими интервалами, равными 100 м; при этом в идеале следовало бы запускать шар с площадки, отдаленной от локатора в подветренном направлении на расстояние, превышающее этот минимальный интервал.

Основные измерения ветра могут проводиться с использованием одного оптического теодолита, но для того, чтобы получить достаточно точные профили ветра, требуется двухтеодолитная система. Базисная линия между теодолитами должна превышать один километр. Для облегчения процесса зондирования, а также для обеспечения большей точности определения высоты теодолиты должны быть оснащены компьютерными интерфейсами для своевременного ввода данных и проведения необходимых расчетов. При хороших условиях видимости профили можно получать до высоты 3000 м. Однако этот метод непригоден при неблагоприятных условиях – при выпадении осадков, низкой облачности или тумане.

Разумеется, существует возможность получения дополнительных данных о ветре в нижней атмосфере с использованием обычных радиозондов – это проведение более частых измерений в течение первых нескольких минут нормального полного зондирования, т. е. от 2 до 10 измерений в минуту.

5.3.2 Радиозонды атмосферного пограничного слоя

Обычные радиозондовые системы подробно описаны в главе 12 части I. Для проведения наблюдений в атмосферном пограничном слое и нижней тропосфере разработаны специальные радиозонды. Они отличаются от обычных радиозондов тем, что обеспечивают повышенную чувствительность и позволяют проводить более частые измерения. Такие радиозонды обычно используются для измерения профилей температуры, влажности и ветра в слое от поверхности Земли до высоты обычно 3 – 5 км.

Скорость вертикального подъема таких радиозондов обычно устанавливается между 150 и 200 м/мин, т. е. подъем происходит значительно медленнее, чем в случае обычных радиозондов. Медленный подъем позволяет более детально измерять вертикальные профили. Скорость подъема обычно определяется выбором оболочки соответствующих размеров, но может изменяться путем применения тормозного парашюта.

Поскольку приборы должны достигать лишь ограниченной высоты, они обычно могут подниматься с помощью шаропилотной оболочки. В остальном процесс зондирования и обработки данных почти тот же самый, что и при обычном радиозондировании.

В случае зондирования до высоты не более 2 000 м можно обойтись без датчика давления, в результате чего радиозонд станет более простым и дешевым. Имеются также еще более простые системы, которые измеряют только температуру.

К радиозондам атмосферного пограничного слоя предъявляются следующие основные требования:

Переменная	*Рабочий диапазон*	*Разрешение*
Давление	о т 1 050 до 500 гПа	±0,5 гПа
Температура	+40° до –40°C	±0,1 K
Влажность	100 до 20 (или 10)%	±2 %
Скорость ветра	0,5 до 60 м/с	±0,5 м/с
Направление ветра	0° – 360°	±5°

Измерения обычно производятся по крайней мере каждые 30 с для получения вертикального разрешения от 50 до 100 м.

5.3.3 Специально оснащенные вышки и мачты

Специально оснащенные вышки и мачты используются для многих целей, особенно для оценки распространения атмосферного загрязнения. Этот вопрос обсуждается в работе Panofsky (1973).

Для некоторых целей высота мачты может достигать 100 м, а при мониторинге загрязнения воздуха и осуществлении проектов контроля она должна превышать высоту основных источников загрязнения минимум на 50 м.

Измерение температуры, влажности и ветра следует производить на нескольких уровнях (как минимум на двух-трех), самый нижний из которых должен находиться на уровне стандартной

метеорологической будки, расположенной поблизости от вышки или мачты. Число уровней зависит от поставленной задачи и от высоты вышки или мачты. Измерение только на двух уровнях не обеспечивает получения информации для построения вертикального профиля метеорологических элементов и поэтому используется очень ограниченно. Как правило, число уровней измерения при исследовательских работах больше, чем при стандартных наблюдениях.

Обычно данные обрабатываются и представляются автоматически вместе с разностями между уровнями, которые характеризуют метеорологические условия. Если данные предназначаются для непосредственного использования неметеорологами, например специалистами, отвечающими за контроль поддержания уровней загрязнения воздуха в безопасных пределах, они часто подвергаются дальнейшей обработке на компьютере для получения производных величин, легко применимых к решаемой задаче.

Как правило, для измерения на вышках и мачтах используются следующие датчики:

(a) температура: термометры сопротивления или термопары в защитных экранах, аспирационные или неаспирационные;
(b) влажность: психрометры, электрохимические или электромеханические датчики в защитных экранах;
(c) ветер: чашечные и лопастные вертушки, звуковые или тепловые устройства.

Все датчики должны иметь линейные или линеаризованные характеристики, а их постоянные времени должны быть достаточно малы, чтобы полученные данные адекватно отражали локальные изменения метеорологических элементов.

Важно, чтобы конструкция башни или мачты не оказывала значительного влияния на датчики и результаты измерений. Для открытых конструкций длина стационарных или выдвижных стрел должна составлять не менее двух метров; при этом желательно, чтобы длина стрелы давала возможность разместить датчики на расстоянии от вышки или мачты, равном как минимум десяти диаметрам вышки. Для жестких конструкций или в случае невозможности соблюдения требуемой длины стрел на каждом уровне необходима двойная система, при которой стрелы располагаются на противоположных сторонах вышки или мачты и длина их должна превышать диаметр конструкции минимум в три раза. Измерения в конкретный момент производятся только теми датчиками, которые расположены с наветренной стороны.

Иногда, в особых ситуациях, вышки можно использовать для получения профилей метеоэлементов, не устанавливая фиксированных датчиков; при этом используется упрощенный метод зондирования. Как можно выше укрепляется блок с веревкой, достигающей уровня земли. С помощью этой веревки посредством ручной или механической лебедки радиозонд перемещается по вертикали на требуемые уровни. С радиозонда, оснащенного ветровыми датчиками, данные передаются на соответствующую приемную наземную систему. При этом можно достичь существенно большего вертикального разрешения и получить более подробную информацию, чем при установке стрелы, причем можно также определить высоты с наиболее значимыми характерными особенностями. Однако длительное наблюдение возможно только на одном уровне.

При некоторых погодных условиях высота башни может оказаться недостаточной для точного определения протяженности распространения загрязнения. В таких случаях, если в пределах 50 км от башни нет станции радиозондирования, должно быть установлено специальное оборудование для проведения локальных зондирований возле башни или мачты до высоты около 3 000 м. Помимо главной цели, полученные данные могут дополнять информацию основной аэрологической сети, а также служить для более детального изучения местных погодных явлений.

Измерительное оборудование на башнях требует периодической проверки высококвалифицированным обслуживающим персоналом, которому следует обращать особое внимание на состояние и функционирование датчиков, регистраторов, а также соединительных проводов, вилок и розеток, подвергающихся воздействию внешних погодных условий.

5.3.4 Специально оснащенные привязные аэростаты

Привязные аэростаты в основном применяются для измерения профилей температуры, влажности и ветра (и их краткосрочных изменений) от поверхности Земли до высоты около 1 500 м, а также для долговременного исследования метеорологических условий на одном или нескольких выбранных уровнях. Необходимые для этого датчики подвешиваются в одном или нескольких специальных контейнерах под аэростатом или прикрепляются зажимом к тросовому кабелю. Их сигналы передаются на Землю по радио или по проводам, вмонтированным в тросовый кабель. Эта методика описана в работе Thompson (1980).

В системах привязных аэростатов, как правило, используются либо большие (приблизительно 600 м^3), либо малые (приблизительно 10–100 м^3) аэростаты. Малые аэростаты обычно используются для получения профилей, а большие – для производства измерений на нескольких уровнях. Оболочки для привязных аэростатов должны конструироваться таким образом, чтобы обеспечивать хорошую обтекаемость и достаточную подъемную силу. Они обычно наполняются гелием. Большие аэростаты должны поднимать груз до 50 кг (в дополнение к тросовому кабелю) на высоту 1 500 м. Должна быть обеспечена возможность проведения измерений при скорости ветра до 5 м/с у поверхности Земли и до 15 м/с на высотах рабочего диапазона. Во избежание обрыва тросовый кабель большой оболочки должен выдерживать нагрузку 2 000–3 000 кг (200–300 кг для малых оболочек).

Запуски привязных аэростатов должны производиться в соответствии с национальными правилами обеспечения безопасности полетов авиации. С этой целью, а также для удобства обслуживания персоналом настоятельно рекомендуется использовать оболочки хорошо различимых цветов, а также предупредительные огни в ночное время. Наличие автоматического устройства для быстрого выпуска газа из оболочки обязательно, наличие металлизированной радиолокационной мишени, подвешенной под аэростатом, желательно.

Основными факторами, влияющими на возможность запусков привязных аэростатов, являются скорость ветра на высотах, турбулентность вблизи поверхности Земли и молнии.

Лебедки, использующиеся для управления аэростатом, могут быть ручными или электрическими. Должна быть обеспечена подача кабеля по крайней мере двумя скоростями (например, 1 и 2 м/с). Кроме того, лебедка должна быть оснащена тормозом, счетчиком длины кабеля и измерителем натяжения. Для защиты от атмосферных разрядов лебедка должна быть заземлена, независимо от того, электрическая она или нет.

Использование кабелей для передачи сигналов датчика на Землю нежелательно по нескольким причинам. Как правило, предпочтительно использовать специальные радиозонды. Такие радиозонды позволяют получить лучшее разрешение, чем используемые в нормальных условиях для свободных полетов. Датчики для измерения температуры и влажности должны иметь защиту от солнечной радиации и дождя, но в то же время обеспечивающую необходимую вентиляцию. Для измерения скорости и направления ветра необходимы дополнительные датчики.

Основные требования сводятся к следующему:

Переменная	*Рабочий диапазон*	*Разрешение*
Давление	1 050 до 850 гПа	±0,5 гПа
Температура	+40° до –20°C	±0,1 K
Влажность	100 до 20 (или 10)%	±2%
Скорость ветра	0,5 до 15 м/см	±0,5 м/с
Направление ветра	0° to 360°	±1°

Для телеметрии может использоваться одна из стандартных частот радиозондов; как правило, выбирается частота 400 МГц. Максимальная масса, включая массу батареи, должна быть заведомо меньше грузоподъемности аэростата, т. е., как правило, не более 5 кг. Радиозонд подвешивается под оболочкой на расстоянии от нее не менее трех ее диаметров в устойчивом положении так, чтобы обеспечивались надлежащие защита и вентиляция.

Основная трудность, с которой сталкиваются при измерениях турбулентных, а не средних значений величин, связана с влиянием вибрации кабеля и движением аэростата при измерениях. Для таких измерений должна применяться специальная методика.

В состав наземного оборудования должны входить приемник и регистратор. Данные обычно обрабатываются с помощью небольшого компьютера.

Зондирование может производиться во время подъема или спуска аэростата либо непрерывно, либо с остановками на выбранных уровнях. Для нескольких нижних уровней высоту можно определить по длине вытравленного троса, но на более высоких уровнях этот способ весьма приблизителен, поэтому необходим какой-то другой метод определения высоты. Ее можно определить путем вычисления с помощью уравнения гидростатики, используя наблюдаемое распределение давления, температуры и влажности. Таким образом, приращение в геопотенциальных метрах от уровня n до уровня n+1 выражается формулой:

$$29{,}27\ T_v \ln\left(p_n / p_n + 1\right)$$

где T_v – среднее значение виртуальных температур на уровнях n и $n + 1$; и p_n и $p_n + 1$ – два последовательных значения давления. Если нужен перевод геопотенциальных метров в геометрические, то это легко сделать, используя Смитсонианские метеорологические таблицы, но, как правило, этого не требуется. Высота барометра, расположенного на

станции, берется в этих расчетах за исходный уровень.

Если наблюдение метеорологических переменных ведется методом площадок, следует производить несколько серий измерений на каждом уровне. Время, требуемое для стабилизации датчиков, составляет от 2 до 3 минут. В этом случае полный цикл зондирования занимает от получаса до часа. Для всех радиозондов непосредственно перед использованием обязательно проводится проверка в контрольной будке для определения разностей в показаниях с барометром и аспирационным психрометром. Подобную проверку следует проводить также сразу после выполнения зондирования. Как и при регулярных подъемах радиозондов, данные на уровне расположения станции следует определять не по результатам радиозондирования, а традиционными приборами в стандартной метеорологической будке.

При обработке данных зондирования на каждом уровне определяются средние значения давления, температуры и влажности. Для скорости ветра средние значения следует рассчитывать за период 100 или 120 с. Если направление ветра не измеряется непосредственно, то грубо его можно оценить по ориентации продольной оси аэростата по отношению к истинному северу. Погрешность этого метода составляет ±30°.

Следует подчеркнуть, что наблюдатели должны извещать диспетчерские службы авиации о своих планах и получать разрешение на каждое зондирование или на серию зондирований с использованием привязных аэростатов.

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Adachi, A., T. Kobayashi, K.S. Gage, D.A. Carter, L.M. Hartten, W.L. Clark and M. Fukuda, 2005: Evaluation of three-beam and four-beam profiler wind measurement techniques using a five-beam wind profiler and collocated meteorological tower. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*., 22, pp. 1167–1180.

Angevine, W.M., W.L. Ecklund, D.A. Carter, K.S. Gage and K.P. Moran, 1994: Improved radio acoustic sounding techniques. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology,* Volume 11, Issue 1, pp. 42–49.

Brown, E.H. and F.F. Hall, 1978: Advances in atmospheric acoustics. *Reviews of Geophysics and Space Physics,* Volume 16, pp. 47–109.

Derr, V.E., 1972: *Remote Sensing of the Troposphere.* United Nations National Oceanic and Atmospheric Administration, WPL, Boulder, Colorado.

Gaffard, C. and T. Hewison, 2003: Radiometrics MP3000 microwave radiometer trial report. *Technical Report –TR26,* Met Office, Workingham, Berkshire, UK, 27 pp.

Gaynor, J.E., C.B. Baker and J.C. Kaimal, 1990: *The international sodar intercomparison experiment. Proceedings of the Fifth International Symposium on Acoustic Remote Sensing*. McGraw-Hill, New York, pp. 67–74.

Gossard, E.E. and R.G. Strauch, 1983: *Radar Observations of Clear Air and Clouds.* Elsevier, Scientific Publishing Co., Amsterdam.

Güldner, J. and D. Spänkuch, 2001: Remote sensing of the thermodynamic state of the atmospheric boundary layer by ground-based microwave radiometry, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology,* 18, 925–933.

Hinkley, E.D., 1976: *Laser Monitoring of the Atmosphere: Topics in Applied Physics*. Volume 14, Springer Verlag, New York.

Hogg, D.C., M.T. Decker, F.O. Guiraud, K.B. Earnshaw, D.A. Merritt, K.P. Moran, W.B. Sweezy, R.G. Strauch, E.R. Westwater and C.G. Little, 1983: An automatic profiler of the temperature, wind and humidity in the troposphere. *Journal of Climate and Applied Meteorology,* Volume 22, pp. 807–831.

Kadygrov, E.N. and D.R. Pick, 1998: The potential for temperature retrieval from an angular-scanning single-channel microwave radiometer and some comparisons with in situ observations. *Meteorological Applications*, Volume 5, pp. 393–404.

Kadygrov, E.N., G.N. Shur and A.S. Viazankin, 2003: Investigation of atmospheric boundary layer temperature, turbulence, and wind parameters on the basis of passive microwave remote sensing, *Radio Science*, Volume 38, No. 3, pp. 13.1–13.12.

Lataitis, R.J., 1992*a*: Signal power for radio acoustic sounding of temperature: The effects of horizontal winds, turbulence and vertical temperature gradients. *Radio Science,* Volume 27, pp. 369–385.

Lataitis, R.J., 1992*b*: *Theory and Application of a Radio-acoustic Sounding System*. NOAA Technical Memorandum ERL WPL-230.

Liljegren, J.C., S.A. Boukabara, K. Cady-Pereira and S.A. Clough, 2005: The Effect of the half-width of the 22-GHz water vapor line on retrievals of temperature and water vapor profiles with a 12-channel radiometer, *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing, Volume 43, Issue 5, pp. 1102–1108.*

Martner, B.E., D.B. Wuertz, B.B. Stankov, R.G. Strauch, E.R. Westwater, K.S. Gage, W.L. Ecklund, C.L. Martin and W.F. Dabberdt, 1993: An evaluation of wind profiler, RASS. and microwave radiometer performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Volume 74, Issue 4, pp. 599–613.

May, P.T., R.G. Strauch, K.P. Moran and W.L. Eckund, 1990: Temperature sounding by RASS, with wind profiler radars: A preliminary study. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Volume 28, Issue 1, pp. 19–28.

Neff, W.D. and R.L. Coulter, 1986: Acoustic remote sounding. In Lenschow, D.H. (ed.): *Probing the Atmospheric Boundary Layer,* American Meteorological Society, pp. 201–236.

Panofsky, H.A., 1973: Tower micrometeorology. In Haugen, D.A. (ed.): *Workshop on Micrometeorology,* Chapter 4, American Meteorological Society.

Singal, S.P., 1990: Current status of air quality related boundary layer meteorological studies using sodar. *Proceedings of the Fifth International Symposium on Acoustic Remote Sensing*, McGraw-Hill, New York, pp. 453–476.

Solheim, F., J.R. Godwin, E.R. Westwater, Y. Han, S.J. Keihm, K. Marsh, R. Ware, 1998: Radiometric profiling of temperature, water vapor, and cloud liquid water using various inversion methods, *Radio Science*, Volume 33, pp. 393–404.

Strauch, R.G., and others, 1990: Preliminary evaluation of the first NOAA demonstration network wind profiler. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Volume 7, Issue 6, pp. 909–918.

Syed Ismael *and E.V. Browell,* 1994: Recent Lidar technology developments and their influence on

measurements of tropospheric water vapor. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Volume 11, Issue 1, pp. 76–84.

Thomas, L., 1991: Lidar probing of the atmosphere. *Indian Journal of Radio and Space Physics*, Volume 20, pp. 368–380.

Thompson, N., 1980: Tethered balloons. In: *Air-sea Interaction: Instruments and Methods* (F. Dobson, L. Hasse and R. Davis, eds) Chapter 31, Plenum Press, New York.

Ware, R., R. Carpenter, J. Güldner, J. Liljegren, T. Nehrkorn, F. Solheim and F. Vandenberghe, 2003: A multi-channel radiometric profiler of temperature, humidity and cloud liquid, *Radio Science*, Volume 38, pp. 8079–8032.

Weber, B.L. and D.B. Wuertz, 1990: Comparison of rawinsonde and wind profiler radar measurements. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Volume 7, Issue 1, pp. 157–174.

Westwater, E.R., J. B. Snider and M.J. Falls, 1990: Ground-based radiometric observations of atmospheric emission and attenuation at 20.6, 31.65, and 90.0 GHz: A comparison of measurements and theory. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Volume 38, Issue 10, pp. 1569–1580.

Westwater, E., S. Crewell, C. Mätzler and D. Cimini, 2005: Principles of Surface-based Microwave and Millimeter Wave Radiometric Remote Sensing of the Troposphere. *Quaderni Della Società Italiana di Elettromagnetismo,* Volume. 1, No. 3.

World Meteorological Organization, 1980: *Lower Tropospheric Data Compatibility: Low-level Intercomparison Experiment (Boulder, United States, 1979)*. Instruments and Observing Methods Report No. 3, Geneva.

World Meteorological Organization, 1982: *Indirect Sensing: Meteorological Observations by Laser Indirect Sensing Techniques* (A.O. Van Gysegem). Instruments and Observing Methods Report No. 12, Geneva.

World Meteorological Organization, 1994: Comparison of windprofiler and rawinsonde measurements (J. Neisser, V. Görsdorf and H. Steinhagen). *Papers Presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation (TECO-94*), Instruments and Observing Methods Report No. 57, WMO/TD-No. 588, Geneva.

World Meteorological Organization, 2006: Operational Aspects of Different Ground-Based Remote Sensing Observing Techniques for Vertical Profiling of Temperature, Wind, Humidity and Cloud Structure (E.N. Kadygrov). Instruments and Observing Methods Report No. 89, WMO/TD No. 1309.

ГЛАВА 6

РАКЕТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ В СТРАТОСФЕРЕ И МЕЗОСФЕРЕ

6.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Настоящая глава посвящена в основном измерениям ветра и температуры с помощью небольших метеорологических ракет. Данные о ветре позволяет получить радиолокационное слежение за дрейфом спускающегося блока датчика, который либо самостоятельно, либо вместе с датчиками температуры проводит наблюдения в месте своего нахождения. Данные наблюдений за температурой передаются на наземную станцию. Описанные в этой главе методы применимы к стратосфере и мезосфере, прежде всего к высотам 20 – 90 км.

Обычно системы измерения с использованием метеорологических ракетных зондов включают в себя:

(a) прибор, выбрасываемый из ракеты при приближении ее к верхней точке полета (апогею), который затем спускается на замедляющем падение устройстве, аналогичном парашюту, и передает данные измерений температуры на землю, в то время как высокоточный радиолокатор, следящий за замедляющим падение устройством, обеспечивает информацию о ветре;

(b) свободно падающий надувной шар-зонд, который называют „спускающейся сферической оболочкой" и за которым следит высокоточный радиолокатор с целью обеспечения данных о плотности атмосферы и ветре;

(c) высокоточный радиолокатор, следящий за облаками диполей из фольги, называемых «дипольными отражателями», которые выбрасываются при приближении ракеты к верхней точке полета, что позволяет получать данные только о ветре.

Подлежащие измерению элементы весьма различны. Наиболее важными из них являются ветер и температура, однако сюда входят также солнечная радиация, характеристики электрического состояния атмосферы, турбулентность и химические составляющие. Среди последних следует отметить озон, водяной пар, оксиды азота, атомный кислород и водород, хлор и радикал гидроксильной группы.

Центральный орган – Мировой центр данных-А (МЦД-А) – обеспечивает сбор и различные обмены соответствующими данными. На основе этих данных проводятся систематические исследования, такие, например, как исследования общей циркуляции, взаимосвязей между солнцем и высокими слоями атмосферы, корреляции между геомагнетизмом и метеорологическими параметрами, состава стандартной атмосферы, правильности спутниковых данных, стратосферных потеплений.

По каждому запуску подготавливается сообщение, известное как ROCOB, которое составляется и распространяется при помощи Глобальной системы телесвязи.

Технология измерений находится в состоянии постоянного развития как в отношении используемых методов, так и в отношении измеряемых составляющих. Соответствующие измерения проводятся в основном нерегулярно и в каком-либо одном месте. Лишь термодинамические измерения и измерения содержания озона распространены широко и проводятся часто, причем с использованием полуоперативных методов.

Можно назвать еще несколько методов метеорологических измерений, которые далее не рассматриваются, поскольку не входят в область использования небольших метеорологических ракетных зондов:

(a) применение химических трассеров, например натрия или калия, что позволяет получить информацию о ветре, турбулентности и температуре; при этом необходимы специальные камеры слежения, позволяющие производить тригонометрическую съемку химического следа;

(b) использование зондов Пито;

(c) применение активных акселерометров;

(d) использование акустических гранат, в результате взрыва которых возникают звуковые волны, принимаемые системой высокочувствительных микрофонов на земле, что обеспечивает получение данных о ветре и температуре.

Полный обзор более ранних разработок в области метеорологического ракетного зондирования приведен в работе Bollermann (1970).

6.2 ИЗМЕРЕНИЕ ВЕТРА

6.2.1 Методология

После того как ракета достигает высшей точки своего полета, специальное устройство (как правило, пиротехническое) отделяет полезную нагрузку от пропульсивной установки или двигателя ракеты. При этом

датчики ветра и температуры выбрасываются вместе с телеметрическим блоком, используемым для передачи информации о температуре на землю. Во время последующего спуска движение этой сенсорной системы отслеживается радиолокатором. Таким образом, определяется траектория падающей цели, будь то парашют, система датчик температуры/парашют или надувная сферическая оболочка. Обычно в траекторию вносятся поправки, с тем чтобы обеспечить правильные данные о ветре. Еще одной системой, чувствительной к ветру, являются дипольные отражатели, которые опускаются очень медленно и довольно хорошо следуют за ветром, в связи с чем поправок к траектории их движения, как правило, не требуется. Однако дипольные отражатели в повседневной практике уже больше не используются.

6.2.2 Датчики ветра

Качество измерений ветра зависит от того, насколько хорошо система сенсорного определения ветра реагирует на движения атмосферы. Эта реакция зависит от следующих факторов:

(a) инерции, ускорений и скорости падения системы сенсорного определения ветра;
(b) динамической стабильности и осцилляции системы замедления;
(c) формы датчика, которая влияет на коэффициент лобового сопротивления вдоль трех осей.

6.2.3 Метод слежения

После того как произошло отделение полезной нагрузки, слежение за ее траекторией осуществляется радиолокатором; при этом используется сигнал, отраженный от металлизированного датчика.

Это дает возможность определить изменение некоторых переменных ветра с высотой и получить составляющие скорости ветра. Требуемая точность слежения составляет порядка 2×10^{-4} радианов (приблизительно 0,011°) для азимута и углов возвышения и порядка 10 м для наклонной дальности; такая точность достигается посредством использования высокоэффективных радиолокаторов или ретрансляционных передатчиков.

Первичные данные поступают со скоростью 10 или более измерений в секунду и затем сглаживаются при помощи метода наименьших квадратов способом, который зависит от высоты цели и скорости ее спуска.

6.2.4 Поправки и расчеты ветра

Горизонтальный вектор скорости движения датчика V_p относительно наблюдателя часто ошибочно принимается за горизонтальную скорость V действительного ветра. Однако высокая скорость выбрасывания, колебания коэффициента лобового сопротивления и сила инерции датчика ведут к различиям между этими двумя векторами на высотах более 50 км, поэтому необходимо применять поправки, величина которых быстро возрастает с увеличением скорости спуска или высоты.

Метод для внесения поправок, предложенный в работах Eddy, et. al. (1965) и Ballard (1966), дает возможность получить горизонтальные составляющие ветра на всех высотах, основываясь на данных слежения, при следующих допущениях:

(a) на датчик воздействуют исключительно сила тяжести и сила сопротивления воздуха;
(b) сила тяжести остается постоянной;
(c) сопротивление воздуха (D) пропорционально квадрату скорости движения датчика относительно воздуха.

Из второго закона Ньютона в качестве первого приближения получаем:

$$m\frac{dV_S}{dt} = mg + D \qquad (6.1)$$

$$|D| = \rho \ s \ \frac{C_d}{2} \ (V - V_2)^2 \qquad (6.2)$$

где C_d – коэффициент лобового сопротивления, g – ускорение свободного падения, m – масса опускающейся полезной нагрузки (т.е.датчика ветра и/или передатчика), S – площадь поперечного сечения датчика, t – время, V – скорость ветра, V_s – скорость датчика ветра, ρ – плотность воздуха.

Теперь следует получить выражение для вычисления поправок для горизонтальных составляющих скорости датчика ветра Δu и Δv, с тем чтобы определить составляющие вектора ветра. Это выражение действительно, если составляющая ветра гораздо меньше скорости датчика. Тогда, предположив, что произведение $S \cdot C_d$ является изотропным, т. е. независимым от направления движения, получаем:

$$\Delta u = -w_s \frac{\dot{u}_s}{|\dot{w}_s - g|}; \Delta v = -w_s \frac{\dot{v}_s}{|\dot{w}_s - g|} \qquad (6.3)$$

где $\dot{u}_s$ – ускорение датчика ветра в направлении запад-восток, $\dot{v}_s$ – ускорение датчика ветра в направлении север-юг, w_s – вертикальная скорость датчика ветра, $\dot{w}_s$ – вертикальное ускорение датчика ветра.

Эти поправки считаются значительными выше уровня, начиная с которого датчик реагирует на

ветер, т.е.когда сопротивление воздуха движению становится достаточно большим. Эта высота обычно определяется как уровень, на котором вертикальное ускорение датчика становится меньше 5 м/с^2 (в среднем на 5 км ниже апогея).

Значения Δu и Δv могут возрасти до 100 м/с на самых верхних уровнях и затем очень быстро уменьшиться до менее чем 1 м/с на высотах менее 50 км. Эффективность самых лучших используемых радиолокаторов позволяет достичь такой точности, что погрешность составляет 3–5 % при измерении ветра на высотах более 70 км и порядка 2 % на меньших высотах. Этот метод коррекции не учитывает различные случаи отклонения в поведении датчика ветра. В этих случаях данные следует считать сомнительными.

6.3 ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПУТЕМ ТЕРМОМЕТРИИ В ХОДЕ СПУСКА

6.3.1 Общие сведения

Для измерения температуры на больших высотах с помощью небольших ракетных зондов применяются два метода. Первый из них заключается в использовании термометрии в ходе спуска, т.е. датчик/телеметрическое устройство выбрасывается из ракеты в точке апогея и затем спускается на парашюте; при спуске полезной нагрузки сквозь атмосферу производятся измерения ветра и температуры. Второй метод заключается в использовании пассивных надувных спускающихся сферических оболочек, измеряющих в основном плотность воздуха и профили ветра. Данные о температуре затем рассчитываются на основе профилей плотности (см. раздел 6.4).Для получения позитивной информации необходимо следить за обоими видами полезных нагрузок с помощью радиолокаторов. В настоящем разделе рассматривается первый из указанных методов.

6.3.2 Термометрия в ходе спуска

В связи с тем, что проводить измерения в точке на больших высотах чрезвычайно трудно, необходимо, чтобы конструкция прибора позволяла свести к минимуму потребность в поправках. При этом поправки можно либо полностью игнорировать, либо рассчитывать с использованием стандартных параметров вплоть до самых верхних уровней.

Поправки являются важным фактором при измерениях на верхних уровнях, и способ их использования разработан и представлен в работе Henry (1967) и выражен количественно в работе Krumins and Lyons (1972). Вопрос о поправках рассматривается далее в разделе 6.3.3.

При проведении таких измерений обмен энергией между чувствительным элементом и окружающей средой на больших высотах быстро становится незначительным из-за очень низкой плотности воздуха, тогда как высокая скорость спуска означает быстрое изменение измеряемой температуры. На высоте 70 км скорость спуска меняется от 250 до 500 м/с в зависимости от используемой системы. К сожалению, совместное влияние большой скорости спуска и тепловой инерции терморезистора, выраженной его постоянной времени ответной реакции, уменьшает амплитуду колебаний температуры.

Таким образом, необходимо выбирать датчики с очень низкой теплоемкостью на подставках, уменьшающих теплопроводность до минимума.

Датчики следует размещать как можно дальше от зон аэродинамического возмущения, создаваемого модулем полезной нагрузки, и, кроме того, датчики должны быть нечувствительными к колебаниям модуля датчика/парашюта, которые могут приводить к изменениям воздействия набегающего потока воздуха и прямого солнечного излучения.

Для измерений используются датчики трех типов, работа которых основана на явлении изменения электрического сопротивления в зависимости от температуры:

(a) *Термисторный датчик.* Термистор-бусинка диаметром приблизительно 0,25 мм поддерживается двумя тонкими проволоками, припаянными к опорам из майларовых пленок с металлизированным покрытием, толщина которых очень мала по сравнению с их площадью, что позволяет улучшить рассеяние теплового потока, исходящего от основного корпуса полезной нагрузки. Электрическое сопротивление термистора повышается экспоненциально с понижением температуры.
На высоте 70 км при скорости спуска в 250 м/с постоянная времени ответной реакции составляет примерно 15–20 с, а значение поправок может составлять для некоторых типов приборов приблизительно 40–50 К (Krumins and Lyons, 1972), а для других типов приборов даже больше (Kokin and Rusina, 1971; Schmidlin, et al., 1980).

(b) Тонкопроволочный датчик. В датчик вмонтирована тонкая проволока диаметром от 5 до 20 мкм, изготовленная либо из вольфрама, либо из сплава рениума с вольфрамом, либо из сплава никеля с железом. Датчик иногда покрыт позолотой толщиной в несколько

сотых микрометра с целью его предохранения от окисления (сплав золота с палладием защищает датчик также от воздействия солнечного излучения). Для уменьшения либо используется тонкая проволока небольшой длины (несколько сантиметров) небольшого диаметра, которая припаивается к двум константановым (сплав меди с никелем) проволокам диаметром в несколько десятых микрона; либо берется тонкая проволока гораздо большей длины и большего диаметра и припаивается к клеммам, обладающим значительной теплоемкостью; при этом проволока удерживается на месте с помощью очень маленьких креплений в нескольких местах.

Изменение сопротивления в зависимости от температуры является практически линейным и составляет порядка 1 Ом на 5 К в первом случае или 1 Ом на 10 К во втором случае.

На высоте 70 км при скорости спуска 250 м/с постоянная времени короткой тонкой проволоки диаметром 5 мкм составляет порядка 0,5 с, и величина поправки составляет примерно 35 К, в то время как соответствующие значения для датчиков с длинной проволокой диаметром 20 мкм составляют 2 – 3 с и приблизительно 40 К.

(c) *Биметаллические датчики*. Датчики этого типа являются менее хрупкими, чем описанные выше, но обладают большей тепловой инерцией, ограничивающей их использование высотами менее 60 км. На тонкую нейлоновую подложку путем испарения в вакууме наносится электрический контур, в основном состоящий из никеля, затем две стороны датчика покрывают пленкой из анодированного алюминия толщиной 5 мкм с целью уменьшения воздействия солнечного излучения.

Изменение сопротивления цепи в зависимости от температуры является практически линейным и составляет порядка 1 Ом на 5 К, а постоянная времени составляет несколько секунд на высоте 60 км.

6.3.3 Общее уравнение для поправок датчика температуры

Зная температуру датчика T_t, можно рассчитать температуру окружающего воздуха T_∞. Как в общем, так и для каждого датчика в отдельности в соответствии с первым законом термодинамики – законом сохранения энергии – изменения внутренней энергии системы должны балансироваться суммарной энергией, как поглощенной из окружающей среды, так и выделенной в нее.

В общем виде можно записать

$$mC\frac{dT_t}{dt} = A\cdot h\left[T_\infty + \frac{rV^2}{2C_p} - T_t\right] + \alpha_s\cdot J\cdot A_s + \alpha_s\cdot J\cdot Alb\cdot A_a + \sigma\alpha_1 \sum_1^i A_i\cdot T_i^4 - A\cdot\varepsilon\cdot T_t^4 + W_t + K_c \qquad (6.4)$$

где A – площадь датчика; A_a – эффективная площадь датчика для излучения, отраженного поверхностью Земли; A_s – эффективная площадь датчика для прямого солнечного излучения; A_i – эффективная площадь датчика, подверженная длинноволновому излучению от Земли, атмосферы и основного корпуса зонда; Alb – альбедо Земли и атмосферы; C – удельная теплоемкость датчика; C_p – удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении; h – коэффициент конвективной теплопередачи (функция плотности и скорости воздуха относительно датчика, а также температуры воздуха); J – солнечная постоянная; K_c – приток тепла вследствие теплопроводности; m – масса датчика; r –коэффициент восстановления; T_i – эквивалентная температура черного тела источников, излучающих длинноволновую радиацию на датчик; T_t – температура датчика; T_∞ – температура невозмущенного воздуха; V – скорость воздуха относительно датчика; W_t – нагревание, обусловленное эффектом Джоуля, в результате теплового воздействия измерительного тока и поглощения электромагнитного излучения от передающей антенны; α_s – коэффициент поглощения датчика для солнечного излучения; α_l – коэффициент поглощения для длинноволнового излучения; ε – коэффициент излучения датчика; σ – постоянная Стефана-Больцмана.

Первый член правой части уравнения (6.4) описывает количество энергии, обусловленной конвекцией, включая кинетический нагрев, который очень велик на уровнях выше 50 км вследствие очень большой скорости спуска. Второй и третий члены представляют солнечную радиацию и излучение, отраженное от Земли и/или поверхности облаков, соответственно. Четвертый член описывает длинноволновое излучение, попадающее на датчик из окружающего пространства и от зонда. Пятый член представляет количество энергии, излучаемой датчиком в соответствии с его излучательной способностью. Шестой член W_t описывает ту часть энергии, которая поглощается при нагревании, обусловленном эффектом Джоуля, и седьмой член характеризует теплопроводность между датчиком и его креплением. Два последних члена специфичны для каждой конкретной системы и должны применяться для расчета поправок на проводимость в

отношении креплений или соединительных проводов датчика. Более подробно данный вопрос освещен в работах Krumins and Lyons (1972), Bulanova, et al. (1967) и Yata (1970).

Коэффициенты, необходимые для вычисления других членов, определяются экспериментальным образом и с помощью математических формул в зависимости от значений параметров, полученных в момент запуска. В частности, коэффициент h, являющийся функцией плотности и температуры, сначала вычисляется на основе стандартных значений и затем с большей точностью путем последовательных итераций с использованием общих уравнений для расчета температуры и плотности (уравнения (6.4), (6.8), (6.9),(6.10)).

6.3.4 Телеметрия

Блоки метеорологической телеметрической аппаратуры позволяют передавать данные об изменениях температуры, зарегистрированных датчиком.

Сопротивление датчика обычно преобразуется в частоту, которая непосредственно модулирует сигнал передатчика в случае использования многоканальных систем измерения либо при этом используется коммутатор для последовательного переключения на три-четыре канала или поднесущие частоты в случае использования двух- или трехканальных систем измерения.

Телеметрические системы, установленные на борту ракеты, работают в очень трудных условиях.

На этапе активного полета ракеты эти системы подвергаются сильной вибрации в очень широком диапазоне и ускорениям (g-силам), которые могут достигать нескольких десятков g за период в несколько секунд. Низкая плотность воздуха в начале спуска ограничивает рассеяние тепла. Позднее в ходе спуска, когда измерительный модуль входит в более плотные слои воздуха и температура может понижаться до 190 К, возможно охлаждение электроники.

В большинстве случаев эталонные значения сопротивления или напряжения выбираются при помощи последовательного переключателя, с тем чтобы ошибки, связанные с измерительной системой в целом, и в частности ошибки, возникающие из-за возможных изменений в работе телеметрических устройств под воздействием окружающей среды во время полета, можно было бы обнаружить и устранить. Особое внимание следует обращать на конструирование и размещение антенны относительно датчиков, с тем чтобы избежать нагревания датчиков вследствие эффекта Джоуля, связанного с электромагнитной энергией, исходящей из передатчика; мощность последнего в любом случае должна быть ограничена необходимым минимумом (от 200 до 500 мВт). При такой малой мощности передатчика и большом расстоянии между передатчиком и принимающей станцией, которое может достигать 150 км, необходимо, как правило, использовать приемные антенны направленного действия с высоким коэффициентом усиления.

Сигналы после приема и демодуляции или декодирования регистрируются на многодорожечной магнитной ленте вместе с поступившими от следящего радиолокатора сигналами с указанием времени, с тем чтобы привязать полученные данные к соответствующим им высотам. При этом очень важной является корреляция времени между телеметрическими сигналами и радиолокационными данными о положении датчика.

6.4 ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ С ПОМОЩЬЮ НАДУВНОЙ СПУСКАЮЩЕЙСЯ СФЕРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ

Надувная спускающаяся сферическая оболочка – это простой шар из майларовой пленки диаметром 1 м, к которому прикреплен нагнетательный механизм; номинальная масса составляет примерно 155 г. Сферическую оболочку выбрасывают на высоте примерно 115 км, откуда она начинает свободно опускаться под воздействием силы тяжести и ветра. После выброса сферическая оболочка надувается до супердавления, равного примерно 10 – 12 гПа, в результате испарения жидкости, такой как изопентан. Поверхность сферической оболочки металлизирована, что позволяет радиолокатору следить за ее местонахождением и обеспечивать соответствующую информацию в качестве функции времени. Для достижения необходимой точности радиолокатор должен обладать высокоточной системой слежения, т. е. это должен быть радиолокатор FPS-16 с диапазоном C или еще более высокоточный радиолокатор.

Затем полученные с помощью радиолокатора данные о местонахождении сферической оболочки и значения ее коэффициента лобового сопротивления используются в уравнениях движения для расчета плотности атмосферы и ветра. Для расчета плотности требуются данные о коэффициенте лобового сопротивления сферической оболочки относительно широкого диапазона условий потока (Luers,1970; Engler and Luers, 1978). Давление и температура также рассчитываются с тем же шагом

по высоте, что и плотность. На измерения с помощью сферической оболочки влияют только внешние физические силы тяжести, ускорения за счет лобового сопротивления и ветра, что делает сферическую оболочку потенциально более точным средством измерения, чем другие средства измерения в точке (Schmidlin, Lee and Michel,1991).

Движение спускающейся сферической оболочки может быть описано с помощью простого уравнения движения в системе отсчета с началом координат в центре земного шара в следующем виде:

$$m\frac{dV}{dt} = mg - \frac{\rho C_d\ A_s |V_r| \cdot V_r}{2} \qquad (6.5)$$

$$- \rho\, V_b\ g - 2m\omega \times V$$

где A_s – площадь поперечного сечения сферической оболочки, C_d – коэффициент лобового сопротивления, g – ускорение свободного падения, m – масса сферической оболочки, V – скорость сферической оболочки, V_r – скорость движения сферической оболочки относительно воздуха, V_b – объем сферической оболочки, ρ — плотность атмосферы, ω – угловая скорость вращения земного шара.

Скорость сферической оболочки относительно воздуха определяется по формуле $V_r = V - V_a$, где V_a – это скорость ветра. Величина C_d рассчитывается на основе значений относительной скорости сферической оболочки.

Члены правой части уравнения (6.5) представляют силы тяжести, трения, плавучести и Кориолиса соответственно.

В результате простого математического преобразования уравнение (6.5) раскладывается на три ортогональных компонента, включая вертикальный компонент уравнения движения, на основе которого рассчитывается плотность; таким образом, получаем

$$\rho = \frac{2m\ \ (g_z - \ddot{z} - C_z)}{C_d A_s |V_r|\ \ (\dot{z} - w_z) + 2V_b g_z} \qquad (6.6)$$

где g_z – ускорение свободного падения на уровне z; w_z – вертикальный компонент ветра, принимаемый обычно равным нулю; $\dot{z}$ – вертикальный компонент скорости сферической оболочки; $\ddot{z}$ – вертикальный компонент ускорения сферической оболочки.

Значения членов уравнения, соответствующих плавучести ($V_b g_z$) и силе Кориолиса (C_z), по сравнению со значениями других членов уравнения (6.7) малы, и ими либо пренебрегают, либо учитывают в качестве возмущений.

Профиль температуры получают на основе рассчитанной плотности атмосферы (уравнение (6.7)) с использованием уравнения гидростатики и уравнения состояния следующим образом:

$$T_z = T_a \frac{\rho_a}{\rho_z} + \frac{M_0}{R\rho_z} \int_h^a \rho_h g dh \qquad (6.7)$$

где h – высота, переменная интегрирования; M_0 – молекулярная масса сухого воздуха; R – универсальная газовая постоянная; T_a – температура в кельвинах (К) на эталонной высоте a; T_z – температура в кельвинах (К) на уровне z; ρ_a – плотность на эталонной высоте а; ρ_h – плотность, проинтегрированная по интервалу высот от h до a; ρ_z – плотность на высоте z.

Следует иметь в виду, что источником ошибки в значениях температуры является неопределенность, связанная с расчетом значения плотности воздуха. Ошибка в рассчитанном значении плотности включает в себя компоненты высокой и низкой пространственной частоты. Компонент высокой частоты может быть связан с разными источниками, такими как ошибка измерения, ошибка при расчетах и/или изменчивость атмосферы, и поэтому носит довольно случайный характер.

Тем не менее амплитуда этой ошибки может быть ограничена путем статистического усреднения. Однако компонент низкой частоты, включающий смещение и линейную вариацию, может быть связан с действительными характеристиками атмосферы и поэтому его трудно отделить от ошибки измерения.

6.5 РАСЧЕТ ДРУГИХ АЭРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

6.5.1 Давление и плотность

Зная температуру воздуха, измеренную датчиком как функцию высоты, можно определить давление и плотность атмосферы на различных высотах.

Для сухой атмосферы с постоянной молекулярной массой, используя уравнение гидростатики

$$dp = -g\rho dz \qquad (6.8)$$

и уравнение состояния идеального газа:

$$\rho = \frac{M}{R}\ \frac{p}{T} \tag{6.9}$$

можно получить соотношение между значениями давления p_i и p_{i-1} на двух уровнях z_i и z_{i-1}, между которыми градиент температуры примерно постоянен:

$$p_i = a_i \cdot p_{i-1} \tag{6.10}$$

Здесь:

$$a_i = \exp\left[\frac{-M}{RT_{i-1}} \cdot g_0 \left\{\frac{r_T}{r_T + z_{i-1}}\right\}^2 \cdot \left\{1 - \frac{T_i - T_{i-1}}{2T_{i-1}}\right\}\left\{z_i - z_{i-1}\right\}\right] \tag{6.11}$$

где g_0 – ускорение свободного падения на уровне моря, M – молекулярная масса воздуха, p_i – давление на верхнем уровне z_i, p_{i-1} – давление на нижнем уровне z_{i-1}, r_T – радиус земного шара, R –постоянная идеального газа, T_i – температура на верхнем уровне z_i, T_{i-1} – температура на нижнем уровне z_{i-1}, z_i – верхний уровень, z_{i-1} – нижний уровень.

Путем сравнения с давлением p по данным шара-радиозонда можно определить исходное давление p_i для ракетного зондирования на общем уровне z_i, который обычно находится на высоте около 20 км, или приблизительно 50 гПа.

Аналогичным образом, используя уравнение состояния идеального газа (уравнение (6.9)), можно определить профиль плотности атмосферы ρ.

Рассмотренный метод основан на последовательном интегрировании от нижних уровней до верхних. Следовательно, необходимо иметь очень точные данные о высоте и температуре для различных уровней.

6.5.2 Скорость звука, теплопроводность и вязкость

Используя основные данные о давлении и температуре, часто можно рассчитать другие параметры, которые необходимы для разработки имитационных моделей:

(a) скорость звука V_s

$$V_s = \left(\gamma R \frac{T}{M}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{6.12}$$

где $\gamma = C_p/C_v$;

(b) коэффициент теплопроводности воздуха k (Вт/м·К):

$$\kappa = \frac{2.650\ 2 \cdot 10^{-3} \cdot T^{\frac{3}{2}}}{T + 2454 \cdot 10^{\frac{12}{T}}} \tag{6.13}$$

(c) коэффициент вязкости воздуха μ (Н·с/м^2):

$$\mu = \frac{1.458 \cdot 10^{-6} \cdot T^{\frac{3}{2}}}{T + 110.4} \tag{6.14}$$

6.6 СЕТИ СТАНЦИЙ И СРАВНЕНИЯ ДАННЫХ

В настоящее время регулярное зондирование верхней атмосферы проводят лишь одна-две страны.

Сокращение оперативных потребностей и значительные затраты, связанные с работами по запуску, ограничивают число станций и частоту запусков.

С целью обеспечения единообразия результатов, получаемых от различных существующих систем, были проведены следующие международные сравнения: на острове Уоллопс, Вирджиния, в 1968, 1972 и 1977 гг.; в Куру, Французская Гвиана, в 1973 и 1977 гг. (Finger, et al., 1975; Schmidlin, et al., 1980).

Для высот менее 50 км все данные представляются довольно однородными. Для высот от 50 до 65 км появляются некоторые расхождения в данных измерений при помощи термистора, однако, используя таблицы согласующих поправок, подготовленные в ходе сравнений, можно, просто учитывая систематические расхождения, применять полученные результаты для синоптических исследований.

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Ballard, H.N., 1966: The measurement of temperature in the stratosphere and mesosphere. *Journal of Applied Meteorology,* Volume 6, Issue 1, pp. 150–163.

Bollermann, B., 1970: *A Study of 30 km to 200 km meteorological rocket sounding systems*. NASA Contractor Report CR–1529.

Bulanova, L.K., and others, 1967: *Some Results on the Methodical Treatment of the Temperature Measurement at High Layers of the Atmosphere Using Small Thermistors*. Trudy, Central Aerological Observatory, Volume 77, pp. 3–16.

Eddy, A., C.E. Duchon, F.M. Haase and D.R. Haragan, 1965: *Determination of Winds from Meteorological Rocketsondes*. Report No. 2, Atmospheric Science Group, University of Texas, Austin, Texas.

Engler, N.A. and J.K. Luers, 1978: *Modifications to the 1972 ROBIN Program*. Final report to the Atmospheric Sciences Laboratory, White Sands Missile Range. Report ASL-CR-0008-1.

Finger, F.G., M.E. Gelman, F.J. Schmidlin, R. Leviton and B.W. Kennedy, 1975: Compatibility of meteorological rocketsonde data as indicated by international comparison tests. *Journal of the Atmospheric Sciences*, Volume 32, Issue 9, pp. 1705–1714.

Henry, R.M., 1967: Corrections for meteorological rocket temperature soundings on an individual basis. In: *Proceedings of the Conference on High-altitude Meteorology and Space Weather*. American Meteorological Society, Houston, Texas.

Kokin, G.A. and V.Y. Rusina, 1976: *Some Results of the Flight Testing of the Onboard Equipment of the MMR-06 Meteorological Rocket*. Trudy, Central Aerological Observatory, Volume 99, pp. 130–146.

Krumins, M.V. and W.C. Lyons, 1972: *Corrections for the Upper Atmosphere Temperatures Using a Thin-film Loop Mount*. Technical Report TR 72-152, Naval Ordenance Laboratory, White Oak, Maryland.

Luers, J.K., 1970: *A Method of Computing Winds, Density, Temperature, Pressure, and their Associated Errors from the High Altitude ROBIN Sphere using an Optimum Filter*. AFGL Contract F19628-C-0102, University of Dayton Research Institute, Air Force Report AFCRL-70-0366.

Schmidlin, F.J., J.R. Duke, A.I. Ivanovsky and Y.M. Chernyshenko, 1980: *Results of the August 1977 Soviet and American Meteorological Rocketsonde Intercomparison Held at Wallops Island, Virginia*. NASA Reference Publication RP 1053.

Schmidlin, F.J., H.S. Lee and W. Michel, 1991: The inflatable sphere: A technique for the accurate measurement of middle atmosphere temperatures. *Journal of Geophysical Research*, Volume 96, Number D12, pp. 22673–22682.

Yata, A., 1970: Correction for the temperature data obtained by MT-135 system. *Geophysical Magazine* (Tokyo), Volume 35, pp. 99–121.

ГЛАВА 7

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ ИСТОЧНИКОВ АТМОСФЕРИКОВ

7.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

7.1.1 Определения

Атмосферики, или сферики, можно определить как электромагнитное излучение, возникающее в результате грозовых разрядов в атмосфере. С практической точки зрения, как правило, интерес представляет источник атмосферика – вспышка молнии. Поэтому атмосферики рассматриваются лишь как явление, которое позволяет обнаружить и/или определить местоположение вспышек молнии.

Простое обнаружение вспышек молнии обычно используется для локальных предупреждений, в то время как данные о координатах вспышек молний могут использоваться для различных метеорологических и прочих целей. Такое понятие, как наблюдения за атмосфериками, является удобным выражением для обоих методов.

Вспышка молнии в облаке – грозовой разряд, происходящий внутри облака или между разными облаками. Такие вспышки не представляют практического интереса для общего рассмотрения гроз, однако могут считаться полезными для местных систем предупреждения о грозах.

Вспышка молнии по направлению от облака к земле – этот тип вспышки молнии представляет общий практический интерес. Его называют просто вспышка молнии.

Пеленгатор (П) – прибор для определения направления, с которого появляется атмосферик. Зафиксированное местоположение – установленные по атмосферикам координаты вспышки молнии.

Вспышка молнии – общее явление молнии, состоящее из одного или нескольких обратных ударов (и лидеров, предшествующих каждому удару).

Счетчик вспышек – прибор для подсчета числа вспышек молнии вблизи станции.

Многократность – число ударов в вспышке молнии. Наиболее распространенными вспышками являются вспышки с одним ударом.

Полярность – вспышки молний по направлению от облака к земле могут быть по заряду отрицательными или положительными, в зависимости от знака электрического заряда, идущего вниз от облака к земле. Наиболее часто возникают вспышки с отрицательным зарядом; вспышки с положительным зарядом типичны для зимних условий.

Дальность действия – радиус действия устройства для обнаружения атмосферика. Местный масштаб в данном контексте подразумевает дальность действия в несколько десятков километров, региональный масштаб – дальность действия в несколько сотен километров, а прибор дальнего действия имеет дальность действия в одну или несколько тысяч километров.

Сферик – принятое для метеорологических целей сокращение слова атмосферик.

Источник – место возникновения атмосферика, обычно вспышка молнии.

Статик – статическое поле электрического разряда в атмосфере. Использование этого слова для обозначения атмосферика не рекомендуется.

Удар или обратный удар – основной импульс сильного электрического тока в канале молнии. Вспышка состоит из одного или нескольких ударов.

Приемное устройство, определяющее время поступления сигнала (ВП) – прибор, который определяет время прихода атмосферика с высокой степенью точности (порядка 1 мкс).

7.1.2 Единицы измерения

В дополнение к значениям полярности и многократности вспышки молнии характеризуются еще и силой разряда тока. Наиболее часто используется такое определение силы разряда тока, как пиковое значение электрического тока обратного удара (обычно первый удар в вспышке), измеренное в амперах (А). Типичные значения силы вспышек составляют десятки килоампер (кА).

Интенсивность грозы может быть описана в таких понятиях, как частота вспышек на какой-либо заданной территории, средняя многократность, средняя сила и отношение числа вспышек с отрицательным зарядом к числу вспышек с положительным зарядом. Современная техника для определения различных

характеристик гроз позволяет установить практичную описательную и четко выраженную меру («индекс») грозовой деятельности, однако пока еще такого общего индекса не существует.

Для оценки эффективности действия системы обнаружения/определения координат молний необходимо знать некоторые параметры атмосфериков.

Для устройства местного предупреждения, такого, как счетчик вспышек молний, используются следующие параметры: радиус или дальность обнаружения (обычно несколько десятков километров), число обнаруженных вспышек, наблюдающихся в данном радиусе, и число ложных сигналов тревоги. Местная система подвержена главным образом местным ошибкам (обычно порядка нескольких километров) и ее эффективность обнаружения (соотношение между числом зарегистрированных приборами и числом действительных вспышек молний в каком-либо заданном районе, выраженное, как правило, в процентах) недостаточно высока. Ошибки в расчетах силы и многократности вспышек молний вызывают обычно меньше озабоченности.

7.1.3 Метеорологические требования

Определение районов грозовой деятельности, базирующееся на приеме атмосфериков, особенно получение оперативных данных, обеспечивает метеорологов ценной дополнительной информацией.

Эта информация становится особо ценной, когда относится к большим районам океана или другим регионам с редкой сетью станций наблюдения. Кроме того, такая информация дает ключ к пониманию явлений неустойчивости воздушных масс и местонахождения и передвижения фронтов, шкваловых линий, тропических циклонов и торнадо, а также помогает исследовать наблюдавшиеся в прошлом явления. Примеры использования данных о координатах вспышек молний приведены в работах Orville et al. (1987) и Holle, Lopez and Watson (1990).

Авиационные метеорологические службы также могут извлекать пользу из данных об атмосфериках, поскольку грозы являются одним из основных источников опасности для полетов, так как при грозах происходят мощные перемещения масс воздуха, к тому же молнии могут ударить в летательный аппарат и повредить его. Прогнозы погоды для экипажей воздушных судов и для диспетчерской службы движения можно скорректировать, используя самые последние данные об атмосфериках, а определение районов грозовой активности помогает при выборе безопасного маршрута полета. Аналогичные соображения применимы и при осуществлении мероприятий по запуску космических кораблей.

Удары молний могут повлиять и на деятельность других секторов хозяйства, например вызвать повреждение незащищенных сооружений, в частности воздушных линий электропередачи.

Они опасны при проведении взрывных работ входе добычи полезных ископаемых и являются причиной лесных пожаров. Данные наблюдений за атмосфериками могут быть использованы для обеспечения предупреждений о соответствующих опасностях как в региональном масштабе благодаря интерпретации этих данных прогнозистом, так и в локальном масштабе путем непосредственного использования автоматической системы предупреждений. Кроме того, наблюдения за атмосфериками проводятся в нескольких странах институтами метеорологии и исследования атмосфериков в научных целях.

7.1.4 Методы наблюдения

7.1.4.1 Пеленгаторы (П)

Самые распространенные на сегодняшний день системы наблюдения за атмосфериками основаны на применении автоматических пеленгаторов (П). В пеленгаторах обычно используются две прямоугольные рамочные антенны, установленные в направлении север-юг и запад-восток, что обеспечивает определение горизонтальных магнитных составляющих атмосферика в зависимости от направления его приема. Устранение неопределенности в определении направления на источник излучения, равной 180°, осуществляется благодаря одновременному приему вертикальной электрической составляющей атмосферика с помощью горизонтальной пластинчатой антенны.

Широкополосной пеленгатор, обнаруживающий атмосферики на частотах вплоть до 1 МГц, может использоваться в качестве локальной автономной системы предупреждения о грозовых разрядах. Однако наиболее эффективно его можно использовать в качестве одного из базисных элементов в региональной сети из трех пеленгаторов или более, предназначенной для определения координат вспышек молний путем нахождения точек пересечения соответствующих направлений. Оперативная система определения координат описана в разделе 7.2.

В экспериментальном порядке с целью составления карт гроз в региональном или даже в глобальном масштабе использовались пеленгаторы с большой дальностью действия (700 – 4 500 км), осуществляющие прием атмосфериков на очень низких частотах

(5 – 10 кГц) (Heydt and Takeuti, 1977; Grandt and Volland, 1988). Большой путь распространения, влияние которого на импульс зависит от частоты, обеспечивает возможность определения расстояния на основе данных измерений одной станции путем сравнения составляющих атмосферика, принимаемых на нескольких частотах. До настоящего времени вопросы точности, эффективности обнаружения и оперативной целесообразности использования таких систем остаются неясными. В связи с этим данные системы в настоящем документе не рассматриваются.

7.1.4.2 Приемные устройства для определения времени поступления сигналов

Расстояние между источником атмосферика и станцией наблюдения можно определить, если время поступления сигнала можно измерить с точностью порядка 1 мкс. Это требование точности ассоциируется со скоростью распространения атмосферика, которая составляет 300 м/мкс.

Поскольку момент времени, в который возникла молния, неизвестен, измерение времени носит относительный характер, и определение координат источника требует установления разности между временем поступления сигнала на различные станции. Общее требование относительно синхронизации работы станций заключается в необходимости использовать устройство точного определения времени, такого, который используется навигационными спутниками или сетью радиовещательных станций. Время распространения сигнала атмосфериков менее чувствительно к изменениям ландшафта, чем направление его приема, и поэтому в принципе сеть, используемая для определения времени поступления сигнала, может более точно определять координаты вспышек молний, чем сеть пеленгаторов, выдающая только направления. Соответствующие сравнения проведены в разделе 7.4. На сегодняшний день в оперативном использовании находятся два типа приемных устройств для регистрации времени поступления атмосфериков.

Первый рассчитан на использование в региональной системе (Bent and Lyons, 1984) и описывается в разделе 7.3. Второй тип был разработан Lee (1986*a*, 1986b, 1989) с целью изучения длительной работы такого прибора и находился в оперативном использовании в Соединенном Королевстве в течение более трех лет; описание этого прибора дано в разделе 7.3.6.

7.1.4.3 Местные детекторы вспышек молний

Поскольку местные детекторы (счетчики) вспышек молний не используются широко метеорологическими службами или другими пользователями в научных целях, имеется очень мало информации об их современных рынках и возможных исследованиях их эффективности. Предположительно, прогресс в этой области носит более медленный характер, чем в области систем определения координат молнии, и поэтому можно считать, что результаты сравнения пяти приборов, представленные в работе Johnson and Janota (1982), все еще имеют определенную ценность.

В настоящем разделе местные детекторы рассмотрены очень кратко. Автономные пеленгаторы можно использовать в качестве устройств предупреждений о вспышках молний. Возможность получения информации о направлении данным прибором показывает его большое преимущество по сравнению с другими местными детекторами. К тому же усредненная сила сигнала ряда вспышек молний может использоваться в качестве основы для расчета расстояния. В ходе сравнения, проведенного Johnson and Janota (1982), высокая чувствительность вместе с недостаточной степенью отсеивания ложных сигналов привели к тому, что проверяемый прибор подавал много ложных сигналов тревоги. После проведения этого сравнения на рынке появился новый прибор, называемый детектором гроз. В своей основе этот пеленгатор, используемый в современных сетях пеленгаторов (см. раздел 7.2.1), обладает соответствующей способностью отсеивать вспышки молний, идущие не по направлению от облака к земле. Компьютерное устройство визуального отображения позволяет наблюдать ситуацию в формате сектора, в дополнение к этому обеспечиваются некоторые статистические данные. Дальность действия составляет 160 км. Детектор гроз довольно широко используется теми институтами и компаниями, которым не нужны более точные региональные данные о координатах вспышек молнии и/или у которых для этого нет необходимых финансовых средств.

Счетчики вспышек молний предназначены для подсчета грозовых разрядов в радиусе от 20 до 50 км в зависимости от выбранной чувствительности используемого прибора. Принцип действия этого счетчика основан на обнаружении простого быстрого изменения электрического поля, а это означает повышенную чувствительность к ложным сигналам тревоги. Однако число ложных сигналов тревоги можно уменьшить путем тщательного выбора места для установки прибора, где отсутствовали бы близкие источники помех.

Местные счетчики вспышек молний могут использоваться в синоптической метеорологии для штормовых предупреждений, особенно совместно с

метеорологическими радиолокаторами. Благодаря их простой конструкции и действию, а также низкой цене, эти приборы целесообразно применять также как устройства предупреждения в любых видах деятельности, для которых важна краткосрочная информация о приближающихся грозах.

Третий тип приборов для предупреждения об опасности молний основан на обнаружении электростатического поля, ассоциирующегося с грозовыми облаками. Быстрое уменьшение напряженности этого поля с увеличением расстояния ограничивает полезный радиус действия до 10 – 20 км. В данном случае заблаговременное предупреждение основывается не на учете расстояния до приближающегося грозового очага, а на времени нарастания электрического поля над грозовым облаком или вблизи относительно его порогового значения до момента разряда молнии.

Статическое вертикальное электрическое поле на уровне подстилающей поверхности можно измерить флюксметром (тип электрометра в виде конденсатора с периодически переменной емкостью), радиоактивным зондом (короткая вертикальная антенна с радиоактивным препаратом, предназначенным для того, чтобы обеспечить электрическую проводимость окружающего воздуха путем его ионизации) или коронирующим острием (заточенное острие, на котором образуется коронный разряд, когда электрическое поле превышает пороговое значение). Согласно работе Johnson and Janota (1982), прибор с коронирующим острием чувствителен к окружающим помехам, что приводит к подаче ложных сигналов тревоги, в то время как два первых прибора подвержены утечкам токов, вызываемых в основном пауками и насекомыми, что требует значительного ухода.

7.2 ПЕЛЕНГАЦИОННАЯ СИСТЕМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ МОЛНИЙ

7.2.1 Пеленгатор

Существующая на коммерческом рынке система такого типа описана в работах Krider, Noggle and Uman (1976), Maier et al. (1984). Она может быть построена в виде одного блока, внутри которого встроены антенны и соответствующая электроника, что делает установку прибора сравнительно легкой. С современной точки зрения к наиболее важным характеристикам относится способность этой системы принимать очень слабые сигналы атмосфериков, эффективно отбрасывая при этом сигналы, происходящие из иных источников, чем молнии, возникающие по направлению от облака к земле. Критерий отбора при этом основан на анализе формы импульса сигнала, и принимается лишь та форма, которая соответствует обратному удару молнии. Некоторые местные, не относящиеся к молниям, излучения могут пройти через этот отбор, однако такие ложные сигналы обычно настолько слабы, что могут быть обнаружены лишь одним, расположенным наиболее близко к ним, пеленгатором; фактически, всегда удается избежать ложных сигналов обнаружения молний, поскольку на практике требуется совпадение во времени сигналов по меньшей мере от двух пеленгаторов.

Критерий отбора по форме импульса учитывает, что атмосферик от дальней вспышки молнии типа облако-земля может быть слишком искажен, чтобы быть принятым. Импульс поверхностной волны видоизменяется при распространении под влиянием ландшафта, к тому же на него с небольшим опозданием накладывается сигнал, отраженный от ионосферы. В результате воздействия этих факторов номинальная дальность действия пеленгатора составляет обычно 400 км; ослабление интенсивности сигнала при прохождении этого расстояния оказывается минимальным.

Тем не менее, принимаются сигналы и от многих вспышек молний, происходящих на гораздо более дальних расстояниях, что означает, что пеленгатор обнаруживает и более удаленные грозы, хотя информация об их координатах и частоте вспышек молний является менее точной.

Данная система обеспечивает следующую цифровую информацию о зафиксированной вспышке молний: направление поступления сигнала (пеленг), интенсивность сигнала, полярность и многократность. Эти данные немедленно посылаются в модем, который обычно соединен с центральным блоком сети.

7.2.2 Конфигурация сети пеленгаторов

В том случае когда имеются данные совпадающих наблюдений двух пеленгаторов, можно рассчитать координаты молний путем определения точки взаимопересечения двух пеленгов. Определение координат обычно бывает более точным, когда пеленги пересекаются почти перпендикулярно, в то время как их пересечение почти по базисной линии может привести к значительному увеличению ошибок при определении координат молний. В связи с этим следует включать в сеть по меньшей мере три пеленгатора.

Для того чтобы минимальное число пеленгаторов способно было охватить как можно большую

площадь, конфигурация пеленгаторов должна соответствовать определенным требованиям.

Во-первых, для сведения к минимуму возникновение почти параллельных (базисной линии) пеленгов небольшая сеть должна иметь форму правильной геометрической фигуры (равностороннего треугольника для системы из трех пеленгаторов, квадрата для системы из четырех пеленгаторов); в том, что касается более крупных сетей, следует избегать размещения станций на одной прямой линии. Во-вторых, пространственное размещение станций должно быть довольно равномерным.

Для того чтобы добиться хорошей эффективности работы в радиусе действия 400 км, расстояния между соседними станциями должны составлять примерно от 150 до 250 км.

Конфигурация действительной сети, которая может быть реализована на практике, зависит также от наличия мест, которые свободны от экранирующих сооружений или особенностей ландшафта, близких источников излучения и которые недоступны для вандализма. При выборе мест размещения станций необходимо учитывать также наличие линий связи и определенного количества подготовленного персонала для работы с пеленгаторами, хотя они и не требуют большого обслуживания.

Важным моментом, который необходимо учитывать, является избыточность сети, т. е. тот факт, что число станций должно превышать минимум, необходимый для поддержания сети в оперативном состоянии. Поскольку выход из строя линий связи между пеленгаторами и центральным блоком сети не столь уж редкое явление, можно рекомендовать, чтобы любой интересующий район охватывался по меньшей мере четырьмя пеленгаторами. Избыточность сети повышает также эффективность обнаружения и точность определения координат молний (см. раздел 7.2.3).

В системе используется центральный блок(анализатор положения (АП)), который принимает данные от пеленгаторов и рассчитывает координаты молний. В том случае, когда линии связи имеют стабильный характер, АП определяет совпадения во времени поступления данных от пеленгаторов; когда же линии связи работают по принципу пакетного переключения, что дешевле в эксплуатации, АП следит за синхронизирующими дорожками каждого пеленгатора с использованием информации о совпадениях, обеспечиваемой самими наблюдаемыми вспышками молний.

После того как совпадающие данные от более чем двух пеленгаторов поступают на АП, на основе оптимизации рассчитываются координаты молний.

Оптимизация может просто заключаться в выборе наиболее перпендикулярной пары пеленгов или определенной статистической процедуры, аналогичной выравниванию методом наименьших квадратов (см. раздел 7.2.3).

Определение совпадения между пеленгаторами находится в зависимости от уровня помех в районах действия сети. Надежные данные фиксируются тогда, когда они поступают в течение 20 мс, однако в случае, когда пеленгатору не удается обнаружить первый удар вспышки молнии и он сообщает вместо этого лишь о втором ударе, совпадение уже потеряно. Интервал совпадения в 50 мс повышает в некоторой степени число обнаруженных вспышек молнии, однако этот интервал должен оставаться менее 100 мс, с тем чтобы избежать ложных совпадений.

Любая сеть может использовать также данные пеленгаторов из другой сети. Например, эффективность работы национальной сети может быть повышена благодаря использованию некоторых пеленгаторов в соседней стране, и наоборот.

Реализация на практике такой взаимосвязи является техническим вопросом, который в настоящем документе не рассматривается.

7.2.3 Эффективность обнаружения и точность определения координат молний, обеспечиваемые сетями пеленгаторов

Пеленги, измеряемые с помощью пеленгаторов, подвержены так называемым ошибкам, которые связаны с рельефом местности и под которыми подразумеваются угловые погрешности пеленга, создаваемые находящимися поблизости естественными и искусственными неровностями ландшафта, окружающего место размещения пеленгатора.

Эти ошибки различны в зависимости от направления, носят, как правило, систематический характер и, будучи установлены однажды, могут быть введены в АП в качестве систематических поправок.

Один из методов обнаружения систематических ошибок описан в работе Mach, MacGorman and Rust (1986). При проведении наблюдений с помощью трех пеленгаторов, например, можно рассчитать точку взаимопересечения одной пары пеленгов и скорректировать третий пеленг в направлении этой точки. Эта операция проводится тремя различными путями (для каждого пеленгатора) для данного вида наблюдений, а затем обобщается большое количество данных наблюдений, охватывающих все направления и расстояния.

После одного полного прогона результирующие поправки применяются частично к первоначальным данным, и новые прогоны повторяются до тех пор, пока не произойдет конвергенция поправок.

До проведения процедуры коррекции систематические отклонения по некоторым направлениям могут достигать10°. Более сложный метод был представлен в работе Orville (1987). Это своего рода выравнивание по методу наименьших квадратов, который легко применять к большому числу пеленгаторов.

Он может использоваться либо на основе многократного повторения с целью получения систематических поправок, либо в виде метода оптимизации на основе одноразового прогона.

Проблема, возникающая при использовании обоих вышеуказанных методов, заключается в том, что при наличии систематических ошибок пеленги в каждом направлении (фактически в секторах в несколько градусов) являются усредненными значениями большой выборки данных.

Остается также и разброс более случайного характера, который в некоторых секторах может составлять несколько градусов. Метод Орвилла лучше всего подходит для корректировки или оптимизации уже после внесения систематических поправок окончательных координат молний на основе сведения к минимуму таких случайных отклонений, причем независимо от того, какой метод используется для определения систематических ошибок. Следует помнить, что систематические ошибки после того, как они были установлены, рассматриваются в качестве постоянных величин для соответствующих приборов, в то время как окончательная оптимизация — это расчетная операция, проводимая отдельно для каждой вспышки молнии (в реальном масштабе времени или с запозданием). При определении систематических ошибок присутствуют и случайные ошибки, которые приводят к отклонениям в результатах. В действительности применение методов Маха и Орвилла к одним и тем же данным может привести к различным оценочным значениям систематической ошибки.

Решение задачи объединения двух различных видов ошибок было описано в работе Passi and Lopez (1989). При этом идея, которая была теоретически обоснована, заключается в представлении кривых линий систематической ошибки в виде двухпериодных синусоид с неизвестными коэффициентами, при этом в уравнениях для определения этих коэффициентов систематические и случайные ошибки разъединяются.

После того как на основе выборки репрезентативных накопленных данных найдены кривые систематических поправок, вероятно, наиболее легким для использования в целях оптимизации окончательных координат молний является метод Орвилла.

Рассмотренные выше ошибки вызываются внешними факторами. Тот факт, что пеленгатор принимает лишь относительно хорошо сформированные импульсы, означает, что соответствующее направление может быть рассчитано точно.

В зависимости от изготовителя ошибки пеленга, обусловленные искажением импульса и действием невертикальных компонентов электрического поля, остаются меньше 1°.

И еще одним фактором, который необходимо рассматривать при оценке работы системы определения координат молний, является ее эффективность обнаружения.

В работе Mach, MacGorman and Rust (1986) сделан вывод о том, что эффективность обнаружения системой, состоящей из четырех пеленгаторов – типичной сети для регионального использования, – составляет примерно 70 %. Данный метод заключался в проведении сравнения с наземными истинными данными.

В отношении еще одной системы из четырех пеленгаторов в работе Tuomi (1991) было определено, каким образом число обнаруженных вспышек молний зависит от числа имеющихся пеленгаторов.

Если предполагается, что все вспышки молний в направлении от облака к земле в номинальном районе охвата имеют шанс быть принятыми пеленгатором, то от 50 до 80 % из них действительно обнаруживаются им. В результате система из двух пеленгаторов обнаруживает лишь около половины этих вспышек молний, а система из трех пеленгаторов – от 70 до 80 %, что соответствует результату, полученному Махом. Такие результаты заставляют предположить, что значительная доля, порядка 10 %, вспышек молний по направлению от облака к земле не обнаруживается.

7.2.4 Обслуживание сети пеленгаторов

Сеть пеленгаторов относительно легко устанавливается после того, как будут найдены надлежащие места для пеленгаторов и созданы линии связи.

При условии правильной защиты от электрического перенапряжения эта сеть также достаточно надежна в техническом отношении и требует простого технического обслуживания.

К основным задачам при обслуживании относятся наблюдения за оперативной деятельностью АП и контроль за качеством данных. Оперативная деятельность, т. е. обеспечение визуального отображения данных и потока данных для пользователей и архивов, может и должна быть поставлена на автоматическую основу, после чего рутинные операции сократятся до минимума.

Требующими большего терпения, хотя и представляющими более интересную задачу, являются научные исследования, которые включают не только физические или метеорологические исследования конечных результатов, но и определение ошибок, обусловленных выбранным местом, обеспечение оптимизации обнаружения координат и результирующей точности и определение истинного района охвата с учетом эффективности обнаружения.

7.3 ПРИМЕРЫ СИСТЕМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ МОЛНИЙ ПО ВРЕМЕНИ ПОСТУПЛЕНИЯ СИГНАЛОВ

Согласно пояснению в разделе 7.1.4.2, в настоящее время в оперативном использовании находятся два типа систем, основанных на регистрации времени поступления атмосфериков (ВП). Ниже приводится по одному примеру каждого типа.

7.3.1 Региональная система ВП

Сообщения об опыте работы сетей ВП встречаются значительно реже, чем о работе сетей пеленгаторов, и по этой причине настоящий раздел относительно короче предыдущего. Большая часть описания посвящена указанию на сходства и различия этих двух систем.

7.3.2 Принимающие устройства для ВП

Антенна такого принимающего устройства представляет собой простую штыревую антенну, которую легко устанавливать, поскольку она не требует соблюдения каких-то особых условий, например отсутствия поблизости сооружений, кабелей и т. д. Другими словами, приемное устройство, которое регистрирует время поступления сигнала, а не направление, не восприимчиво к ошибкам, обусловленным местом установки этого устройства. Принимающее устройство представляет в цифровом виде импульс за период вплоть до 100 мс с разрешением в 0,2 мс, определяет полярность и время возникновения пика, а затем посылает всю эту информацию в центральный блок. Синхронизатор времени приемного устройства постоянно корректируется с помощью внешних сигналов времени, обычно LORAN-C или GPS. Приемное устройство анализирует каждый удар молнии отдельно.

7.3.3 Конфигурация сети

Для региональной сети определения координат молний приемные устройства устанавливаются в виде системы с длинной базовой линией, в которой эти приемные устройства размещены на расстоянии от 150 до 250 км друг от друга. Однако в свете последней информации представляется, что станции могут находиться на значительно большем удалении друг от друга и при этом будет сохраняться эффективность обнаружения и точность определения координат, достаточные для некоторых видов применений. Рекомендуемое число станций составляет от четырех до шести. Требования к выбор у геометрической формы сети аналогичны требованиям для сети пеленгаторов. Аналогичными являются также и требования, предъявляемые к линиям связи между принимающими станциями и центральным блоком.

7.3.4 Эффективность обнаружения и точность определения координат молний, характерные для сетей ВП

Метод определения координат молнии с учетом ВП в принципе очень точный. Пик импульса обычно можно определить с ошибкой в одну или несколько микросекунд, что соответствует пространственной ошибке порядка 1 км или менее.

Ошибки во времени прохождения сигнала, обусловленные различиями в распространении сигнала на трассах, также вызывают ошибки порядка 1 мкс. Однако могут возникать и более значительные ошибки, связанные с влиянием условий распространения на крутизну переднего фронта импульса главного удара. Координаты удара соответствуют началу подъема импульса, в то время как пик импульса наблюдается несколько позже (MacGorman and Rust, 1988). Различные удары вспышки молнии, координаты которых определяются с помощью пиков импульса, могут характеризоваться незначительным разбросом, однако координатам всей группы может быть присуща определенная ошибка из-за времени подъема импульса.

Еще большие ошибки могут быть связаны с неправильной интерпретацией пика импульса, который может оказаться расплывчатым или смещенным из-за наличия ионосферных отражений или искажения формы сигнала, связанного с расстоянием.

По сведениям одного изготовителя, такие ложные координаты являются обычно отдельными и

случайно распределенными, а их число можно уменьшать путем фильтрования (отбрасывая те случаи, когда для должным образом выбранного периода времени имеются только одни координаты в рамках элемента карты заданного размера).

Согласно сообщению, распространенному этим производителем, эффективность обнаружения молний в сети ВП, состоящей из четырех-шести станций, составляет приблизительно 80 – 85 % в том, что касается обнаруженных ударов.

Поскольку вспышка молнии может быть обнаружена даже в том случае, если один из ударов потерян (что также действительно и для пеленгаторов), эффективность обнаружения в том, что касается вспышек, может быть более высокой, хотя никаких оценок не приведено. Ничего не известно также об эффективности отсеивания импульсов из источников, отличных от молний по направлению от облака к земле.

7.3.5 Обслуживание системы ВП

С точки зрения эксплуатации и обслуживания сеть ВП полностью аналогична сети пеленгаторов, т. е. техническое обслуживание, возможно, не представляет особых проблем, в то время как задачи распространения данных и научного контроля качества являются долговременными и непростыми для решения.

7.3.6 Система, основанная на разности времени поступления сигнала (РВП)

Сеть, основанная на разности времени поступления сигнала (РВП), была разработана метеорологической службой Соединенного Королевства для контроля за координатами молний над большими территориями Европы и Восточной Атлантики.

Метод РВП был выбран потому, что он обеспечивает высокую точность определения координат на больших расстояниях. По изменениям формы сигнала атмосферика, которые происходят во время его распространения, рассчитывается разность во времени поступления сигналов между парами приемников (детекторов) с использованием метода корреляции запаздывания по времени, с учетом полной огибающей сигнала.

7.3.7 Сеть, основанная на разности времени поступления сигнала (РВП)

Эта сеть в Соединенном Королевстве состоит из пяти приемников, находящихся на расстоянии от 300 до 900 км друг от друга. Кроме того, отдельно от этой сети работают два дополнительных приемника, установленных в Гибралтаре и на о. Кипр на расстоянии соответственно 1 700 и 3 300 км. Два последних приемника особенно важны для обеспечения работы всей системы на больших расстояниях. Один приемник настроен так, что его чувствительность меньше, чем у других приемников, которые представляют данные об атмосфериках, полученные ими, в пределах заданного допуска по времени этого приемника. Затем рассчитываются координаты молний для тех событий, которые проходят по определенным критериям контроля качества; например, необходимо участие по меньшей мере четырех приемников, хорошо представленные корреляции и хорошо обозначенное изменение амплитуды атмосферика по мере его прохождения соответствующего расстояния.

7.3.8 Эффективность обнаружения и точность определения координат, обеспечиваемые системой РВП

Существующая на сегодняшний день точность определения координат составляет обычно от 1 до 2 км в Соединенном Королевстве, от 2 до 5 км в Европе и от 5 до 10 км над Восточной Атлантикой.

За пределами этих зон точность находится в пределах 1 и 2 % от дальности в 12 000 км. При исключении приемников, не принадлежащих Соединенному Королевству, точность снижается примерно в 10 раз за пределами его территории.

Действие существующей системы ограничивается как скоростью связи, так и мощностью процессора до регистрации 450 вспышек молний в час. В результате этого эффективность обнаружения вспышек молний является довольно низкой и изменяется вместе с общим уровнем активности в районе обслуживания. Эти колебания в Европе находятся в пределах от 25 до 70 %.

7.3.9 Обслуживание системы РВП

Генераторы точного времени, используемые на приемных станциях для синхронизации времени, требуют проведения их регулярной калибровки, т.е. сравнения с данными системы LORAN-C или GPS. Для системы обнаружения на больших расстояниях требуется надлежащая модель распространения сигнала, с тем чтобы вносить поправки, учитывающие влияние суточного цикла и изменения траектории сигнала при его прохождении над сушей/морем. При отсутствии такой модели проверки на согласованность по времени должны проводиться периодически с использованием данных от всех приемников в сети.

7.4 СРАВНЕНИЯ СЕТЕЙ ПЕЛЕНГАТОРОВ И УСТРОЙСТВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ВРЕМЯ ПОСТУПЛЕНИЯ СИГНАЛА

Вследствие того что системы пеленгаторов появились на коммерческом рынке с конца 70-х годов, а системы регистрации времени поступления сигнала по меньшей мере на пять лет позже, возникла значительная разница в имеющейся информации об опыте работы с этими системами. Несмотря на то что от различных установок LLP получено довольно много результатов, соответствующих сообщений о работе системы ВП все еще мало, и число сравнений между двумя системами незначительно. Поэтому представленные в настоящем документе результаты не следует обобщать и распространять на условия, действующие в разных странах; к тому же, и это более важно, данные системы постоянно совершенствуются.

Любому учреждению, планирующему создать систему для определения координат молний, следует оценить ситуацию, существующую на момент принятия этого решения, и ознакомиться с максимально возможным количеством новых сообщений на эту тему.

Одна из проблем, возникающих при проведении сравнений, заключается в том, что соответствующая информация публикуется не в общедоступных журналах, а в ведомственных отчетах, которые трудно получить. О результатах сравнения, проведенного MacGorman and Rust (1988), докладывалось в устной форме на одной из конференций, однако в документах этой конференции реальные результаты опубликованы не были; однако те же самые результаты цитируются Murphy (1988) в одном из неофициальных отчетов.

Результаты еще одного сравнения приводятся в исследовании Oskarsson (1989), опубликованном в виде ведомственного отчета на шведском языке.

Согласно работе Murphy (1988), для основных сетей пеленгаторов в США характерна средняя ошибка определения местонахождения, равная примерно 3 км; в районах, где пеленгаторы имеют короткие базисные линии, эта ошибка может быть меньше 1 км, а в районах с длинными базисными линиями – около 5 км. Типичное значение эффективности обнаружения составляет 70 %. Показатель ошибочных обнаружений очень низок. О том, используется ли в этой системе процедура оптимизации при расчете координат молний, не сообщалось. Ошибки в обнаружении координат молний системы ВП составляют порядка 10 км, а эффективность обнаружения 35 – 45 %. Однако вполне вероятно, что эти показатели к настоящему времени улучшились в результате технического прогресса.

В работе Oskarsson (1989) приведены результаты сравнения действия систем ВП и пеленгаторов в Швеции для нескольких грозовых явлений.

Пользователи системы ВП подсчитали, что средняя погрешность составляла 5 км и что система ВП работала лучше, чем система пеленгаторов, однако очевидно, что в последней не использовалась процедура оптимизации; впечатляющий пример влияния такой процедуры приведен в работе Passi and Lopez (1989). При установлении соотношения между числом вспышек молний и ударов оказывается, что эффективность обнаружения вспышек с помощью системы ВП ниже эффективности системы пеленгаторов на коэффициент от 1 до 1,5. В Финляндии было подсчитано, что погрешность в работе сети, состоящей из четырех станций пеленгаторов, составляет в среднем 5 км после внесения систематических поправок и оптимизации (Tuomi, 1991); показатель точности работы в оперативном режиме при отсутствии оптимизации несколько ниже.

В качестве вывода можно сказать, что у двух указанных конкурирующих систем в целом сопоставимые рабочие характеристики. При планировании покупки той или другой системы или даже системы от конкурирующих поставщиков полезно, используя самую новейшую информацию, получить ответы на следующие вопросы.

(a) Может ли центральный блок сети пеленгаторов проводить процедуру оптимизации?
(b) Имеется ли квалифицированный специалист по контролю за качеством данных, выдаваемых каждой системой?
(c) Каковы системы, если они вообще существуют, в соседних странах? Может ли быть создана полезная сеть?
(d) Есть ли доступ к достоверным сигналам проверки времени для системы регистрации времени поступления сигналов?
(e) Насколько хорошо обеспечено отсеивание ложных сигналов тревоги в системе регистрации времени поступления? Какова результирующая эффективность обнаружения?
(f) Важно ли, учитывая конкретный вид применения, идентифицировать вспышки молний, а не отдельные удары?
(g) Какие понадобятся линии связи? Для обеих указанных систем линии связи между центральным блоком и пеленгаторами/устройствами для определения времени поступления сигналов будут, по всей вероятности, дорогостоящими, если только нельзя будет использовать уже существующие средства связи.
(h) Какое число пеленгаторов или устройств для определения времени поступления сигналов

потребуется для обеспечения эффективности обнаружения и целесообразной точности определения координат молний в районе желаемого охвата?

(i) Существуют ли какие-либо соображения о выборе места для размещения пеленгаторов/ устройств для определения времени поступления сигнала, которые были бы оптимальными?

7.5 ОБЪЕДИНЕНИЕ МЕТОДОВ ПЕЛЕНГОВАНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ ПОСТУПЛЕНИЯ СИГНАЛОВ

Разработанная во Франции система определения координат молний под названием SAFIR представляет собой очень современное, но довольно дорогостоящее средство для обеспечения очень высокой эффективности обнаружения с хорошей точностью в радиусе действия, равном примерно 150 км, с использованием детекторов ОВЧ.

Типичная сеть состоит из трех приемников, размещенных в секторах в 120° на расстоянии от 20 до 70 км от центральной станции. Для каждого приемника используются три антенны, размещенные на расстоянии от 1 до 2 м от центральной точки всего сборного устройства, также в секторах в 120°. Это сборное устройство действует в качестве интерферометра для расчета как азимута, так и углов возвышения наблюдаемых явлений молнии. Скорость поступления данных достаточно высока для того, чтобы определить траектории молний, которые позволяют надежно провести различие между разрядами внутри облаков и разрядами по направлению от облака к земле. Это хорошая система для обеспечения предупреждений о возможности ударов молний в местах запусков ракет, в аэропортах и т. д., где важно знать и о молниях, возникающих внутри облаков. Поскольку у этой системы относительно небольшой радиус действия, она менее пригодна для использования в национальной сети обнаружения координат молний.

7.6 ПРЕДСТАВЛЕНИЕ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ ДАННЫХ О МОЛНИЯХ

В настоящее время благодаря многочисленным компьютерным средствам данные можно представлять самыми разными способами. Один из наиболее полезных методов для прогнозистов-метеорологов заключается в наложении координат молний на радиоэхо облаков на экране метеорологического радиолокатора или на снимок со спутника с целью определения грозовой активности облаков.

Компьютерные сети обеспечивают почти неограниченные возможности для распространения данных о координатах вспышек молний как в оперативном режиме, так и в исторической ретроспективе для всех заинтересованных лиц. Если и существуют проблемы, то общие для распространения любых видов информации, а не какие-либо конкретные для данных о координатах молний.

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

BBent, R. B. and Lyons, W. A., 1984: Theoretical evaluations and initial operational experiences of LPATS (lightning position and tracking system) to monitor lightning ground strikes using a time-of-arrival (TOA) technique. *Preprints of the Seventh International Conference on Atmospheric Electricity*, Albany, New York, American Meteorological Society, pp. 317–324.

Grandt, C. and Volland, H., 1988: Locating thunderstorms in South Africa with VLF sferics: comparison with METEOSAT infrared data. *Proceedings of the Eighth International Conference on Atmospheric Electricity*, Uppsala, Sweden, Institute of High Voltage Research, pp. 660–666.

Heydt, G. and Takeuti, T., 1977: Results of the global VLF-atmospherics analyser network. In: H.Dolezalek and R. Reiter, *Electrical Processes in Atmospheres*, Steinkopf, Darmstadt, pp. 687–692.

Holle, R. L., Lopez, R. E. and Watson, A. I., 1990: Cloud-to-ground lightning detection using direction-finder networks. *WMO Bulletin*, Volume 39, Number 3, pp. 177–180.

Johnson, R. L. and Janota, D. E., 1982: An operational comparison oflightning warning systems. Journal of *Applied Meteorology*, 21, pp. 703–707.

Krider, E. P., Noggle, R. C. and Uman, M. A., 1976:A gated, wideband magnetic direction finder for lightning return strokes. *Journal of Applied Meteorology*, 15, pp. 301–306.

Lee, A. C. L., 1986*a*: An experimental study of the remote location oflightning flashes using a VLF arrival time difference technique. Q*uarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 112, pp. 203–229.

Lee, A. C. L., 1986*b*: An operational system for the remote location oflightning flashes using a VHF arrival time difference technique. *Journal of Atmospheric Ocean Technology*, 3, pp. 630–642.

Lee, A. C. L., 1989: Ground truth confirmation and theoretical limits ofan experimental VLF arrival time difference lightning flash location system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 115.

Mac Gorman, D. R. and Rust, W. D., 1988: An evaluation of the LLP and LPATS lightning ground strike mapping systems. *Proceedings of the Eighth International Conference on Atmospheric Electricity*, Uppsala, Sweden, Institute of High Voltage Research, pp. 668–673.

Mach, D. M., Mac Gorman, D. R. and Rust, W. D., 1986: Site errors and detection efficiency in a magnetic direction-finder network for locating lightning strikes to ground. *Journal of Atmospheric Ocean Technology*, 3, pp. 67–74.

Maier, M. W., et al., 1984: Gated, wideband magnetic direction finders for locating cloud-toground lightning. *Preprints of the Seventh International Conference on Atmospheric Electricity*, Albany, New York, American Meteorological Society, pp. 305–310.

Murphy, J. D., 1988: *Lightning Detection System Acquisition and Application*. Fifth Weather Wing Forecaster Memorandum.

Orville, R. E., Jr., 1987: An analytical solution to obtain the optimum source location using multiple direction finders on a spherical surface. *Journal of Geophysical Research*, 92, (D9), pp. 10877–10886.

Orville, R. E., et al., 1987: Cloud-to-ground lightning flash characteristics from June 1984 through May 1985. *Journal of Geophysical Research*, 92 (D5), pp. 5640–5644.

Oskarsson, K., 1989: E*n jmfrande studie mellan blixtpejlsystemen LLP och LPATS*. Meteorological Institute, Uppsala Unviersity, Sweden.

Passi, R. M. and Lopez, E. L., 1989: A parametric estimation ofsystematic errors in networks of magnetic direction finders. *Journal of Geophysical Research*, 94 (D11), pp. 13319–13328.

Tuomi, T. J., 1991: On the location accuracy and detection efficiency of a lightning location system of four direction finders. Manuscript submitted to Geophysica.

ГЛАВА 8

СПУТНИКОВЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ

8.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В этой главе описываются методы дистанционного зондирования со спутников для измерения и наблюдения за метеорологическими и связанными с ними параметрами на поверхности Земли и в тропосфере, а также в стратосфере. Ее цель состоит в том, чтобы сравнить спутниковые данные с данными наземных систем, которые являются основной темой этого Руководства; при этом основное внимание уделяется оснащению и методам приведения данных спутниковых систем, а также различию и соответствующим преимуществам двух подходов. В разделах 8.2 и 8.4 приводится обзор спутниковой технологии, а в разделе 8.3 описываются пути получения метеорологических количественных данных по излучениям, которые непосредственно измеряются спутниковыми приборами, при этом оценивается их точность, представительность и связь с данными, полученными наземными системами.

Поскольку спутниковые системы постоянно развиваются, в данной главе рассматриваются и новые системы, которые находятся на стадии разработки и станут оперативными в ближайшие несколько лет. Основные методы в целом остались прежними, а приводимые здесь будут и в будущем верными для целей настоящего Руководства при сравнении с наземными методами. В качестве примеров применяемых спутниковых методов для получения метеорологических данных рассмотрены системы европейских метеорологических спутников и европейские системы обработки данных, однако и в других спутниковых системах используются главным образом аналогичные методы обработки и технология.

Приводимый в конце данной главы список литературы можно использовать для получения более подробной информации о спутниковой технологии и измерениях. Очень полезные общие описания можно найти в работе Rao et al. (1990), издании WMO (1994*b*) и в работе Smith (1985). В издании WMO (1994*a*) дано подробное описание спутников и приборов, а также изложены требования. Общая информация о требованиях ВМО содержится в ее публикациях (ВМО, 1981, 1989).

Типичная орбита для метеорологических спутников Земли расположена примерно на высоте 36 000 км или около 850 км; эти спутники используются для получения как изображений, так и количественной информации о характеристиках поверхности Земли, а также о состоянии атмосферы на самой низкой высоте 20 км. Для этого требуется оборудование с весьма чувствительными приборами и весьма дорогими системами обработки данных, однако затраты оправдываются за счет количества и качества данных. Ниже кратко обсуждается рентабельность спутниковых систем.

Использование датчиков на спутниковых платформах для проведения измерений геофизических параметров имеет определенные преимущества и недостатки по сравнению с использованием наземных наблюдательных систем. Эти преимущества и недостатки в кратком виде даны в таблице 8.1.

Одним из преимуществ использования спутников является возможность метеорологических спутников давать изображение. Изображения облачности – это неоценимая диагностическая информация, которая необходима при анализе метеорологических явлений. Данное преимущество можно увеличить, если использовать последовательные снимки с временной задержкой, что позволяет трансформировать наше понимание атмосферных процессов. Эта информация о состоянии облачности не является количественной.

Очень солидным аргументом в пользу спутников являются количественные метеорологические измерения. Для моделей численного прогнозирования требуются точные измерения атмосферных параметров с частыми временными интервалами для многих уровней и с небольшими интервалами в отношении поверхности Земли.

Требуемое пространственное разрешение наблюдений зависит от характера модели; для оперативной метеорологии требования к наблюдениям представлены в таблице 8.2.

Для прогнозирования в глобальном масштабе (см. таблицу 8.2) наземная сеть должна состоять примерно из 5 000 обычных станций, предпочтительно равномерно распределенных по всему миру, при этом каждая должна измерять приземное давление, а также ветер, температуру и влажность на многих уровнях от земной поверхности до высоты 50 гПа 2 – 4 раза в сутки. Однако в океанах невозможно иметь такую сеть, к тому же ее стоимость была бы порядка 10 млрд. долл. США в год.

ТАБЛИЦА 8.1. Преимущества и недостатки спутниковых систем по сравнению с системами наземных наблюдений

Преимущества	*Недостатки*
Глобальный охват, включая удаленные районы суши и океанов	Атмосферные, океанографические и гидрологические параметры не измеряются непосредственным образом
Высокое пространственное и временное разрешение по крупным районам	Низкая точность измерений в точке: постоянного внимания требуют калибровка приборов и процедуры приведения данных
Возможность измерения широкого диапазона параметров	Длительные сроки подготовки для новых приборов
Благоприятное соотношение затрат/выгод для большого объема данных	Крупные капитальные затраты на запуск спутника и на центральное наземное оборудование
Одновременное измерение многих параметров	Выход из строя датчика может привести к полной потере данных
Продолжение измерений при суровых условиях погоды	При большом слое облачности можно проводить только частичные
При определенных условиях измерения по всей толщине атмосферы	Следует обрабатывать и архивировать очень большое количество данных; потребители не могут легко изменить сбор данных

ТАБЛИЦА 8.2. Модельные требования для различных масштабов прогнозирования

	ГЛОБАЛЬНЫЙ	*РЕГИОНАЛЬНЫЙ*	*ЛОКАЛЬНЫЙ: ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕКУЩЕЙ ПОГОДЫ*
Временной масштаб прогнозирования	*Средний срок 2 – 14 сут*	*Краткий срок 12 – 38 ч*	*Очень краткий срок 0 – 12 ч*
Прогнозируемый район (радиус в км вокруг точки, для которой требуется прогноз)	Глобальный	3 000	1 000
Горизонтальное разрешение модели (км)	150	75	15 (5 для прогнозирования текущей погоды)
Частота охвата	12 ч	6 ч	1 ч (15 мин для прогнозирования текущей погоды)
Скорость выдачи продукции	3 ч	2 ч	30 мин (5 5 мин для прогнозирования текущей погоды)

Однако с помощью системы из семи метеорологических спутников можно наблюдать за всем земным шаром. Глобальная программа по запуску соответствующего числа новых спутников каждый год, по мере надобности, для замены спутников, срок службы которых подошел к концу, и для обеспечения оперативного резерва и эксплуатации общей системы может стоить менее 500 млн. долл. США в год, за исключением расходов на разработку.

Аналогичные аргументы можно выдвинуть и в отношении более плотных наблюдательных сетей, необходимых для прогнозирования в региональном и локальном масштабах. Данные, которые используются в современных оперативных центрах для прогнозирования текущей погоды(0 – 2 ч), имеют даже более ограниченные условия, чем те, которые показаны в четвертой графе таблицы 8.2. Они должны показывать быстрые изменения в рамках небольших явлений; поэтому важными являются следующие требования:

(a) способность прогнозировать с быстрым сроком реагирования;
(b) высокое временное разрешение (5 мин для конвекции;15 мин для фронтов);

(c) высокое пространственное разрешение (способность иметь разрешение в 1 км для конвективных явлений и в 3 км для фронтальных явлений).

Для того чтобы удовлетворить эти потребности в наблюдениях, необходимо дополнительно увеличить плотность обычных сетей, в то время как та же глобальная система спутников при соответствующем их расположении могла бы обеспечивать такую же повышенную плотность наблюдений при сравнительно небольших дополнительных затратах.

Спутники, несмотря на то, что сами по себе являются дорогими, обеспечивают, таким образом, больше наблюдений на доллар; отсюда основной мотивацией наших интересов в количественном использовании метеорологических спутников является финансовая. Представляется, что они обеспечивают рациональное решение проблемы получения данных наблюдений с достаточным разрешением и точностью.

К числу метеорологических параметров, которые в настоящее время измеряются на оперативной основе с изменяющимися разрешением и точностью, относятся следующие:

(a) профиль температуры атмосферы и температура на верхней границе облачности и на поверхности моря и суши;
(b) профиль влажности;
(c) ветер на уровне облаков и на поверхности океана;
(d) интенсивность осадков и количество жидкой и общей воды;
(e) радиационный баланс и альбедо;
(f) тип облаков и высота верхней границы;
(g) общее содержание озона;
(h) ледяной и снежный покров и их граница.

В данной главе рассмотрены многие из указанных выше измерений, а также методы для измерения не метеорологических явлений, таких как растительность и вулканический пепел, сведения о которых также важны в оперативной работе.

Спутниковые измерения имеют как горизонтальное, так и вертикальное пространственные разрешения, но они менее точные, чем наземные измерения, не отвечают требованиям к разрешению, а во многих случаях и к точности, необходимой для всех применений, включая моделирование; поэтому лучше всего их использовать в сочетании с наземными сетями наблюдений.

Космические и наземные наблюдения должны рассматриваться как взаимодополняющие, не конкурирующие источники данных.

8.2 ОПЕРАТИВНЫЕ СПУТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ

8.2.1 Космические летательные аппараты

При проектировании космического летательного аппарата необходимо учитывать отсутствие гравитации на свободной орбите, условия высокого вакуума, в котором материалы имеют свойства, весьма отличные от свойств у поверхности Земли, и наличие энергетических частиц радиации и микрометеоритной пыли.

Космический летательный аппарат (шина) представляет собой каркас, на который монтируются приборы, проводящие мониторинг Земли и ее атмосферы, но он должен обеспечивать необходимой энергией приборы, осуществлять контроль температуры и характеристик, поддерживать систему обработки данных и связь. Обычно энергию получают с помощью солнечных элементов, дополненных батареями для ее накопления во время нахождения спутника на ночной стороне Земли.

Датчики и другое электрическое оборудование работают только при определенных температурных режимах. Отсюда тепло, вырабатываемое электронным оборудованием или поглощаемое от падающей радиации, должно уравновешиваться излучением длинноволновой радиации в космическое пространство. Активный контроль температуры может быть достигнут за счет изменения баланса длинноволновой радиации посредством управления пространственным положением или за счет функционирования шторок для увеличения или уменьшения площади излучающих поверхностей, обращенных в холодный космос.

Контроль характеристик летательного космического аппарата осуществляется с помощью различных средств, в зависимости от общей конструкции.

Точная скорость вращения может поддерживаться за счет изменения распределения массы спутника, а следовательно, – момента его инерции. Альтернативно можно использовать инерционные системы, которые вращаются в соответствии с магнитным полем Земли, или задействовать противодействующие струи. Стоит отметить, что чем более устойчивым является аппарат, тем дольше он служит. Атмосферное трение не позволяет использовать высоту орбит намного ниже 300 км, поскольку значительно снижается срок службы летательного аппарата. Однако на более высоких орбитах это сопротивление незначительное, и его срок службы достигает нескольких лет.

8.2.2 **Динамика спутниковых орбит**

Траектория спутника, двигающегося без трения в гравитационном поле сферической планеты (рисунок 8.1), может быть эллиптической, параболической или гиперболической в зависимости от его начальной скорости (Massey, 1964). Спутник, вращающийся вокруг Земли, имеет эллиптическую орбиту или, в особом случае, круговую орбиту. Для эллиптической орбиты (рисунок 8.1 a) расстояние r спутника от центра Земли определяется уравнением:

$$r = \frac{a(1-e^2)}{1+e\cos\theta} \tag{8.1}$$

где θ – угол между существующим радиусом вектором спутника и радиусом-вектором в перигее (ближайшая точка орбиты к Земле); a – главная полуось эллипса, ae – смещение центра эллипса от центра Земли, где e – эксцентриситет эллипса.

Период T прохождения спутником по орбите составляет

$$r = 2\pi\left(\frac{a^3}{GM}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{8.2}$$

где G – гравитационная постоянная, M – масса Земли, а $GM = 3{,}986\,03 \times 10^{14}$ м^3/с^2. Для круговой орбиты с центром на Земле $e = 0$, $a = r$, а горизонтальная скорость спутника составляет:

$$v_0 = \left(\frac{GM}{a}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{8.3}$$

С учетом высоты h над Землей (рисунок 8.1 (b)) и ускорения вследствие гравитации на поверхности Земли $g = GM/R^2$ (где R = 6 378 км) – среднеэкваториальный радиус Земли) получаем

$$v_0 = R\left(\frac{g}{R+h}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{8.4}$$

Ракета, несущая космический летательный аппарат, должна запускаться с таким расчетом, чтобы она

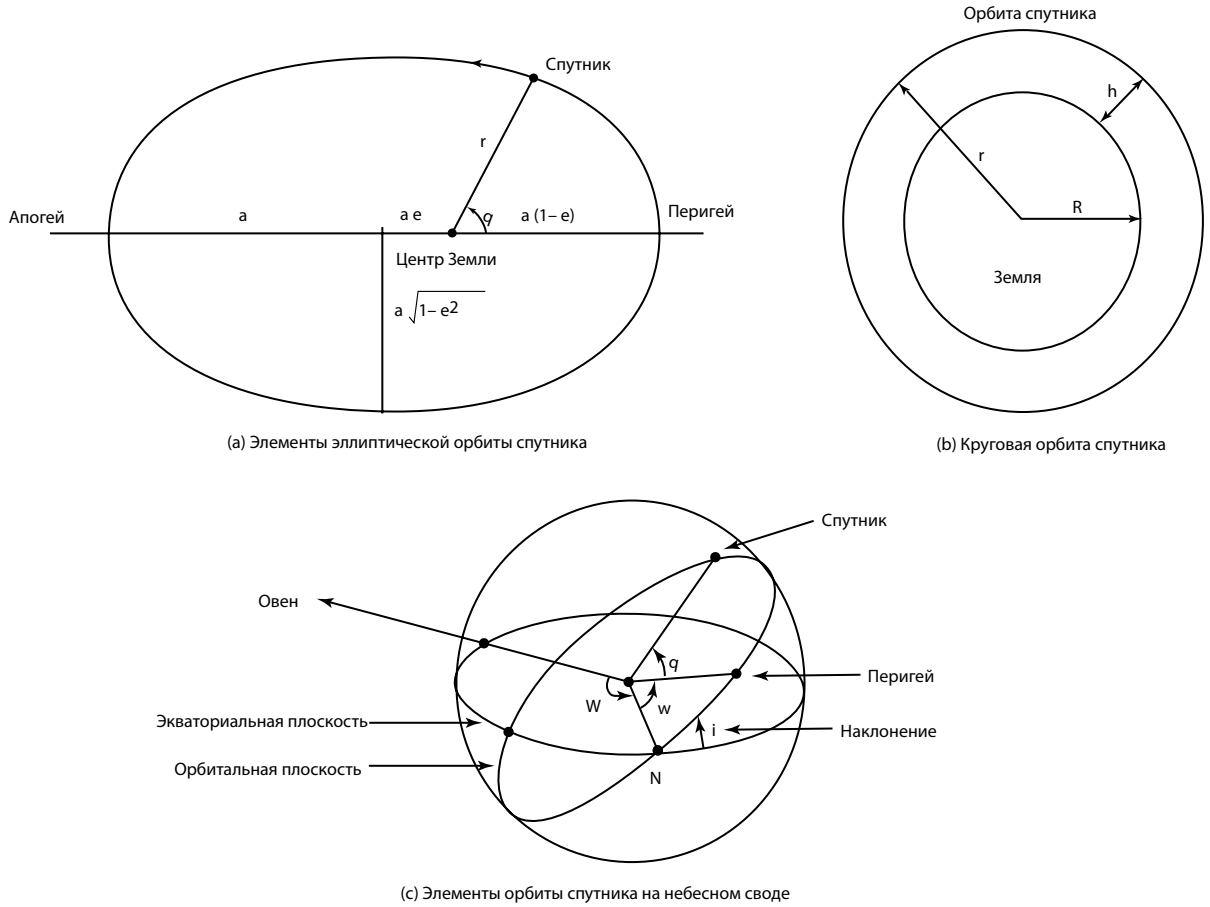


Рис. 8.1. Форма орбит спутника

вышла на такую траекторию, при которой спутник получит заданные высоту h и скорость V. Если спутник выводится на высоту h, его скорость $V < V_0$, то он попадает на эллиптическую орбиту, для которой $a < (h+R)$.

Однако если $V > V_0$, спутник перейдет на более высокий эллипс, $a > (h+R)$. Если $V > 2V_0$, то орбита становится параболической, спутник достигнет зоны выхода из сферы притяжения и уйдет с орбиты вокруг Земли.

При выведении спутника на геостационарную орбиту он должен вращаться в том же направлении, что и Земля, с периодом в одни сутки.

Круговая орбита над экватором является стационарной по отношению к Земле, и поэтому спутник всегда обращен к одному и тому же району поверхности Земли. При T = 1 сут = 86 400 с из уравнения (8.2) получаем a = 42 290 км, отсюда для геостационарной орбиты $h = a–R$ = 35 910 км.

Более низкие орбиты имеют более короткие периоды обращения. Спутники на высотах между 500 и 2 000 км обычно располагаются вблизи круговых полярных орбит таким образом, что они двигаются над полюсами с периодом около одного или двух часов. Обычная высота для метеорологических спутников составляет 880 км. Поскольку Земля вращается под этой орбитой, спутник несколько раз в сутки эффективно сканирует ее поверхность с севера на юг с одной стороны и с юга на север с другой стороны, достигая большего освещения земной поверхности, чем если бы он был на неполярной орбите.

В проводившихся до сих пор обсуждениях предполагалась сферическая симметрия и нулевое трение. На практике это не так. Основное отклонение от чисто эллиптической орбиты вызывается несимметричными силами тяжести из-за неровной конфигурации и распределения массы Земли. Солнечная и лунная гравитация не принимаются во внимание, однако важное значение имеет экваториальное утолщение Земли, вызывающее незначительные изменения периода вращения спутника, что со временем приводит к изменению положения в перигее эллиптической орбиты.

Эта прецессия вызывает вращение плоскости орбиты (см. рисунок 8.1 (c)). Для определенной высоты орбиты возможно выбрать наклонение i, с тем чтобы достичь скорости изменения плоскости орбиты, равной 0,986 в сутки, что эквивалентно одному обороту плоскости орбиты в год; в действительности i > 90. Отсюда можно зафиксировать орбиту относительно Солнца, поскольку Земля обращается вокруг него один раз в год; такая орбита называется солнечно-синхронной.

Спутник пересекает экватор в одно и то же местное солнечное время по каждому проходу в течение года. Большинство полярно-орбитальных спутников находится на солнечно-синхронных орбитах. На практике наклонение геостационарной орбиты будет также изменяться, и в действительности следует использовать более общий термин «геосинхронная орбита». Спутник появляется на узком участке неба восемь раз в сутки. Более подробно вопрос о динамике орбиты обсуждается в работе King-Hele (1964). Высота орбиты спутника определяет радиус контактной окружности для непосредственного приема данных, передаваемых в реальном времени со спутника, а также ширину полосы, которую можно наблюдать с помощью датчика спутника.

Обе характеристики улучшаются посредством увеличения высоты спутника. И хотя большая высота орбиты имеет преимущества, здесь есть практические трудности. Спутники на орбите выше 1 100 км встречаются с более возрастающим потоком заряженных частиц (которые могут ухудшить работу солнечных панелей и других материалов).

Для увеличения высоты орбиты также требуются более чувствительные приборы для сохранения такого же наземного разрешения.

8.2.3 Спутниковые приборы

В этом разделе описываются приборы, установленные на спутниках США, поскольку они наиболее широко используются в таких системах.

Информация о новых спутниковых приборах, их характеристиках и о работе более старых приборов содержится в ежегодном отчете ВМО (WMO, 1994*a*).

В установленных на спутниках приборах для наблюдения за атмосферой используется электромагнитное излучение (ЭМИ), либо в пассивном режиме, т. е. они обнаруживают ЭМИ, излучаемое от поверхности Земли или от атмосферы, либо в активном режиме, т. е. посредством использования ЭМИ, вырабатываемого в датчике для измерения атмосферы и характеристик поверхности. На рисунке 8.2 показан электромагнитный спектр и диапазоны, используемые в настоящее время датчиками дистанционного зондирования, установленными на спутниках. Для наблюдений за характеристиками суши и моря необходимо использовать солнечную радиацию с длинами волн между 100 нм и 1 мкм.

Однако радиационное излучение от моря обнаруживается в диапазоне от 3 до 40 мкм и в микроволновых диапазонах.

Не все части этих диапазонов можно использовать, поскольку атмосфера не пропускает электромагнитную радиацию на всех длинах волн, как это показано на рисунке 8.3. Этот вопрос будет рассмотрен в разделе 8.3.

Приборы на спутниках могут быть пассивными или активными. Большинство оперативных систем являются пассивными, получающими рассеянное, отраженное или излученное ЭМИ от атмосферы или от поверхности Земли. Активные системы передают ЭМИ, обычно микроволновое, и обнаруживают его после того, как оно рассеяно или отражено вновь на спутник.

Приборы можно разделить на те, которые сканируют и которые не проводят таких операций.

Телесный угол, вмещающий поверхность и атмосферу, от которых прибор получает сигнал в какой-либо момент, называется мгновенным полем обзора (IFOV), а на поверхности Земли – зоной обслуживания. Граница IFOV не есть точное разграничение между 0 и полной чувствительностью, а в действительности является некой условной величиной пороговой чувствительности.

Поле обзора можно расширить на большую площадь за счет выполнения прибором спутника процедуры сканирования. Если космический аппарат стабилизируется вращением, то в этом случае вращение можно использовать для того, чтобы прибор проводил процедуру сканирования.

Имеется много различных механических и электронных систем сканирования. Во многих телескопах, используемых в спутниковых приборах, для образования первичных изображений используют зеркала. По сравнению с объективом преимущество зеркала состоит в том, что оно почти не подвергается цветным аберрациям, но должно быть параболическим, чтобы избежать сферической аберрации.

Представление о приборах, используемых в оперативных метеорологических спутниках в настоящее время, можно получить из последующих кратких описаний приборов для зондирования и получения снимков, установленных на полярно- орбитальных спутниках НУОА и на спутниках серии ГОЕС.

8.2.3.1 Полярно-орбитальные спутники устройство для получения изображений

Вероятно, наиболее известным и широко распространенным из всех спутниковых приборов на сегодняшний день является усовершенствованный

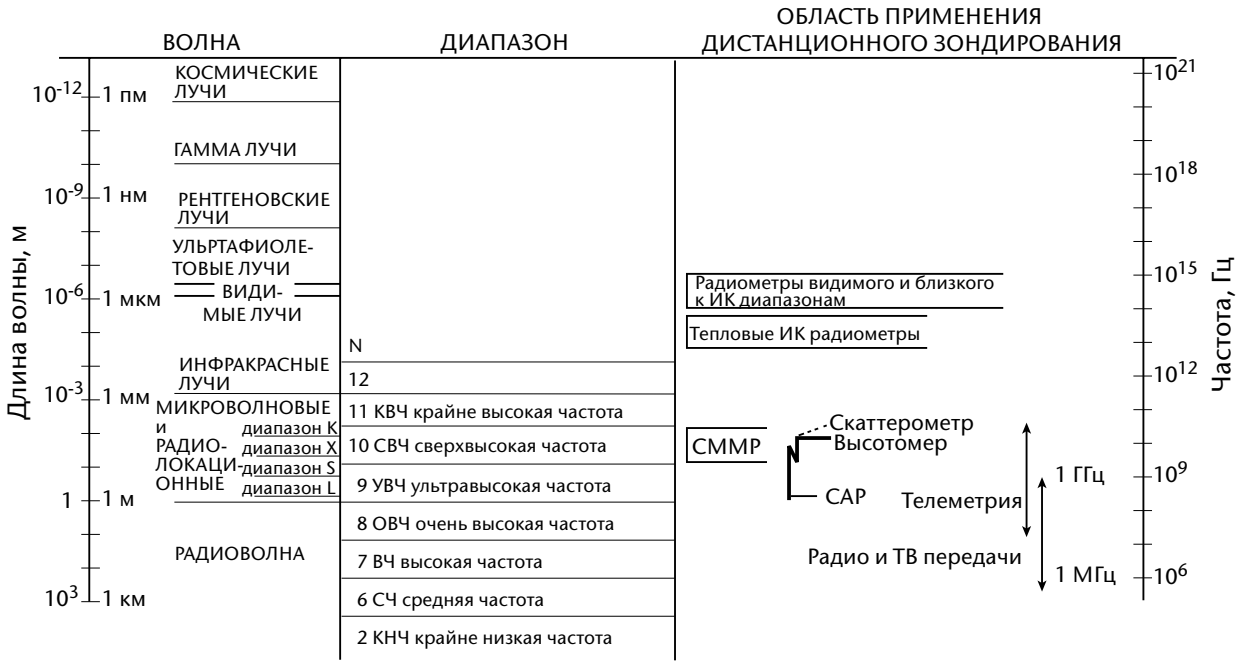


Рис. 8.2. Электромагнитный спектр, показывающий определение некоторых диапазонов и типичные области применения дистанционного зондирования

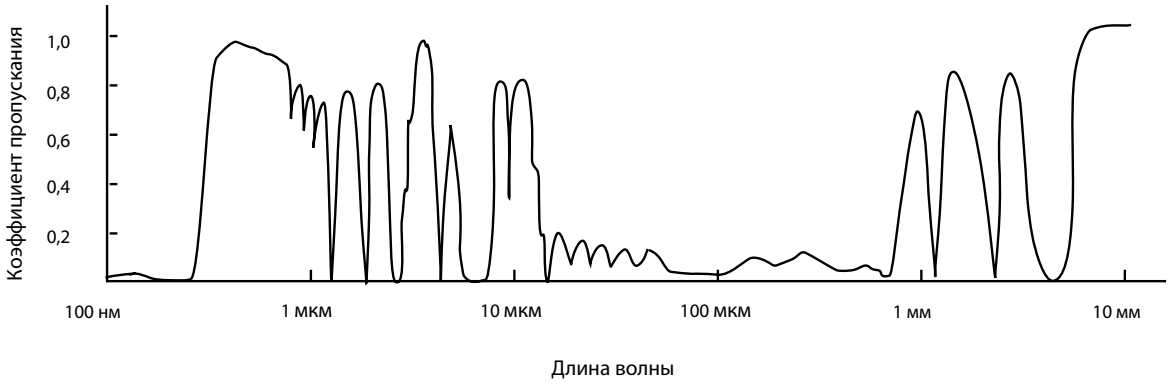


Рис. 8.3. Примерный коэффициент пропускания электромагнитных

радиометр очень высокого разрешения (УРОВР), который в его современном виде используется на спутниках серии ТАЙРОС-Н/НУОА-А с 1978 г. Движение спутника, на котором этот прибор установлен, обеспечивает одну ось для сканируемого изображения, сравниваемого с телевизионным снимком, а вторую ось сканирования – движущееся зеркало в самом приборе. Оптические системы направляют изображение на детекторы, которые регистрируют значения яркости, наблюдаемые в пределах зоны обзора прибора в различных областях спектра.

Современный УРОВР имеет пять спектральных каналов, выбираемых с помощью фильтров, установленных на вращающемся диске. На одном канале проводятся наблюдения в видимом диапазоне (0,58 – 0,68 мкм), на другом – в близком к инфракрасному (0,72 – 1,0 мкм) и на трех – в тепловом инфракрасном (3,55 – 3,93; 10,3 – 11,3 и 11,5 – 12,5 мкм).

Снимки полного разрешения с полем обзора в надире около 1,1 км транслируются на глобальном уровне для местных потребителей. Отдельные данные высокого разрешения и данные с уменьшенным разрешением (4 км) накапливаются на борту спутника для сброса на наземные станции, обычно один раз за виток. Передаются также и снимки низкого разрешения с использованием формата метеорологического факсимиле, позволяющего осуществлять прием недорогими приемниками и с использованием всенаправленной антенны.

ПРИБОР ДЛЯ ЗОНДИРОВАНИЯ

Измерения со спутников на полярной орбите рассчитываются по данным, получаемым от группы, состоящей из трех приборов, которые вместе называются ТОВС (что означает прибор ТАЙРОС для оперативного вертикального зондирования).

Сюда входит 20-канальный инфракрасный зонд с высокой разрешающей способностью (ХИРС), четырехканальный микроволновый зонд (МСЮ) и трехканальный инфракрасный стратосферный зонд (ССЮ). Характеристики прибора ТОВС приведены в таблице 8.3. В таблице показано число каналов; поле обзора в надире (ПОН); апертура; угол обзорного сканирования; ширина полосы; число элементов на обозреваемую полосу; уровень цифрового преобразования данных для четырех приборов, установленных на полярно-орбитальных спутниках серии НУОА. Для сравнения также включены данные для УРОВР.

В приложениях 8.А и 8.В содержатся подробные сведения о каналах УРОВР и ХИРС и об их использовании. На полярно-орбитальных спутниках серии НУОА установлены и другие приборы, включая спектральный радиометр для исследования обратного рассеяния солнечного УФ-излучения (СРУФ) и радиометры для эксперимента по изучению радиационного баланса Земли (ЭРБЗ).

В средних широтах полярно-орбитальный спутник проходит над одной и той же точкой дважды в сутки. Выбор времени суток, в которое спутник проходит по каждой долготе, позволяет оптимизировать работу приборов, уменьшить время между наблюдениями и обеспечить данными для прогностических расчетных моделей.

Установка на спутниках, начиная с НУОА-К, 20-канального микроволнового зонда АМСЮ (усовершенствованный прибор микроволнового зондирования) намного увеличит поток данных от космического аппарата, что в свою очередь внесет изменения в обслуживание прямыми передачами.

Одновременно с этим планируется убрать два других прибора – МСЮ и ССЮ, – имеющих в общей сложности семь каналов.

Таблица 8.3. Приборные системы на спутниках НУОА

Прибор	*Число каналов*	*ПОН (км)*	*Апертура (см)*	*Угол сканирования (°)*	*Ширина полосы (км)*	*Число шагов*	*Данные (в битах)*
ССЮ	3	147	8	±40	±736	8	12
МСЮ	4	105	—	±47,4	±1 174	11	12
ХИРС	20	17	15	±49,5	±1 120	56	13
УРОВР	5	1,1	20,3	±55	±1 440	2 048	10

Таблица 8.4. Системы приборов в видимом и ИК -диапазонах, установленные на геостационарных спутниках НУОА с вращающимся сканированием

Канал	*ПОН (км)*	*Угол сканирования (°)*	*Ширина полосы (км)*	*Пиксели/полоса*	*Цифровое преобразование (бит)*
Видимый	1	±8,70	±9 050	8 x 15 228	6
ИК	7–14	±3,45	±2 226	3 822	10

8.2.3.2 Геостационарные спутники

Устройство для получения изображений

Название радиометра, используемого на геостационарных спутниках США вплоть до ГОЕС-7 (все стабилизируются за счет вращения), отражает его предназначение: радиометр вращательного сканирования в видимом и ИК -диапазонах (ВИССР), – относимое к его каналам получения изображений. Как и атмосферный зонд ВИССР (АЗВ), он имеет 12 ИК-каналов. Восемь параллельных полей обзора в видимом спектре (0,55 – 0,75 мкм) позволяют обозревать освещенную Землю с разрешением в 1 км.

Прибор для зондирования

двенадцать ИК-каналов позволяют проводить наблюдения за восходящей земной радиацией в диапазонах от 3,945 до 14,74 мкм. Из этих каналов два являются окнами прозрачности и позволяют наблюдать за поверхностью Земли, семь – за радиацией в атмосферных полосах поглощения диоксида углерода, а оставшиеся три – за радиацией в диапазонах водяного пара. Выбор того или иного канала позволяет проводить наблюдения за атмосферной радиацией по изменяющимся высотам в атмосфере. С помощью математической инверсии можно получить оценку температур по высоте в нижней атмосфере и стратосфере. Еще одним выходным продуктом является оценка содержания атмосферного водяного пара на различных по толщине слоях.

Характеристики прибора АЗВ/ВИССР даны в таблице 8.4. В ней приводятся подробные характеристики сканирования спутниками серии ГОЕС, включая поля обзора в надире (ПОН) для каналов в видимом и ИК-диапазонах; углы сканирования (на космическом аппарате); результирующая ширина полосы на поверхности Земли; число элементов изображения (пиксели) на полосу; и уровень цифрового преобразования для каждого элемента.

Дополнительные приборы

на спутниках серии ГОЕС работают две дополнительные системы по сбору данных. Сочетание трех приборов образует систему для изучения космической среды (СЕМ). С ее помощью собирают данные об уровнях излучения солнечных лучей и ведется контроль мощности магнитного поля, а также определяются скорости поступления частиц высокой энергии. Система сбора данных обеспечивает прием сводок, передаваемых по радио с платформ сбора данных, расположенных на Земле, и с помощью ретрансляторов направляет эти сводки в центральный пункт их обработки.

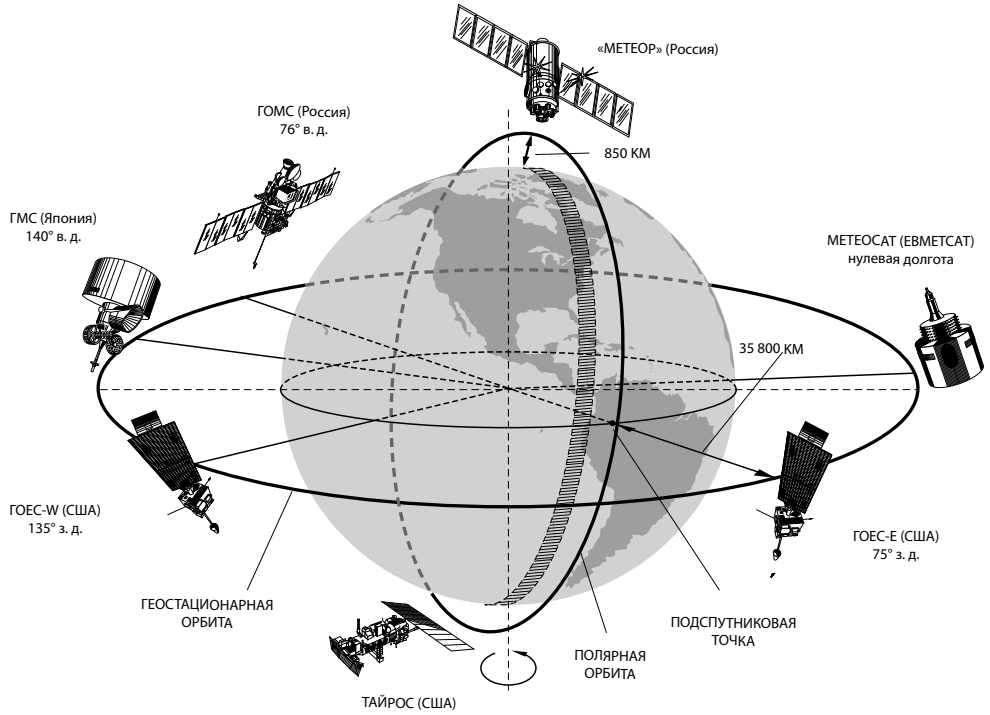


Рис. 8.4. Глобальная система наблюдений со спутников в рамках Всемирной службы погоды

Операторы платформ также могут получать эти данные с помощью прямой трансляции.

Новые системы

Запущенный в 1994 г. спутник ГОЕС-8 имеет трехосную стабилизацию и не использует больше систему АЗВ/ВИССР. На нем установлен прибор для получения изображений и зонд, аналогичные во многих отношениях УРОВР и ТОВС соответственно, но с более высоким горизонтальным разрешением.

8.2.4 Современные оперативные метеорологические и связанные с ними спутники

Более подробная информация об оперативных и экспериментальных спутниках представлена в публикации ВМО (WMO, 1994 a). Для удобства ниже приводится их краткое описание.

На рисунке 8.4 изображена Глобальная система спутниковых наблюдений в рамках Всемирной службы погоды. Имеется много других спутников для обеспечения связи, для экологических и военных целей, некоторые из них используются и для метеорологических целей.

К низкоорбитальным спутникам относятся:

(a) *Серии спутников ТАЙРОС-Н/НУОА-А*: гражданские спутники США. Система состоит по меньшей мере из двух спутников, причем последний, НУОА-12, был запущен в 1991 г. Эти спутники обеспечивают получение изображений и имеют приборы для зондирования температуры, а также для сбора данных и определения местонахождения платформ. Некоторая продукция этих систем предоставляется по ГСТ.

(b) *Серия ДМСП*: военные спутники США; они обеспечивают получение изображений и данных микроволнового зондирования, а прибор ССМ/I – микроволновых снимков. Передачи этих спутников в реальном времени закодированы, но могут предоставляться для гражданских целей.

(c) *«Метеор-2», русская серия*; обеспечивает получение изображений и данных зондирования, однако изображения инфракрасного диапазона имеют более низкое качество. Ограниченные данные передаются по ГСТ, включая изображения облачности над южными полярными широтами.

(d) *Серия FY-1*, запущена Китаем; обеспечивает получение изображений в видимом и ИК-каналах.

(e) *СПОТ*, французский спутник; обеспечивает получение на коммерческой основе изображений высокого разрешения.

(f) *ЕРС-1*, экспериментальный спутник ЕКА; снабжает данными о температуре поверхности моря, приземном ветре и волнении, а также

другими видами океанографических и экологических данных; запущен в 1991 г.

К геостационарным спутникам относятся:

(a) ГОЕС: спутники США. В настоящее время спуники серии ГОЕС предоставляют изображения, данные зондирований и данные о движении облаков. Если работают два спутника, то они обычно располагаются в районе 75 и 135° з. д.

(b) ГМС, японские спутники; обеспечивают диапазон услуг, аналогичный услугам спутников ГОЕС, но без зондирований; работают в районе 140° в. д.

(c) МЕТЕОСАТ, спутники Евметсат, изготовленные ЕКА; обеспечивают диапазон услуг, аналогичный оказываемым спутниками ГОЕС, работают в районе нулевой долготы.

(d) ИНСАТ, индийский спутник с трехосной стабилизацией; размещен в районе 74° в. д., впервые запущен в 1989 г., обеспечивает получение изображений, но по ГСТ передаются только данные о ветре по движению облаков.

Таким образом, в настоящее время эффективно работают четыре геостационарных спутника.

8.3 МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ

8.3.1 Получение геофизических данных по измерениям излучения

Установленные на спутниках приборы измеряют излучение в ряде определенных полос спектра.

Эти данные передаются на наземные станции и могут использоваться для составления изображений или для расчета температур, концентраций водяного пара и других радиационно-активных газов, а также других свойств поверхности Земли и атмосферы. Подобные измерения можно проводить на многих уровнях, и по их данным можно построить профили атмосферы.

Концептуально, изображения являются непрерывными двумерными распределениями яркости.

Именно эту непрерывность мозг способен воспринять при обработке. На практике спутниковые изображения представляют собой совокупности близкорасположенных их элементов (пиксели), при этом каждый имеет особую яркость.

При обзоре на соответствующем расстоянии они не отличаются от непрерывных функций. Глаз и мозг используют относительные контрасты в рамках изображений с различными пространственными частотами для определения положения и видов многих метеорологических явлений.

Данные зондирований обычно используют в численных моделях, и поэтому они и большая часть других количественных данных, получаемых от совокупности элементов, часто принимаются как значения в точке.

Данные об излучениях, получаемые по каналам видимого спектра, можно преобразовать в яркость или в отображение наблюдаемой поверхности.

Данные, получаемые по ИК-каналам, можно преобразовать в температуру, используя концепцию яркостной температуры (см. раздел 8.3.1.1).

Существуют ограничения как количества, так и качества информации, получаемой при измерении полей излучений со спутника. Для того чтобы определить, откуда возникают эти ограничения, следует рассмотреть образцовую систему пассивного зондирования. Предполагается, что поверхность Земли и атмосфера вместе отражают или испускают, или то и другое, электромагнитное излучение в направлении системы. Физические процессы можно в общем виде изложить следующим образом.

Изменения в отраженной радиации вызываются:

(a) возвышением Солнца;
(b) азимутом спутник – Солнце;
(c) углом обзора спутника;
(d) прозрачностью объекта;
(e) отражательной способностью подстилающей поверхности;
(f) степенью, с которой объект заполняет поле обзора;
(g) поверхностными тонкими слоями (неплотные облака или аэрозоли).

Многие облака далеко не однородны по горизонтали и не параллельны по плоскости. По опыту интерпретации обычных спутниковых изображений нам известно, что важное значение имеют также и другие факторы:

(a) затенение от Солнца более высокими объектами;
(b) форма объекта (топография облаков), создающего тень и затененность в отраженном свете.

Спутниковые наблюдения II.8—7

Изменения в нисходящей радиации обычно вызываются:

(a) углом обзора спутника;
(b) температурными колебаниями облака;

(c) температурными колебаниями поверхности (под облаком);
(d) профилем температуры атмосферы;
(e) колебаниями излучательной способности облака;
(f) колебаниями излучательной способности поверхности;
(g) колебаниями в рамках поля обзора спутниковых приборов;
(h) составом атмосферы между объектом и спутником (водяной пар, диоксид углерода, озон, неплотные облака, аэрозоли и т. д.).

Система состоит главным образом из оптических средств для сбора данных о радиации, детектора для определения ее количества, определенного оборудования телесвязи для представления этого количества в цифровой форме (перевода его в числа) и для передачи этой информации на Землю, оборудования для приема информации и расшифровки ее в удобную форму, а также из устройства, на котором представлять эту информацию.

На каждом этапе теряется потенциально полезная информация о наблюдаемом изображении. Это происходит вследствие ряда процессов цифровых преобразований, которые трансформируют непрерывное изображение. Сюда относятся разрешение в пространстве, длина волны и радиометрическая продукция, рассматриваемые в разделе 8.3.1.2.

8.3.1.1 ИЗЛУЧЕНИЕ И ЯРКОСТНАЯ ТЕМПЕРАТУРА

Излучение от абсолютно черного тела

«Черное тело» поглощает всю радиацию, которая на него попадает. В общем, тело поглощает только часть падающей радиации; эта часть известна как поглощательная способность и зависит от длины волны. Аналогичным образом, эффективность излучения известна как излучательная способность. При определенной длине волны:

$$\text{Излучательная способность} = \text{Поглощательная способность} \qquad (8.5)$$

Это закон Кирхгофа.

Излучательная способность (мощность на единицу площади на стерадиан) на единицу интервала длины волны, излучаемой черным телом при температуре T при определенной длине волны λ, определяется

$$B_\lambda(T) = \frac{2\pi hc^2\lambda^{-5}}{\exp(hc/k\lambda T) - 1} \qquad (8.6)$$

где B_λ (Вт/м^2 ср см) и его эквивалент в единицах волнового числа B_ν (Вт/м^2 ср см) известны как функция Планка; c, h и k – скорость света, постоянная Планка и постоянная Больцмана соответственно. Из уравнения (8.6) можно получить следующие законы.

B_λ достигает высшего значения при длине волны λ_m, заданной

$$\lambda_m T = 0.29 \text{ deg.cm} \qquad (8.7)$$

Это закон Вина. Для Солнца T составляет 6 000 К, а λ_m = 0,48 мкм. Для Земли T составляет 290 К, а λ_m = 10 мкм.

Излучаемый черным телом общий поток представляется как

$$E = \int B_\lambda \, d\lambda = \sigma T^4, \qquad (8.8)$$

σ – постоянная Стефана-Больцмана. В пропорционально T при микроволновых и инфракрасных длинах волн (часть спектра Релея-Джинса). Типичная зависимость B от T для λ при или ниже λ_m показана на рисунке 8.5.

Если измеряется излучение в узком диапазоне длины волны, то для расчета температуры, которую испускает черное тело, можно использовать функцию Планка:

$$T_\lambda = \frac{c_2}{\lambda \ln\left[\frac{c_1}{\lambda^5 B_\lambda} + 1\right]} \qquad (8.9)$$

где c_1 и c_2 – производные постоянные. Величина T_λ известна как яркостная температура, и для большинства целей передаваемые от спутника значения излучения преобразуются именно в величины T_λ.

Атмосферное поглощение

Атмосферное поглощение в инфракрасном диапазоне происходит главным образом за счет «спектров поглощения» воды, диоксида углерода, озона и т. д. Изучение радиации в рамках этих диапазонов позволяет определить характеристики атмосферы, ее температуру и концентрацию поглотителей.

Однако имеются области спектра, в которых поглощение является слабым, что позволяет с помощью спутникового прибора проводить обзор поверхности или верхней границы облака и определять их температуру или другие характеристики.

Такие области спектра называются «окна». Особенно важное окно находится вблизи пика кривой

излучения Земли/атмосферы, около 11 мкм (см. рисунок 8.3).

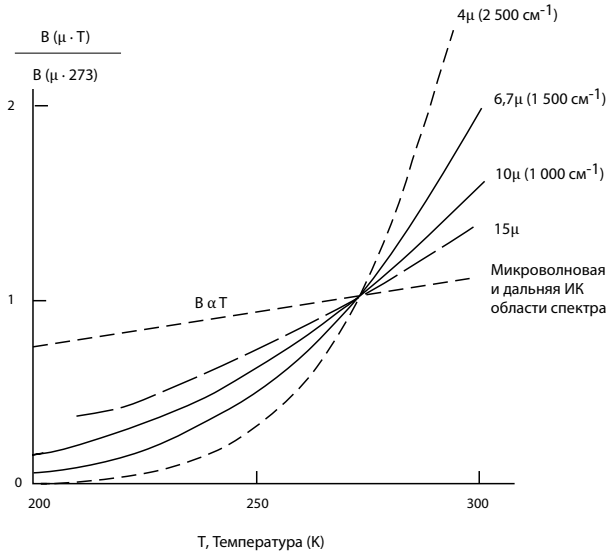


Рис. 8.5. Зависимость функции Планка от температуры

8.3.1.2 Разрешение

Пространственная разрешающая способность

Непрерывное изображение делится на отдельные элементы картины, или пиксели, число которых зависит от размера оптики, времени интеграции приборов и, возможно, последующих измерений.

Размер объекта, который можно получить на изображении, зависит от размера этих пикселей.

Вследствие воздействия дифракции элементами оптической системы сфокусированное изображение удаленного точечного объекта на изображении имеет характерное угловое распределение, известное как функция рассеяния точки (ФРТ), или воздушная характеристика (рисунок 8.6 (a)). Два удаленных точечных объекта, которые размещаются в поле обзора, считаются раздельными (т. е. критерий Релея), если угол между максимумом их ФРТ больше λ/D, где λ – длина волны излучения, а D – диаметр луча (рисунок 8.6 (b)).

Однако если две ФРТ достаточно близки для фокусирования на одном и том же детекторе, то их нельзя разложить. Во многих системах дистанционного зондирования пространственное разрешение ограничивается эффективным смещением соседних детекторов. Два объекта можно разрешить лишь в том случае, если они находятся близко друг к другу, как на рисунке 8.6 (c). Самым распространенным методом определения разрешения оптической системы является расчет или измерение ее функции преобразования модуляции (ФПМ). Модуляция синусоидальной функции – это отношение половины ее двойной амплитуды к ее среднему значению. ФПМ рассчитывается путем оценки отношения выходных модуляций к входным модуляциям в качестве функции длины волны (или пространственной частоты) синусоиды.

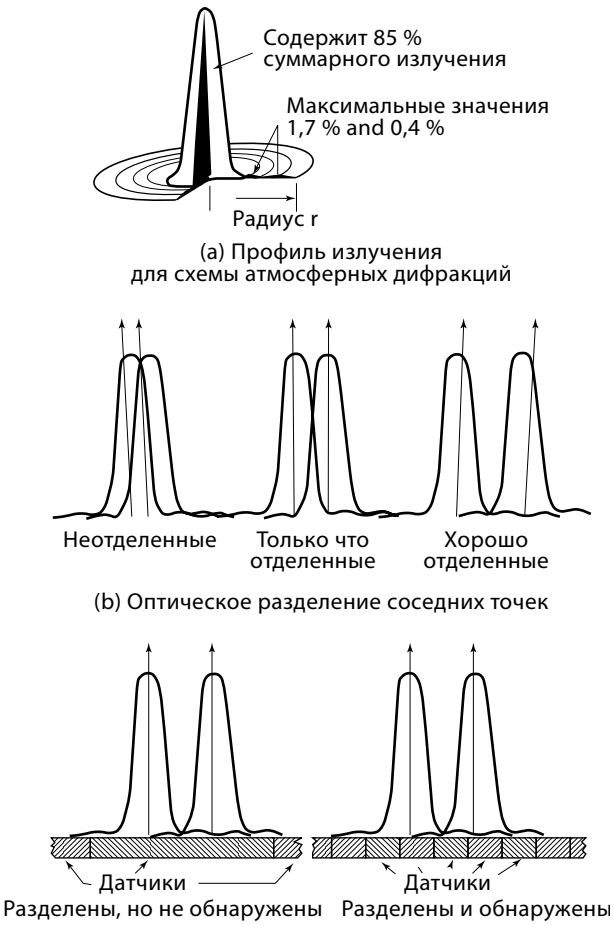


Рис. 8.6. Оптическое разрешение

На практике во многих космических системах движение спутника используется для растягивания изображения вдоль его траектории и движение зеркал для формирования изображения поперек траектории. В таких системах сфокусированное изображение наблюдаемых объектов сканируется на датчик. Выход от датчика интегрируется по коротким периодам времени для достижения разделения объектов. Величина, полученная для каждого разделения, представляет собой комплексную свертку функций распределения точки каждого объекта в рамках снимка с пространственной характеристикой датчика и временем каждой интеграции.

Альтернативой сканированию с помощью движущихся зеркал является использование линейного расположения датчиков. Без движущихся частей они являются более надежными, чем зеркала, но вносят проблемы во взаимную калибровку различных датчиков.

Радиометрическое разрешение

Мгновенный снимок фокусируется с помощью оптики на датчик, который реагирует на попадающее на него излучение. Реакция может быть вызвана либо непосредственным воздействием на уровне электронной энергии в самом датчике (обнаружение фотонов), либо поглощением радиации, нагревающей датчик и изменяющей некоторую его характеристику, такую, как сопротивление (обнаружение тепла). Обнаруживаются также напряжения от ряда внешних источников, включая напряжения, вызываемые:

(a) тепловым движением электронов в датчике (шум Джонсона);
(b) неровностями поверхности и электрическими контактами;
(c) квантовым характером электрических токов (дробовой шум).

Для того чтобы увеличить отношение сигнала к шуму (ОСШ), в систему можно включить крупные оптические собирающие системы, охлаждаемые датчики и датчик с большим временем интегрирования. Сочетание напряжений сигнала и шума (аналоговый сигнал) интегрируется по времени, с тем чтобы в результате получить цифровое значение. Затем последовательность интегрированных величин, соответствующих каждой строке изображения, кодируется и передается на Землю. Как только эти данные получены, их расшифровывают и преобразуют в нужную продукцию, снимки можно отображать на соответствующем устройстве. Обычно получают представление величины каждого элемента в соответствующем цвете на мониторе или темно-серые на факсимильном аппарате.

Разрешение отображения

Таким образом, непрерывно наблюдаемое изображение трансформируется в дискретные элементы на мониторе. Дискретный характер изображения можно заметить только тогда, когда разрешения изображения и устройства отображения заметно не стыкуются. На обычном мониторе расстояние между элементами составляет около 0,3 мм. В каждый элемент входят три точки различного люминоферного свечения. На подходящем расстоянии обзора, равном 75 см, глаз может различить элементы, если только они имеют высокую контрастность.

При этом следует иметь в виду, что разрешение глаза, равное примерно 0,2 мрад, ограничено перегородкой фоточувствительных клеток в сетчатке глаза.

И наконец, последней частью системы является искусство прогнозиста интерпретировать изображения, используемые для получения информации о метеорологических системах.

8.3.1.3 **Калибровка**

Калибровка видимых каналов

Два видимых канала прибора УРОВР калибруются перед запуском. Измеряемые двумя каналами излучения рассчитываются по следующим формулам:

$$L_i = A_i S_i \tag{8.10}$$

и

$$A_i = G_i X_i + I_i \tag{8.11}$$

где i – номер канала; L – излучение (Вт/м^2 · ср); X – цифровой отсчет (10 бит); G – результат поверки усиления (угол наклона); I – результат поверки захвата; A – эквивалент альбедо; S – эквивалент солнечного излучения, рассчитываемый по солнечной постоянной и спектральной чувствительности каждого канала.

Величины G и I измеряются перед запуском. Эквивалент альбедо А выражает процент входящей атмосферной солнечной радиации (при Солнце, находящемся в зените), которая отражается и измеряется спутниковым радиометром в спектральном промежутке, действительном для каждого канала. Атмосферное поглощение и воздействия рассеяния не учитываются. Термин «эквивалент альбедо» используется здесь для указания на то, что это не совсем действительное значение альбедо, поскольку измерения проводятся в ограниченном спектральном промежутке, а получаемые значения не корректируются с учетом атмосферных воздействий.

Для расчета отражательной способности каждого элемента (с учетом зависимости изменяющегося зенитного угла Солнца, изменяющегося зенитного угла спутника и изменяющегося угла азимута Солнце-спутник) можно применить концепцию бинаправленной отражательной способности:

$$R_i(\mu_0,\mu,\phi) = A_i/\mu_0 \tag{8.12}$$

где R_i – бинаправленная отражательная способность; μ_0 – косинус зенитного угла Солнца; μ – косинус зенитного угла спутника; ϕ – угол азимута Солнце-спутник.

Одним из недостатков алгоритма фиксированной предпусковой калибровки является то, что условия на орбите спутника могут значительно отличаться от земных условий, что может привести к неверным значениям альбедо. Серьезное влияние на калибровку могут также оказать воздействия радиометра, рабочие характеристики которого со временем ухудшаются. Оба типа воздействий наблюдались на более ранних спутниках.

Потребителю также следует обращать внимание на изменения в методах калибровки и на коэффициенты, применяемые на спутниках последовательных серий. Вывод состоит в том, что до тех пор, пока не будет реализована техника калибровки на борту, данные радиометра по видимым каналам следует тщательным образом изучать на предмет обнаружения неточностей по номинальным алгоритмам калибровки.

Калибровка инфракрасных каналов

В отличие от каналов видимого спектра, каналы инфракрасной области проходят постоянную калибровку на борту спутника. Установлена линейная зависимость между цифровыми показаниями радиометра и излучением. Для каждой сканируемой линии можно установить коэффициенты калибровки посредством использования двух исходных измерений. Холодная исходная точка получается за счет обзора космического пространства, которое действует в качестве черного тела примерно на уровне 3 К, главным образом как источник нулевого излучения. Другую исходную точку получают от внутреннего черного тела, температура которого контролируется. Функция Планка (см. раздел 8.3.2) дает затем излучение (Вт/м^2 · ср) на каждой длине волны. Используется линейная зависимость между излучением и цифровыми величинами, получаемыми от фиксированных точек. Применяется также незначительная нелинейная поправка.

Могут возникать различного рода трудности. Так, например, в течение нескольких осенних месяцев в калибровке канала 3 НУОА-10 в данных возникали серьезные ошибки (температура представлялась слишком высокой). Причина этих ошибок неясна, однако они могут возникать в условиях перехода спутника на восходящей точке орбиты из освещенной зоны в темную. В это время быстро изменяется температура внутреннего черного тела, и применение неизменного алгоритма калибровки может быть неверным.

Калибровка хирс и мсю

Для ХИРС (см. приложение 8.В) калибровка производится через каждые 40 сканирующих линий и занимает три сканирующие линии (для которых не имеется данных по обзору Земли). Процедура является в основном такой же, как и для УРОВР, с использованием двух известных температур.

Для МСЮ (см. приложение 8.В) калибровка производится в конце каждой сканирующей линии, и таким образом данные по обзору Земли не теряются. Вновь обеспечивается двухточечная калибровка от теплого и холодного исходных источников. Однако для частот канала МСЮ и обычной температуры обзора Земли измеряемые излучения находятся в конце ряда Релея-Джинса функции Планка, где излучение пропорционально яркостной температуре. Поэтому данные могут калиброваться непосредственно в яркостной температуре (см. раздел 8.3.2).

8.3.1.4 **Перевод измерений в цифровую форму**

Представление радиации в цифровом виде обеспечивает ряд дискретных величин, разделенных постоянными шагами. Разница в температуре, соответствующая этим шагам в излучении, определяет значение температуры на окончательном снимке. Вследствие нелинейности функции черного тела с температурой размер этих шагов зависит от температуры. Данные УРОВР приводятся в цифровую форму с использованием 10 битов, обеспечивая таким образом 1024 различных значения.

Для тепловых инфракрасных каналов температурный шаг составляет около 0,1 К при 300 К и 0,3 К при 220 К.

Другие системы приводятся к цифровому виду с использованием различного числа битов.

В инфракрасных снимках для МЕТЕОСАТ используется восемь битов, но для видимых каналов и для каналов водяного пара имеется только шесть значащих битов. Интересно отметить, что проведенные эксперименты показали, что однотонное спутниковое изображение можно отображать без значительного ухудшения качества с использованием эквивалента всего лишь в пять битов.

8.3.1.5 **Повторное преобразование**

Потребности в быстрой обработке огромного количества данных наилучшим образом удовлетворяются за счет использования цифровых компьютеров.

В оперативной системе наиболее интенсивная задача по счету состоит в изменении проекции, в которой отображается изображение.

Это необходимо отчасти вследствие искажений, возникающих от обозрения изогнутой Земли с

использованием сканирующего зеркала, отчасти из-за необходимости использовать изображения вместе с другой метеорологической информацией на стандартных фоновых картах. Для согласования с требуемой проекцией ключевым элементом в процессе повторного картирования изображения, видимого из космоса («космический вид»), является знание местоположения на Земле каждого элемента («навигация»), что достигается за счет знания орбитальных характеристик спутника (предоставляемых оператором спутника), точного времени, в которое была зарегистрирована каждая линия изображения, и формы развертки.

На практике повторное преобразование производится следующим образом. С помощью орбитальных данных и формы окончательной проекции определяют положение в рамках кадра космического обзора, которое соответствует центру каждого элемента в окончательном повторно проектируемом изображении. Значения элементов в этом месте и вблизи этой точки используются для расчета нового значения. В действительности это взвешенная средняя соседних величин и она придается элементу в окончательном изображении.

Для получения взвешенной средней изучено много сложных методов. Большинство из них неприемлемы для применения в близком к реальному времени, поскольку следует произвести огромное количество необходимых расчетов. Однако возрастающие возможности проведения расчетов с использованием параллельных процессоров могут изменить это положение.

8.3.2 Вертикальные профили температуры и влажности

8.3.2.1 Система тайрос для оперативного вертикального зондирования (товс)

На спутниках серии ТАЙРОС-Н/НУОА-А установлена система ТАЙРОС для оперативного вертикального зондирования (ТОВС), состоящая из приборов ХИРС и МСЮ. Они проводят наблюдения за исходящей от Земли и атмосферы вверх радиацией, которая выражается уравнением переноса радиации (УПР):

$$L_\lambda = B_\lambda(T(P_s))\tau_\lambda(P_s) + \int_{p_s}^{0} B_\lambda(T(p))\frac{d_{\tau_\lambda}(p)}{dp}dp \qquad (8.13)$$

где B_λ – функция Планка при длине волны λ; L_λ – поверхностная плотность восходящего потока излучения; $T(p)$ – температура как функция давления p;

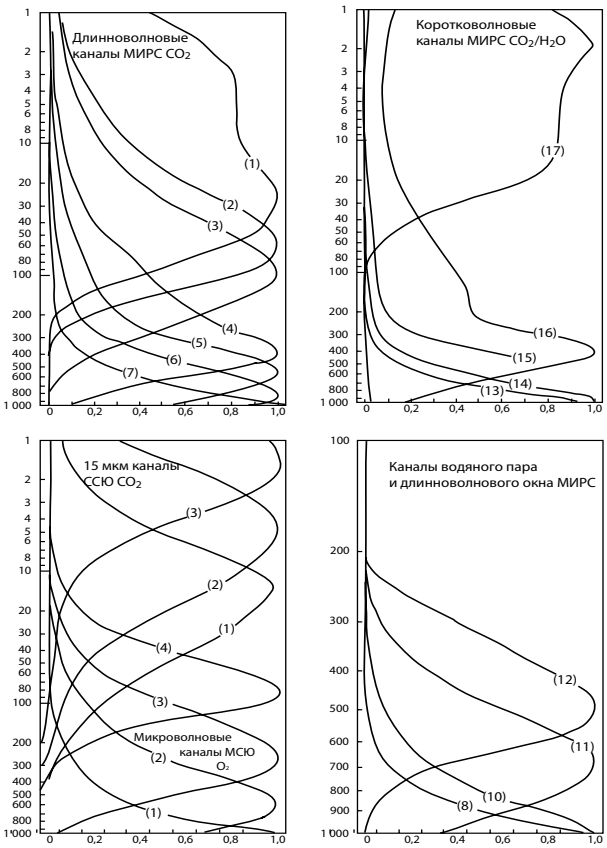


Рис. 8.7. Весовые функции (нормированные) ТОВС

p_s – приземное давление; τ_λ – коэффициент пропускания. Первый член – это вклад от поверхности Земли, а второй – радиация от атмосферы $d\tau_\lambda/dp$ – называется весовой функцией.

Решение УПР составляет основу атмосферных измерений. Поверхностная плотность потока излучения в верхних слоях атмосферы получается по сочетанию функции Планка и спектрального коэффициента пропускания. Функция Планка передает информацию о температуре, коэффициент пропускания связан с поглощением и профилем плотности радиационно-активных газов, а в весовой функции содержится информация о профиле.

Для различных длин волн весовая функция достигает своего пика на различных высотах. Можно построить профиль температуры, если выбрать набор длин волн таким образом, чтобы соответствующие излучения были присущи в значительной степени различным слоям атмосферы. На рисунке 8.7 показаны типичные весовые функции, которые используются для обработки данных, получаемых от ХИРС. Решение УПР является очень сложным, главным образом вследствие перехлеста в весовых функциях, показанных на рисунке 8.7. Для получения профилей температуры и влажности

разработан ряд различных методов. Общее описание нескольких методов приводится в работе Smith (1985), а разработки сообщались в последующих нескольких отчетах Конференции по изучению ТОВС (CIMSS, 1993).

Более ранние методы, которые широко использовались, базировались на регрессиях между излучениями и действительными наземными значениями (по данным радиозондов) при различных атмосферных условиях. Лучшие результаты получают от решений УПР, описываемых как физическое восстановление данных.

Основной принцип, с помощью которого проводят расчет концентрации водяного пара, демонстрирует метод, используемый в нескольких схемах физического восстановления данных.

Профиль температуры рассчитывается с использованием длин волн, на которых излучает диоксид углерода, а также с использованием длины волны, на которой излучает водяной пар, при определенном вертикальном распределении водяного пара. Разница между двумя профилями температуры объясняется разницей между предполагаемыми и фактическими профилями водяного пара, и отсюда можно получить фактический профиль.

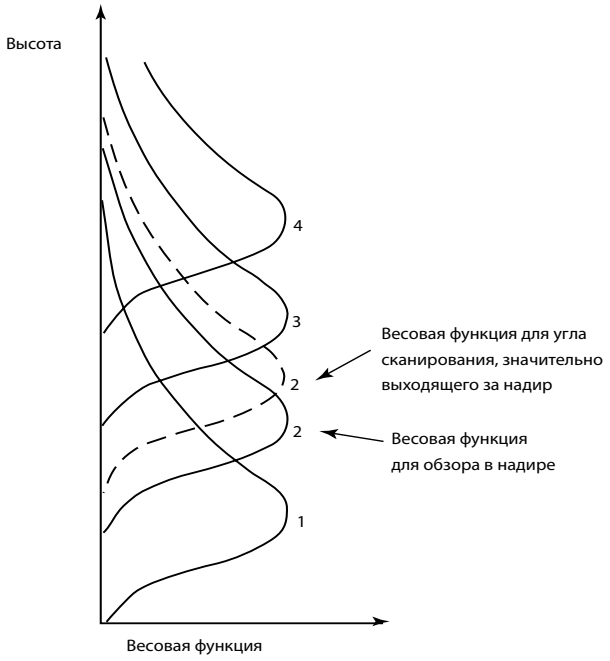


Рис. 8.8. Схематическое изображение группы весовых функций для обзора в надире и влияние сканирования вне надира на одну из этих функций

В большинстве метеорологических служб восстановление геофизических величин для использования в численном прогнозе погоды производится с помощью физических методов. В НУОА (США) данные восстанавливаются посредством получения первого приближения методом библиотечного поиска, за которым следует полное физическое восстановление, основанное на решении УПР. Другие службы, такие, как Метеорологическое бюро Соединенного Королевства и Австралийское бюро метеорологии, используют численную модель первого приближения, за которой следует полное решение УПР.

В последнее время наметилась тенденция использовать вариационное решение УПР при наличии всех других данных, имеющихся во время анализа. Это решение можно распространить на четырехмерный случай (пространство-время) с целью привлечения асиноптических данных в подходящие периоды времени.

Для всех методов необходимо определить и использовать элементы с безоблачной ситуацией или с учетом воздействий облаков. Процедуры для этого описаны в разделе 8.3.3.

8.3.2.2 Влияние лимба

Влияние лимба показано на рисунке 8.8. По мере того, как угол обзора перемещается от вертикального, длина пути радиации через атмосферу возрастает.

Поэтому поверхностные плотности со всех уровней до космоса уменьшаются, а пик весовой функции повышается. Если по каналу измеряют радиацию от атмосферного слоя, в котором имеется вертикальный градиент температуры, то измеренная радиация изменится; для тропосферных каналов она будет иметь тенденцию к уменьшению. В связи с этим для некоторых применений необходимо трансформировать измеренную радиацию в значения яркостной температуры, которая измерялась бы, если бы прибор наблюдал ту же величину по вертикали.

Можно применять метод коррекции лимба или метод физического восстановления.

Коррекции лимба применяются к измеряемым яркостным температурам при угле надира, не равном нулю. Они возможны потому, что весовая функция обзора в надире для одного канала будет обычно пиком на промежуточном уровне между пиками весовой функции двух каналов при данном угле измерения. Таким образом, для заданного угла θ можно выразить разницу между яркостной температурой в надире и температурой при угле измерения как линейное сочетание измеренных яркостных температур в ряде каналов:

$$(T_B)_i^{\theta=0} - (T_B)_i^{\theta} = a_{0i}^{\theta} + \sum_{j=1}^{1} a_{ji}^{\theta} (T_B)_j^{\theta} \qquad (8.14)$$

Коэффициенты a_{ji}^{θ} находятся путем использования множественной линейной регрессии по яркостным температурам, рассчитываемым для представительного набора профилей.

Можно пренебречь необходимостью коррекции лимба. Так, например, можно использовать алгоритм восстановления температуры с различным набором коэффициентов регрессии для каждого угла сканирования. Однако если проводится восстановление регрессии, в которой используется один комплект коэффициентов (соответствующий нулевому углу сканирования), мы должны привести все яркостные температуры к одному и тому же углу обзора, обычно к надиру.

Недостатком использования метода регрессии для определения влияния лимба является трудность разработки регрессий для различных облаков, температурных и влажностных режимов.

Лучший подход, который в настоящее время стал оперативным в нескольких центрах, состоит в том, чтобы использовать метод физического восстановления, при котором решается уравнение переноса радиации для каждого угла сканирования, при котором требуются измерения.

Сканирование лимба для измерений

Оперативные метеорологические приборы смотрят со спутника прямо вниз на поверхность Земли, однако можно альтернативно использовать взгляд на лимб Земли. Весовые функции для датчиков сканирования лимба очень узкие и всегда достигают пика при наивысшем давлении в области обзора. Отсюда получают хорошее вертикальное разрешение (1 км) с горизонтальным разрешением, равным примерно 10 км. При вертикальном зондировании разрешение несколько хуже, хотя невозможно производить измерения лимба с использованием методов зондирования на высоте менее 15 км, поэтому для тропосферных измерений необходимо вертикальное зондирование.

8.3.2.3 Разрешение и точность

Точность восстановленных спутниковых данных трудно оценить, поскольку, как и в случае со многими другими наблюдательными системами, перед нами стоит вопрос: „Каково действительное значение?". Широко используемый метод оценки точности состоит в исследовании статистических данных о разнице между восстановленными данными и совместными радиозондовыми профилями.

В такие статистические данные будут включаться ошибки восстановления, однако будут также содержаться ошибки от радиозондовых наблюдений (которые включают влияние как неточностей от действительного профиля на участке подъема радиозонда, так и степень, до которой этот профиль является представительным в отношении окружающего объема атмосферы) и совместные ошибки вследствие разделения в пространстве и времени между измерениями со спутника и запуском радиозонда. Хотя информация о данных восстановления и радиозондовых данных является весьма полезной, эту информацию не следует принимать в качестве только измерений ошибки восстановления.

Яркостная температура

Важно отметить значительную нелинейность в уравнениях, с помощью которых производится перевод данных об излучении в яркостную температуру.

Это означает, что в случае с яркостной температурой точность измерений действительной температуры радиометра меняется с температурой.

Это не относится к случаю, когда обрабатываются данные о радиации, поскольку они линейным образом связаны с показаниями радиометра. В УРОВР точность всех трех инфракрасных каналов быстро снижается при более низких температурах. Это видно на рисунке 8.9.

Сравнения точности измерений для канала 3 (см. приложение 8.A) и канала 4 показывают некоторую разницу. При рассмотрении 10-битовых значений ошибки те же, что и приведенные в таблице 8.5. Канал 3 имеет более сильную нелинейность по сравнению с каналом 4, в результате чего его точность для низких температур ниже точности канала 4. Канал 5 очень близок к каналу 4. Канал 3 намного менее точен при низких температурах, однако лучше канала 4 при температурах выше 290 K.

Таблица 8.5. Точность (K) ИК-каналов УРОВР

Температура (K)	*Канал 3*	*Канал 4*
200	~10	~0,3
220	2,5	0,22
270	0,18	0,10
320	0,03	0,06

Измерения

На рисунке 8.10 представлены статистика разностей, полученных от системы восстановления данных Метеорологического бюро Соединенного

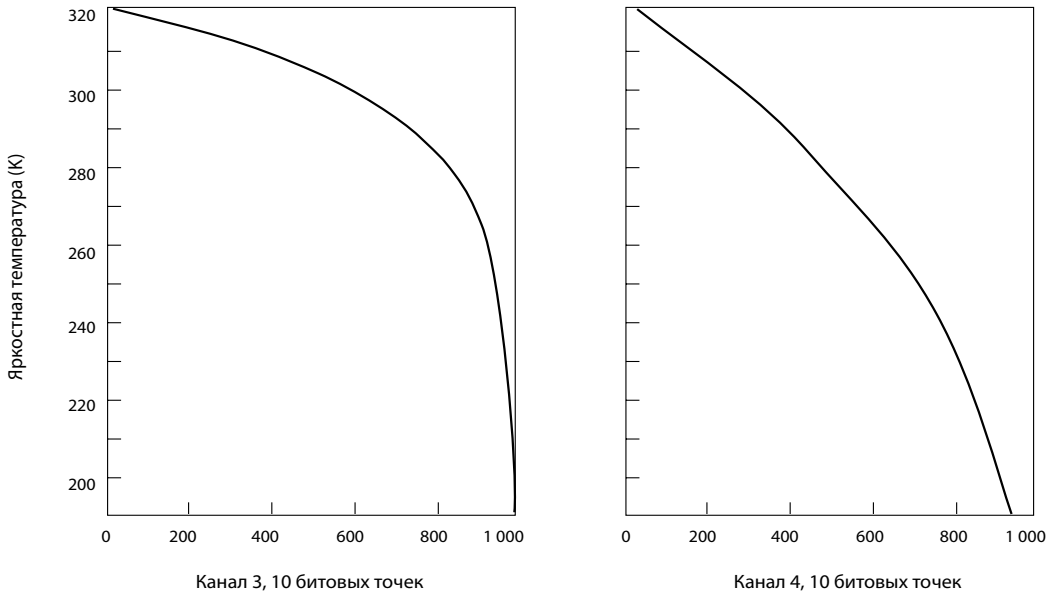
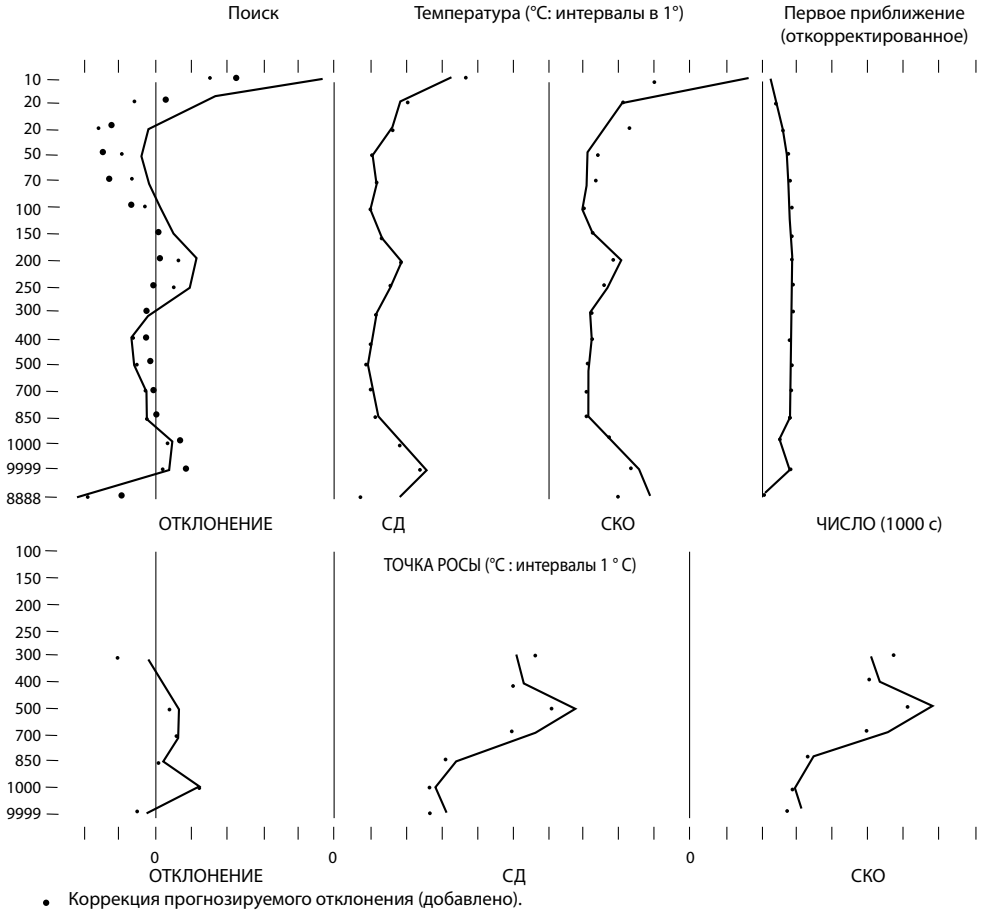


Рис. 8.9. Типичные кривые калибровки для каналов 3 и 4 УРОВР цифровых точек яркостной температуры. Кривая для канала 5 УРОВР очень близка к кривой для канала 4 УРОВР



8888 T8; 9999–1,5 м; All scan pos – положение сканирующего устройства; число витков 1+2; все сроки; все поверхности (суша + море); BTRP > =–300; возвышение < = 500 м; расстояние 0–150 км. Всего профилей 9856; зонд NOK 2122; BTRP NOK 1; виток NOK 166; возвышение NOK 794.

Рис. 8.10. Данные об ошибках для вертикальных профилей (Метеорологическое бюро Соединенного Королевства)

Королевства, а также систематические и случайные ошибки для разности между восстановленными и радиозондовыми данными. Они основаны на сопоставлении всех данных восстановлений, полученных по спутнику НУОА-11 в течение июля 1991 г., при этом критерием сопоставления являлось трехчасовое разделение по времени и разделение по горизонтали в 150 км. В случае, если набор профилей в сопоставлениях большой и оба типа являются представительными для той же совокупности, отклонения в этих статистических данных должны быть незначительными.

Здесь предполагаются отклонения примерно в 1 °C на одних и тех же уровнях давления, где сопоставления для ограниченного периода и ограниченного района могут быть непредставительными для зонального комплекта данных. Стандартные отклонения, будучи более крупными, чем эквивалентные значения для ошибок восстановления, показывают некоторые из ожидаемых ошибок восстановленного профиля. Они минимальны в средней тропосфере, при этом значения у поверхности и в тропопаузе выше. Более низкие тропосферные значения отражают проблемы, связанные с остаточными примесями загрязнения облаков и различными приземными воздействиями.

При восстановлении возникают проблемы, связанные с инверсией в нижних слоях атмосферы. Значения тропопаузы отражают как отсутствие информации в излучении из этой части профиля, так и тенденцию метода восстановления к «сглаживанию» характеристик этого типа.

Разрешение

Поле обзора радиометра ХИРС (см. таблицу 8.3) составляет около 17 км в под спутниковой точке, а расчеты профиля можно сделать до края полосы, где поле является эллиптическим с осью около 55 км. Профили можно рассчитывать на горизонтальной сетке с любым шагом, но они не являются отдельными, если находятся ближе поля обзора.

Значения температуры рассчитываются вплоть до верхней границы облачности или до поверхности, если используется прибор МСЮ. Над сушей и вблизи побережья горизонтальная изменчивость температуры и излучательной способности вызывает неопределенности, которые ограничивают их использование в численных моделях ниже уровня примерно 500 гПа.

Вертикальное разрешение наблюдений связано с весовыми функциями и обычно составляет примерно 3 км. Это слабое вертикальное разрешение является одним из недостатков существующих систем зондирования для ЧПП и будет улучшаться в ближайшем поколении зондирующих приборов, таких как АИРС и ХИС.

8.3.3 Характеристики облачной и земной поверхности и исключение влияния облаков

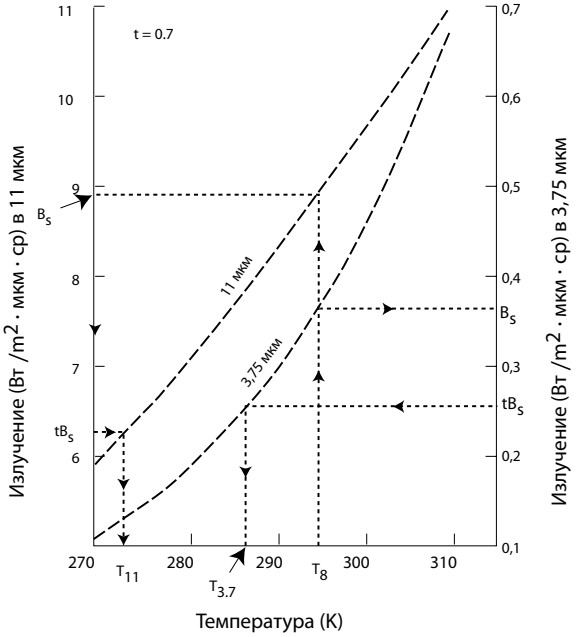
8.3.3.1 Наблюдения за облаками и земной поверхностью

Разработанная в Метеорологическом бюро Соединенного Королевства схема является типичной для схем, которые можно использовать для получения информации об облаках и поверхности Земли. Она предполагает ряд тестов для каждого элемента в рамках изображения в попытках определения облака. Первый – это тест по определению порогового значения в инфракрасном диапазоне; в большинстве случаев любые элементы, температура которых ниже определенной температуры, представляются облакосодержащими.

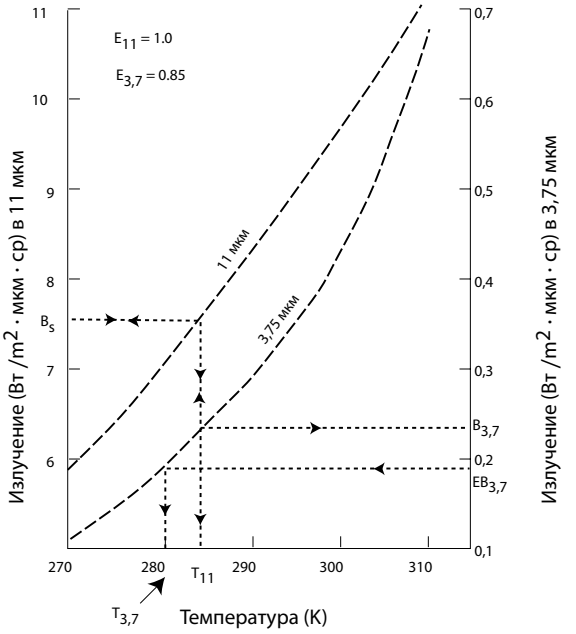
При втором тесте обращают внимание на локальную изменчивость температуры в рамках изображения. Высокие значения указывают на смешанный состав чистых и облакосодержащих элементов или на элементы, содержащие облака на различных уровнях. Небольшие значения при низких температурах указывают на облакосодержащие элементы.

Яркостная температура объекта в различных каналах зависит от длины волны, излучательной способности объекта и затухания радиации, вызываемого атмосферой. Оказывается, что для неплотных облаков температура в канале 3 УРОВР (3,7 мкм) (см. приложение 8.A) выше температуры в канале 4 (11 мкм) (рисунок 8.11 (a)). Перевод значений является действительным для плотных низких облаков, и это является основой для определения тумана по схеме, описанной в работе Eyre, Brownscombe and Allam (1984) (см. рисунок 8.11 (b)). Разница между каналами 4 и 5 (11 и 12 мкм) УРОВР является чувствительной к плотности облаков и к содержанию водяного пара в атмосфере. Пороговое значение, применяемое к этой разнице, облегчает обнаружение неплотных перистых облаков.

Днем можно также использовать отраженную солнечную радиацию, откорректированную на предмет устранения воздействий изменения угла возвышения Солнца. С помощью порогового теста яркие облака отделяются от темных поверхностей. В четвертом тесте используется отношение излучения близкого к инфракрасному канала 2 (0,9 мкм) к излучению видимого спектра канала 1 (0,6 мкм). Это отношение имеет следующие значения:



(a) Влияние полупрозрачного облака на излучения. Поверхность излучения B_S приведена с помощью полупрозрачного облака к τB_S. Температура, соответствующая τB_S выше для 3,7 мкм, чем для 11 мкм.



(b) Влияние различной излучательной способности на излучения.

Полученное со спутника излучение, B_{sat} составляет

$$B_{sat} = E\,B\,(T_s),$$

где E – излучательная способность;
B – излучение черного тела,
T_s – приземная температура.
Для низкой облачности и тумана;

E_{11} мкм ≈ 1,0
$E_{3,7}$ мкм ≈ 0,85

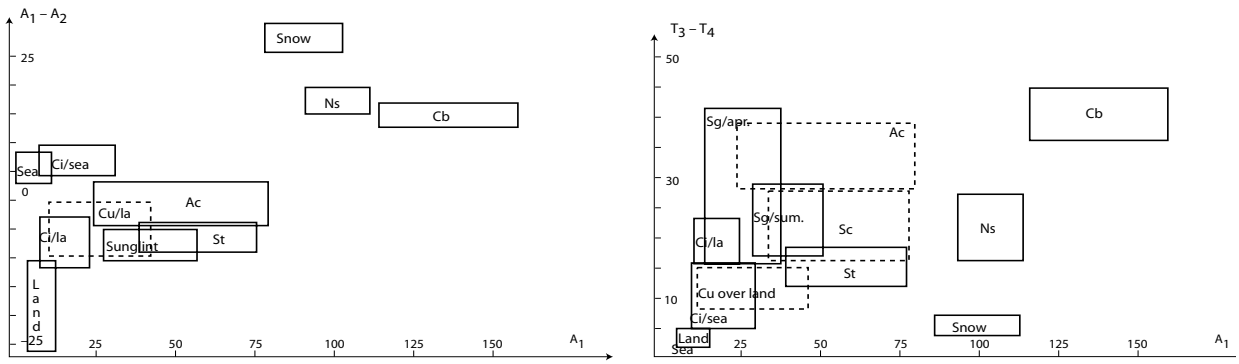
Температура соответствующая E B (T_s) выше для 11 мкм чем для 3,7 мкм.

Рис. 8.11. Расчет температуры при наличии облаков

(a) близко к единице для облаков;
(b) около 0,5 для воды вследствие увеличенного обратного рассеяния аэрозолями при коротких длинах волн;
(c) около 1,5 для подстилающей поверхности, особенно для растущей растительности вследствие высокой отражательной способности листовых структур в близком к инфракрасному диапазоне.

После того как с помощью этих методов установлено местоположение незатронутых облаками элементов, можно определить некоторые приземные параметры, из которых наиболее важным является температура поверхности моря (см. раздел 8.3.6). Поскольку поверхность суши обладает весьма изменчивыми отражательными способностями, расчеты являются очень неопределенными.

Параметры облаков можно рассчитать с использованием дополнений к сериям описанных ранее тестов. Сюда входит температура верхней границы облачности, частичный облачный покров и оптическая масса.



(a) Снег (Snow), кучевообразное облако (Cb), слоисто-дождевые облака (Ns), высококучевые облака (Ac), кучевые облака (Cu) над сушей, перистые облака (Ci) над сушей, солнечные блики (sunglint), суша (land) и море (sea) в системе координат $A_1 - (A_1 - A_2)$. Рисунок взят из базы данных за лето, НУОА-10, а возвышение Солнца составляет 40°.
elevation around 40°.

(b) Классы объектов в системе координат $A_1 - (T_3 - T_4)$. Из того же раздела базы данных, как и (a). Разделение снега и облаков очевидно.
Проблему представляет разделение слоистых облаков и солнечных бликов (Sg) летом. Сюда же входят солнечные блики/весна.

Рис. 8.12. Определение свойства облака и поверхности

Высоту верхней границы облачности можно рассчитать несколькими способами. Наиболее простой заключается в использовании яркостной температуры от одного или более каналов, с тем чтобы рассчитать температуру верхней границы облачности и вывести высоту по профилю температуры, обычно получаемому из численной модели.

Этот метод хорошо срабатывает для мощных полей слоистообразных и кучевых облаков, за исключением полупрозрачных облаков, таких как слоистые облака, или полей небольших кучевых облаков. В работе Smith and Platt (1978) показано, каким образом используется уравнение переноса радиации в близких парах каналов ХИРС для расчета давления, а отсюда – высоты верхней границы разбросанных или неплотных облаков, с ошибками, обычно находящимися между половиной и четвертью толщины полупрозрачных слоев облаков.

Следует подчеркнуть, что подобные результаты можно получить только по потокам данных, в которых содержатся точные откалиброванные данные.

Такие данные можно считать за снимки только тогда, когда они представляются на подходящем устройстве. И хотя в некоторых случаях их получают с целью использовать в качестве входных переменных для мезомасштабных численных моделей, более полезную информацию можно получить путем их просмотра. Для определения конкретных типов облаков, снега и растительности используют различные сочетания каналов радиометра, как это показано на рисунке 8.12.

8.3.3.2 Измерения с помощью ТОВС при облачности

Исключение влияния облаков

На инфракрасное излучение значительное влияние оказывают облака, поскольку большинство из них почти непрозрачные в этом диапазоне длин волн. Поэтому используемые при восстановлении температуры тропосферы алгоритмы должны быть способными обнаруживать облака, которые значительно влияют на излучение, и, если возможно, принимать в расчет такое влияние.

Это обычно достигается путем проведения корректировки измеренных излучений для получения «чистого столба» величин, т. е. излучений, которые измерялись бы по тем же профилям температуры и влажности при отсутствии облаков.

Во многих схемах восстановления с помощью процесса инверсии излучения чистого столба переводят в параметры атмосферы, что требует предварительно провести меры по исключению влияния облаков.

Многие из разработанных алгоритмов представляют собой варианты соседнего поля обзора или метода N^* (Smith, 1985). При таком подходе измеренные излучения R_1 и R_2 в соседних полях обзора (здесь и далее называемые «зонами») радиометрического канала можно, при определенных условиях, выразить следующим образом:

$$R_1 = N_1 R_{cloudy} + (1 - N_1) R_{clear}$$

$$R_2 = N_2 R_{cloudy} + (1 - N_2) R_{clear} \qquad (8.15)$$

где R_{clear} и R_{cloudy} – излучения, соответствующие ясному и полностью облачному небу, а N_1 и N_2 – действительная частичная облачность в зонах 1 и 2. При получении этих уравнений делались следующие предположения:

(a) профиль атмосферы и характеристики поверхности в двух зонах одинаковы;
(b) существует только один слой облачности;
(c) на обоих участках верхняя часть облака имеет ту же высоту (и температуру) в обеих зонах.

В случае, если частичное облачное покрытие в двух зонах различно ($N_1 \neq N_2$), уравнения (8.15) можно решить одновременно с получением излучения при ясном небе:

$$R_{clear} = \frac{R_1 N * R_2}{1 - N *} \qquad (8.16)$$

где $N^* = N_1/N_2$.

Этот метод значительно улучшается, если использовать каналы ХИРС и МСЮ, горизонтальное разрешение которых является достаточным для частого применения указанных выше предположений.

В этом методе используется регрессия между близко расположенными измерениями в канале 2 МСЮ и в каналах ХИРС, а коэффициенты регулярно обновляются, обычно еженедельно.

Более современные методы используют данные УРОВР, с тем чтобы расчистить поле обзора ХИРС. Более того, существуют методы полного физического восстановления с использованием данных УРОВР и ТОВС, в которых по наблюденным излучения можно четко рассчитать частичный облачный покров и высоту и количество облаков.

8.3.4 Измерения ветра

8.3.4.1 Измерение ветра по движению облаков

Ветер по движению облаков (ВДО) определяют по движению вершин облаков на двух последовательных изображениях, передаваемых геостационарным спутником, как правило, с получасовым интервалом. Точность измерения такого ветра ограничена до степени, с которой движение облака представляет ветер (например, скопление конвективных облаков может двигаться со скоростью мезомасштабного атмосферного возмущения, а не со скоростью определяемого ветра).

Она также зависит от точности определения высоты представительного облака по полю яркостной температуры. Кроме того, точность определения ветра зависит от временного интервала и, до известной степени, от корреляций между изображениями облаков, используемыми при их расчетах, пространственного разрешения этих изображений, ошибки в полях первого приближения, степени, до которой поле первого приближения ограничивает поиск коррелируемых участков в последовательных изображениях, и от количества имеющих место структурных изменений в облаках.

Средневекторные разности между ВДО и ветром, измеренным с помощью радиолокаторов обнаружения ветра в диапазоне 100 нм, обычно представлялись как 3, 5 и 7 м/с для низких, средних и высоких облаков соответственно за один месяц. Это указывает на то, что на низких уровнях ошибки сравнимы с ошибками, присущими обычным измерениям.

Процесс определения ветра обычно полностью автоматизирован. Заданные районы облачности, охватывающие примерно 20 × 20 элементов, выбираются из получасовых изображений с использованием критериев, включающих подходящий диапазон яркостных температур и градиенты в рамках каждого заданного района. Как только районы выбраны, осуществляется автослежение с использованием обычно 6- или 12-часового численного прогноза в качестве поля первого приближения для поиска хорошо коррелируемых заданных районов. Для сравнения таблиц яркостных температур заданного и искомого районов в целях оценки движения можно использовать среднеквадратическую разность. Первое приближение снижает размер искомого района, необходимого для получения вектора ветра, но и ограничивает результаты, которые должны находиться в пределах определенного диапазона прогноза поля ветра.

Для каждого измерения придаются флаги ошибок на основе нескольких характеристик, включая разность между последовательными получасовыми векторами и разность между измерением и полем первого приближения. Эти флаги ошибок можно использовать при численном анализе, с тем чтобы придать данным соответствующий вес.

Число измерений для каждого синоптического часа, естественно, ограничивается существованием подходящих облаков и обычно представляется порядка 600 векторов на полушарие.

В высоких широтах для получения векторов движения облаков в широтах, не охватываемых геостационарными спутниками, можно использовать последовательные изображения, передаваемые полярно-орбитальными спутниками.

Дальнейшее развитие этого метода состоит в расчете ветра по спутниковым изображениям распределения водяного пара.

8.3.4.2 Определение приземного ветра с помощью скаттерометра

Скаттерометр – это прибор, который установлен на экспериментальном спутнике ЕРС-1 и обычно обеспечивает измерение ветра у поверхности моря. Этот метод будет применяться на спутниках, которые в настоящее время разрабатываются. Как только в 40-е годы начал широко применяться микроволновый радиолокатор, было обнаружено, что при низких углах возвышения окружающая почва (или волны на море) вызывали сильные нежелательные отраженные сигналы. С тех пор конструкторы и пользователи радиолокационного оборудования стремились к тому, чтобы снизить этот шум. Исследователи, изучающие этот эффект, обнаружили, что отраженные от моря сигналы увеличиваются с возрастанием скорости ветра, открывая возможность для дистанционного измерения ветра. Радиолокаторы, сконструированные для измерения такого типа отраженных сигналов, известны как «скаттерометры».

Принцип действия скаттерометра основан на внутрифазовом отражении от грубой поверхности;

для углов падения, превышающих примерно 20° от вертикали, это происходит в тех случаях, когда удовлетворяется условие Брэгга:

$$\Lambda \sin\theta_i = n\lambda/2 \qquad (8.17)$$

где Λ – длина волны шероховатости поверхности, λ – длина волны радиолокатора, θ_i – угол падения, а n = 1, 2, 3. Отражение Брэгга первого порядка (n = 1) при микроволновых частотах возникает от небольших пульсаций («кошачьи лапки»), вырабатываемых мгновенными напряжениями приземного ветра. Уровень обратного рассеяния от удаленной цели, такой как поверхность моря, обычно называют нормированным радиолокационным поперечным сечением (НРПС), или σ^0. При определенной форме и мощности излучения величина σ^0 пропорциональна мощности, полученной обратно радиолокатором. В выражениях других известных или измеряемых радиолокационных параметров

$$\alpha^0 = \frac{P_R}{P_T} \cdot \frac{64\pi^3 R^4}{\lambda^2 L_S G_0^2 (G/G_0)^2 A} \qquad (8.18)$$

где P_T – мощность излучения; P_R – мощность, полученная обратно радиолокатором; R – наклонная дальность до цели района A; λ – длина волны радиолокатора; L_s включает потери атмосферного затухания и другие системные потери; G_0 – пиковое усиление антенны; G/G_0 – относительное усиление антенны в направлении цели.

На уравнение (8.18) часто ссылаются в качестве «уравнения радиолокатора». Величина σ^0 может быть установлена в линейной форме (как выше) или в децибелах, т.е. $\sigma^0_{dB} = 10 \log_{10} \sigma^0_{\text{lin}}$.

Из опыта эксплуатации скаттерометров для измерений характеристик океана видно, что σ^0 возрастает с увеличением скорости приземного ветра (измеряемого судами или буями), уменьшается с углом падения, а также зависит от угла радиолокационного луча относительно направления ветра. На рисунке .13 показано значение самолетных данных σ0 относительно направления ветра для различных скоростей ветра. Направление 0° соответствует направлению вверх к ветру, 90° перпендикулярному направлению к ветру, а 180° направлению вниз к ветру.

ЕКА координировала ряд экспериментов для подтверждения такого типа кривых при частоте 5,3 ГГц, которая соответствует частоте работы этого прибора, установленного на спутнике ЕРС-1. Вблизи оборудованных приборами судов и буев в Северном море, Атлантике и Средиземном море проводился облет нескольких самолетных скаттерометров. Данные по σ^0 коррелировались затем с приземным ветром, который приводился к общей высоте анемометра, равной 10 м (при предположении нейтральной устойчивости). В эти данные вводилась функция эмпирической модели в форме

$$\sigma^0 = a_0 . U^\gamma (1 + a_1 \cos\phi + a_2 \cos_\phi) \qquad (8.19)$$

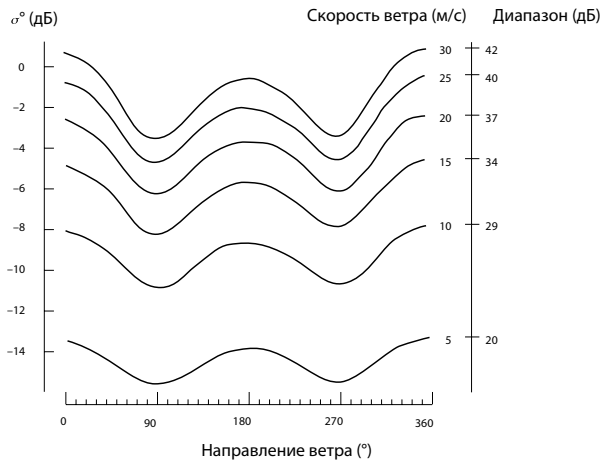


Рис. 8.13. Измеренное рассеяние σ^0 (в дБ) по относительному направлению ветра для различных скоростей ветра. Данные для вертикальной поляризации на 13 ГГц.

где коэффициенты a_0, a_1, a_2 и γ зависят от угла падения. Эта модель относит нейтральную устойчивость скорости ветра на высоте 10 м U и направление ветра по отношению к радиолокатору ϕ к НРПС.

Может также случиться, что σ^0 является функцией температуры поверхности моря, состояния моря и разливов на поверхности (естественных или антропогенных), однако необходимо еще показать, что эти параметры имеют какое-либо значительное влияние на точность восстановления вектора ветра.

Поскольку σ^0 показывает ясную зависимость со скоростью ветра и направлением, в принципе измерение σ^0 на двух различных углах азимута или более позволяет восстановить как скорость, так и направление ветра. Однако восстановленное направление может оказаться не единственным; могут быть неопределенные направления.

Первый установленный на спутнике скаттерометр ветра – спутниковый скаттерометр CUCAT-A (SASS) – функционировал на борту в 1978 г. и продемонстрировал достаточную точность этого нового способа измерения. Спецификация прибора предусматривала среднеквадратическую ошибку точности в 2 м/с для скорости ветра и 20° для направления. Сравнения с данными, полученными обычными приборами для измерения ветра, показали, что эти цифры удовлетворялись, если было примерно известно направление ветра, с тем чтобы выбрать наилучшее направление из набора неопределенных направлений SASS.

В приборе SASS использовались два луча по обе стороны от космического аппарата, в то время как скаттерометр EPC-1 использует третий, центральный луч для улучшения дискриминации направления ветра, но при этом он является только односторонним прибором, и таким образом его охват меньше. Каждая из трех антенн испускает узкий радиолокационный луч по горизонтали, но широкий по вертикали, в результате чего получают узкую полосу облучения поверхности моря с шириной полосы 500 км. По мере продвижения спутника сначала центральный, а затем задний луч измеряют отражение из той же части океана, что и передний луч. Таким образом, каждая часть полосы, разделенная на квадраты в 50 км, имеет три измерения σ^0, производимых по различным относительным направлениям к вектору местного приземного ветра.

На рисунке 8.14 показан охват скаттерометра для Северной Атлантики в течение 24 часов. Эти полосы не являются статичными, а «двигаются» в западном направлении, с тем чтобы заполнить большие

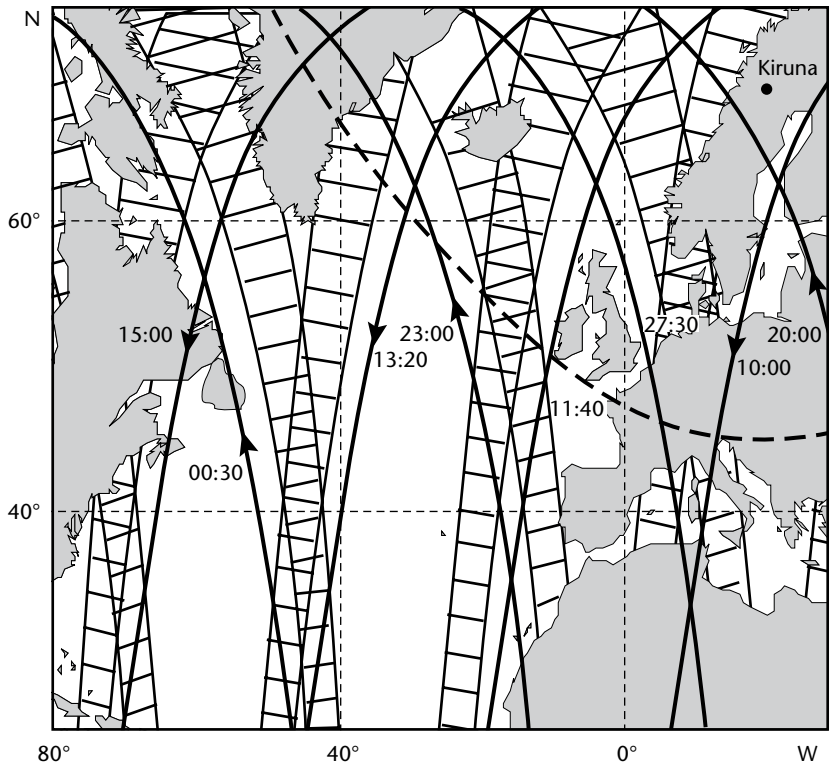


Рис. 8.14. Подспутниковые полосы EPC-1 и охват скаттерометром ветра в районе Северной Атлантики в течение одних суток. Крупные промежутки частично заполняются в последующие дни; номинально это происходит с трехсуточным циклом. Штриховая линия показывает границы приема для наземной станции Кируна в Швеции.

разрывы. Даже при этом охват неполный из-за относительно небольшой ширины полосы в отношении, скажем, прибора УРОВР на спутниках НУОА. Однако потенциально есть данные измерений ветра каждые 50км в рамках районов охвата на глобальном уровне, и ЕКА предоставляет эту информацию оперативным потребителям в течение трех часов со срока измерения. Необработанные данные прибора регистрируются на борту и передаются на наземные станции ЕКА во время движения по каждой орбите, при этом основной является станция Кируна (Северная Швеция), где производится расчет векторов ветра.

Как уже упоминалось, скаттерометр измеряет главным образом уровень мощности обратного рассеяния в определенном месте при различных углах азимута. Поскольку нам известна форма, такая как дальность и углы падения, для расчета тройки значений σ^0 для каждой ячейки можно использовать уравнение (8.18).

Для получения необходимых двух видов информации – скорости и направления ветра – следует использовать модельную функцию (уравнение (8.19)) с соответствующими совместными уравнениями. Однако это нереально на практике; три значения σ^0 будут иметь ограниченную погрешность измерения, а сама функция является весьма нелинейной. Действительно, модель, первоначально основанная на самолетных данных, может применяться не во всех случаях. Скорость и направление ветра должны вычисляться численным образом, обычно путем минимизации функции формы:

$$R = \int_{i=1}^{3} \left[\frac{\sigma_i^0 - \sigma^0(U, \phi_i \theta_i)}{\sigma_i^0 Kp_i} \right]^2 \qquad (8.20)$$

где R – взвешенная сумма квадратов остатков при сравнении измеренных значений σ^0 со значениями, полученными по модельной функции (использовалась оценка скорости и направления ветра). Здесь Kp_i – весовые коэффициенты, связанные с отношением сигнал/шум, S/N. Для минимизации R производят уточнение оценки вектора ветра. Начиная с различных первых приближений направления ветра численное решение может конвергироваться до четырех явных или неопределенных векторов ветра, хотя зачастую имеются только два очевидных разных вектора ветра, обычно разделяющихся примерно на 180°.

Одно из этих решений является «правильным» в том смысле, что оно является ближайшим к реальному направлению ветра и находится в пределах требуемой среднеквадратической точности, составляющей 2 м/с и 20°. Для того чтобы определить, какое из неопределенных решений комплекта является правильным, разработаны алгоритмы. Для успешности таких анализов в качестве полей первого приближения используют также поля ветра численной модели. В настоящее время проводятся работы с данными ERC-1 для калибровки и проверки спутниковых данных о ветре с использованием данных приземных и низкоуровенных самолетных измерений.

8.3.4.3 Определение приземного ветра с помощью микроволнового радиометра

Специальные приборы для получения микроволновых изображений (ССМ/I), установленные на спутниках ДМСП, обеспечивают данные о радиояркостной температуре на нескольких частотах (19, 22, 37 и 85,5 ГГц), а также данные о вертикальной и горизонтальной поляризации. Для измерения разнообразных метеорологических параметров разработаны несколько алгоритмов. Скорость приземного ветра над морем (не над сушей) можно измерять до точности в несколько метров в секунду, используя уравнение регрессии, по яркостной температуре в нескольких каналах. Продолжается работа по проверке и разработке этих алгоритмов, которые пока не используются в оперативной практике.

8.3.5 Осадки

8.3.5.1 Методы измерений в видимом/инфракрасном диапазоне

Методы измерений в видимом/инфракрасном диапазоне позволяют получать качественные или количественные оценки осадков по спутниковым изображениям с помощью косвенных зависимостей между солнечным излучением, отражаемым облаками (или яркостной температурой облака), и осадками. За последние 15 лет разработан и опробован с определенной степенью успеха ряд методов.

Имеются два основных подхода, а именно методы «истории существования» и «индексирования облаков». При первом подходе используются данные геостационарных спутников, которые выдают изображения обычно каждые полчаса. Этот метод применяется главным образом к конвективным системам. Второй подход, также основанный на классификации облаков, не требует ряда последовательных наблюдений одной и той же облачной системы. Следует, однако, отметить, что до настоящего времени ни один из этих методов не показал способности к «переносу». Другими словами, полученные для определенного региона зависимости в определенный период времени могут быть недействительными для другого места и/или сезона.

К другим проблемам относятся трудности определения границ дождя/отсутствия дождя и неспособность определения осадкообразующих систем в мезо- или локальном масштабе. Ученые, работающие в этой области, знакомы с этими проблемами и именно поэтому на практике принято говорить о получении «индексов осадков», а не об интенсивности дождевых осадков.

8.3.5.2 Методы классификации облаков

Классификация облаков была первым методом, разработанным для оценки осадков из космоса. Она основана на предположении, что вероятность дождевых осадков над определенным районом связана с количеством и типом облаков, имеющихся над этим районом. Отсюда можно предположить, что осадки можно характеризовать структурой верхней поверхности соответствующих облаков. Кроме того, в случае с конвективными осадками можно также предположить, что существует зависимость между способностью кучевообразного облака продуцировать дождь в его вертикальных и горизонтальных измерениях.

Вертикальная протяженность конвективного облака связана с яркостной температурой верхней границы облака (более высокие границы облака ассоциируются с более низкими яркостными температурами).

Таким образом, подход состоит в том, чтобы провести анализ (объективный или субъективный) структуры облака, основанный на определении критерия соотнесения облачности и коэффициента (или индекса) осадков. Эта характеристика может быть, например, числом элементов изображения выше определенного порогового уровня.

Общий подход для методов классификации облаков по данным инфракрасных наблюдений состоит в том, чтобы получить зависимость между индексом осадков (PI) и функцией площади поверхности облака S [TBB], связанной с фоновой яркостной температурой (TBB) более холодной, чем определенное пороговое значение T_0. В общем виде эту зависимость можно выразить следующим образом:

$$PI = A_o + \sum_i A_i, S_i(TBB_i) \qquad (8.21)$$

для $TBB_i < T_0$.

При желании к правой части уравнения (8.21) можно добавить член уравнения, связанный с изображением в видимом диапазоне.

Следующий шаг заключается в том, чтобы соотнести PI с физическим количеством, связанным каким-то образом с осадками. Производится подгонка коэффициентов A и порогового уровня T_0 путем сравнения с данными независимых наблюдений, такими как данные осадкомера или радиолокационные данные.

Одной из проблем, присущих этому методу, является отклонение, создаваемое потенциальным присутствием высокоуровенных неосадкообразующих облаков, например перистых. Другим ограничением является тот факт, что спутниковое измерение представляет собой мгновенное наблюдение, интегрированное по пространству, в то время как наблюдения с помощью плювиографа интегрируются по времени в определенном месте.

8.3.5.3 Методы с использованием истории существования

Методы с использованием истории существования, как указывает их название, основаны на наблюдении рядов последовательных изображений, получаемых с геостационарного спутника.

Замечено, что сумма осадков, связанных с определенным облаком, связана и со стадией его развития, поэтому два облака, представляющие один и тот же аспект (с точки зрения изображений ВИД-ИК), могут выдавать различное количество дождевых осадков в зависимости от того, происходит ли их рост или распад.

Как и в случае с методом классификации облаков, получают зависимость между PI и функцией S[TBB], связанной с определенной TBB, лежащей выше определенного порогового уровня.

Кроме того, учитывается эволюция облака и выражается скоростью изменения S[TBB] между двумя последовательными наблюдениями.

Между PI и функциями S[TBB] и их производной в отношении времени можно получить уравнение желаемой сложности:

$$PI = A + A, S(TBB) + A\frac{a}{dt}S(TBB) \qquad (8.22)$$

для $TBB < T_0$.

Здесь также необходим еще один шаг в целях соотнесения индекса осадков, определяемого уравнением, к физическому количеству, связанному с дождевыми осадками. Много таких зависимостей уже опубликовано. Эти публикации широко обсуждаются, и по крайней мере в одном случае было показано, что учет развития облака со временем значительно затруднял решение задачи и что сравнительный успех можно получить с применением простого метода классификации облаков.

За последнее время в различные схемы введено больше физических параметров. К числу улучшений относятся:

(a) использование моделей облаков для учета осадков из слоистообразных облаков, часто связанных с конвективными дождевыми осадками, и для оказания помощи при классификации облаков;
(b) использование микрофизики облаков, таких как данные о зависимости размера капель от интенсивности дождя;
(c) введение одновременных наблюдений за водяным паром в верхних слоях тропосферы;
(d) введение временной задержки между наблюдениями спутника и наземными измерениями.

Стало также очевидным, что данные со спутников можно использовать вместе с данными радиолокационных наблюдений не только для проверки метода, но и в качестве дополнительного средства. Примером совместного использования спутниковых изображений и данных радиолокационных наблюдений может являться система FRONTIERS (оптимизированное прогнозирование дождевых осадков с использованием новых методов расширенного интерактивного использования данных радиолокаторов и спутников), разработанная Метеорологическим бюро Соединенного Королевства.

В настоящее время проводится ряд сравнений между различными методами по одним и тем же экспериментам, данные таких сравнений публикуются, однако необходимо быть весьма осторожным в отношении окончательного заявления, касающегося успеха (или отсутствия такового) методов ВИД-ИК. Степень успеха в значительной мере связана с рассматриваемыми космическими и временными масштабами, и нельзя ожидать, что разработанная и испытанная регрессия для использования в климатических исследованиях также будет подходить для оценки мезомасштабных осадков. Необходимо также иметь в виду, что всегда легко подогнать коэффициенты регрессии для конкретного случая и заявить о том, что метод проверен.

8.3.5.4 Микроволновые методы

Измерения ВИД-ИК представляют наблюдения только верхней поверхности облаков. И наоборот, очень часто полагают, что присутствие облаков не оказывает влияния на микроволновую радиацию. Такое заявление обычно неверно. Степень его действенности меняется в зависимости от используемой микроволновой частоты, а также от типа наблюдаемого облака. Одно из основных отличий излучения в инфракрасном от излучения в микроволновом диапазоне состоит в том, что если излучательная способность поверхности океана в инфракрасном микроволновом диапазоне ее значение (хотя и переменное) намного меньше (от 5 до 200 ГГц в данном случае).Поэтому ТВВ поверхности океана представляется более низкой в микроволновом диапазоне. Над сушей излучательная способность близка к единице, однако значительно изменяется в зависимости от влажности почвы.

В случае микроволн различные воздействия связаны с присутствием облаков над океаном. Они находятся в большой зависимости от частоты. В настоящее время для экспериментального использования разрабатываются активные методы (космический радиолокатор).

8.3.6 Температура поверхности моря

Спутниковые измерения излучаемой от поверхности океана радиации можно использовать для получения оценок температуры поверхности моря (ТПМ), для дополнения систем наблюдений in situ (например, суда, дрейфующие буи), для использования в оперативных метеорологических и океанографических применениях и при исследованиях климата. Хотя спутники измеряют температуру слоя океана толщиной менее или примерно около 1 мм, их данные весьма успешно сравниваются с обычными данными. Большим преимуществом спутниковых данных является географический охват, который обычно намного превосходит охват, получаемый с помощью обычных средств. Кроме того, во многих случаях частота наблюдений спутника превосходит частоту наблюдений с дрейфующих буев, хотя это, кроме прочих факторов, зависит от спутника и широты наблюдений.

Спутниковые измерения ТПМ наиболее часто производятся в диапазоне инфракрасных длин волн и реже в диапазоне микроволновых длин волн. Обычно используются сканирующие радиометры. В ИК диапазоне получение данных заключается в удалении любых засоренных облаками элементов и в корректировке измеренных ИК яркостных температур для юстировки с помощью водяного пара. Определение свободных от облаков элементов должно производиться с большой осторожностью, с тем чтобы обеспечить для излучений океана отсутствие воздействий облаков, излучение которых обычно имеет более низкие температуры по сравнению с таковой поверхности океана. Для исключения влияния облачности для ИК измерений ТПМ разработаны алгоритмы (например, Saunders and Kriebel, 1988).

Спутниковые ИК ТПМ можно получить только по безоблачным районам, в то время как при микроволновых длинах волн помехи облаков намного

меньше, и таким образом во всех ситуациях, за исключением случаев сильной конвекции, имеются данные микроволновых измерений. К недостаткам данных микроволновых измерений относится то, что пространственное разрешение прибора обычно составляет порядка нескольких десятков километров, в то время как ИК разрешение обычно находится в пределах 1 – 5 км. Микроволновые измерения ТПМ рассматриваются в работе Alishouse and McClain (1985).

8.3.6.1 Методы измерений в инфракрасном диапазоне

Большинство спутниковых измерений производится в атмосферном окне диапазона 10,5 – 12,5 мкм, для которого коррекция измеренных яркостных температур вследствие поглощения водяным паром может достигать 10 К в теплой влажной (тропической) атмосфере. В методах для получения ТПМ эта проблема обычно решается одним из двух путей.

При методе разделения длины пути («множественный обзор») наблюдения одного и того же района моря производятся при различных углах обзора. Поскольку атмосферное поглощение пропорционально протяженности атмосферного пути, для коррекции на затухание можно использовать измерения при двух углах обзора. Примером прибора, в котором используется этот метод, является радиометр сканирования вдоль трассы полета (АТСР) – ИК радиометр нового поколения с двойным углом обзора моря, специально разработанный для точных измерений ТПМ (Prata et al., 1990). Он установлен на борту европейского спутника дистанционного зондирования ЕРС-1, запущенного в июле 1991 г.

При методе раздельных окон поправки на атмосферное затухание можно производить с учетом различного поглощения в определенном диапазоне атмосферного окна (например, 10,5 – 12,5 мкм) и с учетом высокой зависимости поглощения водяного пара от длины волны. Разделение яркостной температуры в ИК диапазоне, измеряемой для любых двух длин волн в рамках ИК окна от 10 до 12 мкм, подтверждает теоретические исследования, которые указывают на высокую линейную зависимость между любой парой ИК температур и необходимой коррекцией. Отсюда разность в атмосферном затухании между парой длин волн пропорциональна разности в затухании между второй парой. Одно окно выбирается в качестве идеального окна (через которое спутник „видит" поверхность океана), а одна длина волны является общей для обеих пар. Обычный алгоритм разделенных окон имеет форму:

$$T_S = a_0 + T_{11} + a_1 (T_{11} - T_{12}) \qquad (8.23)$$

где T_S – ТПМ, значения T – яркостная температура при длине волны 11 или 12 мкм, как указывалось, 0 и 1 – постоянные. Алгоритмы этой общей формы получены применительно к измерениям в дневное или ночное время с использованием нескольких каналов ИК (например, работа McClain, Pichel and Walton, 1985).

Приборы

Для измерений ТПМ используется ряд спутниковых приборов (см. работу Rao et al., 1990):

(a) УРОВР НУОА;
(b) ВАС ГОЕС;
(c) ХИРС/МСЮ НУОА;
(d) ВИССР ГМС;
(e) СММР (сканирующий многоканальный микроволновый радиометр) Сисат и Нимбус-7;
(f) ДМСП (программа военных метеорологических спутников) ССМ/Т (специальный микроволновый датчик для определения температуры).

Спутниковые

до сих пор для получения данных о ТПМ со спутников наиболее широко применяется УРОВР с использованием каналов 3, 4 и 5 (см. приложение 8.А).

8.3.6.2 Сравнения с данными наземных наблюдений

Прежде чем рассматривать вопрос о сравнении полученных со спутников данных о ТПМ с данными измерений in situ, важно понять, что измеряют на самом деле спутниковые приборы. В диапазоне от примерно 3 и до 14 мкм спутниковые радиометры измеряют только исходящую радиацию от „покрывающего" слоя примерно 1 мм толщиной.

Действительная физическая температура этого покрывающего слоя может отличаться от температуры моря ниже (скажем, на глубине от нескольких метров до нескольких десятков метров) в пределах до нескольких кельвинов в зависимости от доминирующих условий и от ряда таких факторов, как:

(a) перемешивание верхних слоев океана под воздействием ветра или гравитационного регулирования ночью после радиационного охлаждения самых верхних слоев;
(b) нагревание поверхности океана солнечными лучами;
(c) испарение;
(d) дождевые осадки;
(e) течения;
(f) поднимание и опускание водных масс.

Наиболее значительным из всех перечисленных факторов может быть нагревание верхнего слоя океана в спокойный солнечный день. До некоторой степени несоответствие между спутниковыми данными о ТПМ преодолевается с помощью алгоритмов дневного и ночного времени, которые специально подгоняются для учета суточных воздействий океана. Зачастую предпочитают использовать спутниковые данные о ТПМ, полученные ночью, поскольку именно ночью влияние покрывающего слоя и термоклина океана минимальное. Следует также помнить о том, что судовые измерения касаются точечных значений на определенной глубине («температура на уровне забора воды») порядка 10 м или более, в то время как спутник измеряет излучение, усредненное по большой площади (от одного до нескольких десятков или сотен км^2). Следует также отметить, что судовые данные часто могут в значительной мере отличаться по качеству.

В работе Rao et al. (1990) проведено сравнение глобальных спутниковых многоканальных данных о ТПМ (МКТПМ) с данными дрейфующих буев. Отклонение весьма незначительное, а среднеквадратическое отклонение составляет около 0,5 К. Обычно сравнения ИК спутниковых ТПМ с данными in situ (например, с данными буев) показывают отклонения в рамках 0,1 К, а ошибки – в диапазоне от 0,4 до 0,6 К.

В работе Rao et al. (1990) также сравниваются микроволновые спутниковые данные о ТПМ (с использованием прибора СММР) с данными судовых наблюдений. Отклонение составляет 0,22 К, а стандартное отклонение – 0,75 К для сравнений данных за один месяц.

В заключение можно сделать вывод, что получаемые по данным спутников значения ТПМ обеспечивают очень важный источник наблюдений для использования в метеорологических и океанографических применениях. Поскольку спутниковые приборы обеспечивают явно отличающиеся данные измерений температуры поверхности моря от таковых, полученных с судов или буев, следует проявлять осторожность при слиянии спутниковых данных с обычными. Однако многие проблемы слияния нескольких отличающихся комплектов данных преодолеваются с помощью спутниковых алгоритмов ТПМ, которые обеспечивают соответствие спутниковых данных данным точечных наблюдений с дрейфующих буев.

8.3.7 Влажность верхней тропосферы (ВВТ)

Метод, используемый для получения значений ВВТ (по данным геостационарного спутника), основан на интерпретации излучений канала водяного пара на длине волны 6,7 мкм, а результаты представляют среднее значение по глубокому слою в атмосфере между примерно 600 и 300 гПа. Ограничения этого атмосферного столба нельзя определить точно, поскольку функция вклада канала водяного пара изменяется по высоте пропорционально содержанию водяного пара в атмосфере. Выходная продукция сегментной обработки обеспечивает описание всех определяемых поверхностей (облака, суша или море), а продукция ВВТ получается только для сегментов, не содержащих средние или высокие облака. Горизонтальное разрешение – это разрешение номинального сегмента, а значения выражаются в виде относительной влажности в процентах.

Данные получают дважды в сутки со спутника METEOCAT (на основе изображений за 11.00 и 23.00 МСВ) и распространяются по ГСТ в коде ВМО SATOB.

8.3.8 Общее содержание озона

Солнечный ультрафиолетовый свет, падающий на атмосферу, частично поглощается, частично отражается в космос. Поскольку озон является основным отражающим компонентом, радиометр для измерения отражения солнечного УФ (СБУВ) позволяет получать расчеты глобального распространения и временного изменения атмосферного озона. Данные измерений в УФ диапазоне, 160 – 400 мкм, в настоящее время представляют большой интерес в качестве данных, указывающих на возможные изменения климата.

Наряду с СБУВ имеется спектрометр для картирования общего содержания озона (TOMC) – прибор, установленный на борту спутника Нимбус-7, представляющий собой монохроматор, измеряющий радиацию в шести диапазонах от 0,28 до 0,3125 мкм. Он обеспечивает оценки общего содержания озона в рамках примерно 2 % от наземных данных в течение десятилетия и является одним из основных источников данных при мониторинге «озоновой дыры».

В отличие от измерений в УФ или видимом диапазоне длин волн, использование в спутниковых радиометрах диапазона поглощения озона на длине волны 9,7 мкм в тепловом ИК позволяет определять плотность столба общего содержания озона с помощью этих радиометров, которые сканируют либо по лимбу, либо под спутником (например, в приборе TOBC на спутнике НУОА есть канал 9,7 мкм). Точность данных подобных спутниковых измерений в сравнении с данными наземных наблюдений (например, спектрофотометр Добсона) составляет примерно 10 % в основном из-за использования только одного канала (см. работу Ma, Smith and Woolf, 1984).

Следует отметить, что огромным преимуществом спутниковых данных перед наземными данными

(данные озоновых зондов или измерений приборами Добсона) является временной и широкий пространственный охват, позволяющий таким данным приобретать исключительную важность при мониторинге глобального истощения озона, особенно по полярным районам, где сеть обычных наблюдений является чрезвычайно редкой.

В течение 90-х годов вступают в строй специализированные спутниковые приборы, с помощью которых измеряют уровни озона или другие составляющие, связанные с верхней атмосферой.

К ним относятся приборы, установленные на спутнике НАСА для исследований верхней атмосферы (ЮАРС); прибор для измерения содержания озона и аэрозоля в полярных районах (ПОАМ 2), установленный на СПОТ-3, спутнике дистанционного зондирования, запущенном в 1993 г.; три прибора для измерений стратосферного аэрозоля и для участия в эксперименте определения газового состава (СЕЙДЖ III); ряд приборов, запланированных к запуску на полярно-орбитальных спутниках системы наблюдений за Землей (СНЗ) в конце 90-х годов.

8.3.9 Обнаружение вулканического пепла

Облака вулканического пепла представляют собой опасное явление для авиации. Только с 1970 г. отмечены многочисленные опасные и дорогостоящие инциденты, связанные с непреднамеренными полетами реактивных самолетов через облака пепла, выбрасываемого вулканами, особенно в районе азиатской части Тихого океана и в тихоокеанском кольце, где имеется огромное число действующих вулканов. В результате ВМО, ИКАО и другие международные организации активно работают в направлении улучшения систем обнаружения и предупреждения, а также разработки процедур с тем, чтобы свести к минимуму риск для пассажиров и самолетов.

Отличить облака вулканического пепла от обычных облаков (вода/лед) на одноканальных инфракрасных или видимых спутниковых изображениях чрезвычайно трудно, если вообще невозможно, главным образом потому, что облака пепла часто появляются в регионах, где облачность и грозы–рядовые явления, а два типа облаков выглядят похожими. Однако недавно были разработаны методы по использованию канала с раздельными окнами на приборе НУОА УРОВР с целью отличать облака пепла от обычных облаков и улучшить выделение облаков пепла, которые можно не увидеть на одноканальных ИК изображениях.

Метод, используемый УРОВР, основан на том факте, что микрофизические свойства облаков пепла отличаются от свойств облаков вода/лед в тепловом ИК диапазоне. Над облаком пепла разность значений яркостной температуры в каналах 4 и 5 прибора УРОВР, Т4 – Т5, обычно является отрицательной и не превышает примерно –10 К, в то время как для облака вода/лед Т4 – Т5 близка к нулю или слегка превышает его (Prata, 1989; Potts, 1993).

Подобный принцип определения облаков вулканического пепла в последнее время применяется при разработке многоканальных радиометров, которые используются на земле или устанавливаются на самолетах.

Было проведено несколько исследований, в которых велись наблюдения облаков вулканического пепла *in situ*, с целью оценить качество и точность определения облаков вулканического пепла с помощью УРОВР. Наметилась тенденция использовать на оперативной основе наземные сводки вулканических извержений, с тем чтобы предупредить метеорологов о возможности использовать спутниковые изображения для мониторинга последующего развития и движения облаков пепла. Следует отметить, что этот метод имеет свои ограничения, например в случаях, когда облако пепла может рассеяться, а подстилающая радиация для облаков вода/лед или поверхности моря/суши может дать значения Т4 – Т5, близкие к нулю или положительные, а не отрицательные, как ожидается для облака вулканического пепла.

8.3.10 Нормализованный вегетационный индекс растительности

Спутники можно использовать для наблюдений за растительностью (Rao et al., 1990). Сюда входят мониторинг урожая, вырубки леса, рационального использования лесов, оценка засухи и мониторинг наводнений. Метод наблюдений основан на том факте, что отражательная способность зеленой растительности является низкой в видимых длинах волн, но очень высокой в диапазоне от примерно 0,7 до 1,3 мкм (вследствие взаимодействия падающей радиации с хлорофиллом).

Однако отражательная способность над такими поверхностями, как почва или вода, остается низкой в близком к ИК и видимом диапазонах.

Отсюда в спутниковых методах для оценки растительности обычно используют разность между отражательной способностью видимого канала и таковой близкой к ИК канала около 1 мкм. Например, нормализованный вегетационный индекс растительности (NDVI), полученный по данным УРОВР, который очень широко применяется, определяется как:

$$NDVI = (Ch2 - Ch1)/(Ch2 + Ch1) \qquad (8.24)$$

где Ch1, Ch2 – результаты измерений в 1-м и 2-м каналах, соответственно.

Значения для этого индекса обычно находятся в диапазоне 0,1 – 0,6 для растительности, при этом более высокие значения связываются с большей зеленостью и/или плотностью растительного покрова. И наоборот, над облаками, снегом, водой или горами NDVI весьма близок к нулю или отрицательный.

Мониторинг растительности со спутников начал широко использоваться примерно в середине 70-х годов. С тех пор он принципиально улучшился в результате постепенного улучшения теоретического понимания комплексных взаимодействий между растительностью и падающей радиацией и лучшего знания характеристик спутниковых приборов и коррекций, необходимых для спутниковых измерений. Как и в случае данных спутниковых измерений ТПМ, обработка спутниковых данных для NDVI связана со многими коррекциями для геометрии спутникового обзора и для солнечного освещения, атмосферных воздействий, таких, как аэрозоли и водяной пар, характеристик калибровки прибора и т. д. Сначала также проводится исключение влияния облачности для получения безоблачных элементов.

К трем основным приборам, используемым для мониторинга растительности с помощью спутника, относятся УРОВР НУОА, многоканальный сканирующий радиометр и картопостроитель спутника Ландсат. Интерпретация NDVI и их использование в различных областях метеорологии или в науках о Земле опираются на четкое понимание того, что измеряют спутниковые приборы, а что является сложной проблемой, поскольку в поле обзора зеленые листья могут быть ориентированы при различных углах, могут встретиться различные типы растительности или участки без растительности.

Однако NDVI коррелирует с параметрами наземных измерений, как это показано на рисунке 8.15. Каждая точка –это конкретное среднее местоположение на конкретный срок наблюдений (Paltridge and Barber, 1988), на котором NDVI (обозначенный V_0) представлен как функция содержания влаги в самой растительности (СГВ), полученной от наземных образцов растительности в различных местах, обозреваемых прибором УРОВР НУОА. Из рисунка видно, что NDVI хорошо коррелирует с содержанием влаги в самой растительности, за исключением критической величины СГВ, соответствующей очень зеленой растительности, для которой значение NDVI остается постоянным. Поэтому NDVI могут быть весьма полезными при прогнозировании метеорологических условий пожара.

На рисунке 8.16 (Malingreau, 1986) показан NDVI за трехлетний период для района рисовых полей в Таиланде. Пиковые значения NDVI соответствуют сухому и влажному сезонам культуры риса.

8.3.11 Другие параметры

В настоящее время со спутников определяют также ряд других параметров, включая различные атмосферные примеси газов, влажность почвы (с помощью радиолокатора с синтетической апертурой (ЕРС-1)), интегральное содержание водяного пара (ССМ/I), содержание жидкой воды в облаке (ССМ/I), распределение паводковых вод и радиационный баланс Земли (РБЗ) (на полярно-орбитальных спутниках НУОА). Атмосферное давление пока еще не измеряется с достаточной точностью из космоса. Атмосферную неустойчивость можно измерить по профилям температуры и влажности.

Лесные пожары с достаточной успешностью контролируются с помощью спутниковых приборов, особенно УРОВР НУОА (Robinson, 1991). Канал 3 (в окне 3,7 мкм) чрезвычайно чувствителен к наличию «горячих точек», т. е. районов, в которых яркостная температура может находиться в пределах от 400 до примерно 1000 К. Его чувствительность объясняется значительной температурной чувствительностью функции Планка и высокими значениями излучения черного тела от горячих объектов при примерно 4 мкм. Горячие точки хорошо видны на изображениях канала 3, что позволяет таким образом точно определять фронты пожара. Для определения пожара очень полезно совместно использовать изображения каналов 1 и 4, по которым можно определять дым и облачность соответственно, и изображения канала 3.

Снег и лед можно обнаруживать с помощью таких приборов, как УРОВР (с видимым и инфракрасным диапазонами) или СММР (микроволновый) на Нимбус-7 (Gesell, 1989). С применением УРОВР процесс определения сводится к различию между снегом/льдом и различными поверхностями, такими, как суша, море или облака.

Рассматриваются изменения спектральных характеристик этих поверхностей с длиной волны с использованием алгоритмов, включающих такие методы, как пороговые значения, коэффициенты излучений или отражательная способность при различных длинах волн, разности между излучениями или отражательной способностью; пространственная однородность. Серьезным недостатком использования УРОВР является то, что наличие

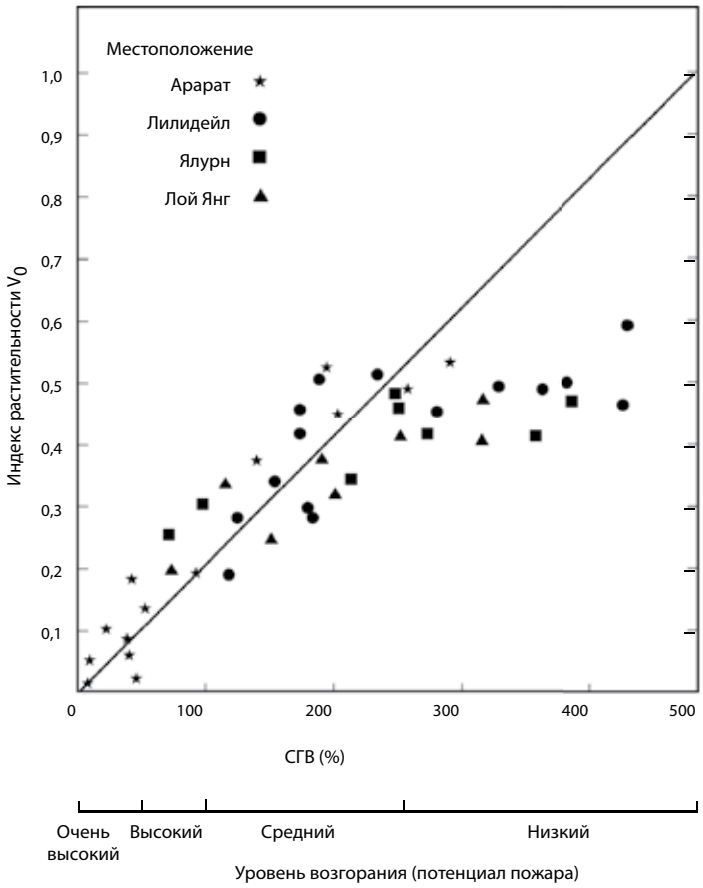


Рис. 8.15. Полный охват наблюдаемого со спутника индекса растительности в качестве функции содержания влаги в самой растительности.

облаков ограничивает обнаружение, что очень важно, поскольку в районах исследования облачность может быть очень высокой.

При использовании микроволновых длин волн обнаружение морских льдов основывается на сильном контрасте между морем и льдом вследствие широко различающихся коэффициентов излучения (отсюда – яркостных температур) этих поверхностей на микроволновых длинах волн. К основному преимуществу микроволнового обнаружения относится способность работать при любых метеорологических условиях, хотя пространственное разрешение составляет обычно десятки километров по сравнению с 1 км для УРОВР.

8.4 СРЕДСТВА ОБЕСПЕЧЕНИЯ

8.4.1 Спутниковая телеметрия

Все спутники получают команды и передают данные с использованием телеметрических средств.

Однако метеорологические спутники на геостационарной орбите и некоторые полярно-орбитальные спутники имеют на борту ретрансляторы, которые получают данные, направленные им с помощью телеметрии от платформ сбора данных (ПСД), расположенных в удаленных от центра пунктах. Это позволяет спутникам действовать в качестве релейных телеметрических станций.

К числу преимуществ спутниковой телеметрии относятся следующие:

(a) не требуется ретрансляторных станций;
(b) оборудование удаленных от центра пунктов и приемных средств является простым;
(c) удаленные от центра пункты можно легко перемещать с одного места на другое;
(d) удаленные от центра пункты являются несложными; их антенны небольшие и не требуют высоких мачт;
(e) в плане топографии имеются лишь незначительные ограничения;
(f) один приемник может получать данные от удаленных от центра пунктов, охватывая около четверти поверхности Земли;

(g) потребности в энергии являются минимальными, так что достаточно солнечных батарей;
(h) надежность оборудования является высокой как на борту космического аппарата, так и на полевых объектах;
(i) потребителю не требуется лицензии на частоты, их имеет оператор спутников;
(j) можно использовать сколько угодно приемников без необходимости увеличения энергии или средств на удаленных от центра пунктах.

8.4.2 Телеметрическая система ПСД

Метеосат

На рисунке 8.17 изображена телеметрическая система ПСД METEOCAT. Следует отметить, что аналогичные системы работают на спутниках ГОЕС, ГМС и ИНСАТ и описаны в публикации ВМО(ВМО , 1989). Подобные системы имеются и для других геостационарных спутников. Удаленный от центра пункт (A) передает данные своих измерений на METEOCAT (B) по каналу 1 в установленные временные интервалы (ежечасно, раз в три часа, ежесуточно и т. д.). Он имеет одноминутный промежуток времени, в который передает свои данные, на частоте между 402,01 и 402,20 МГц при мощности

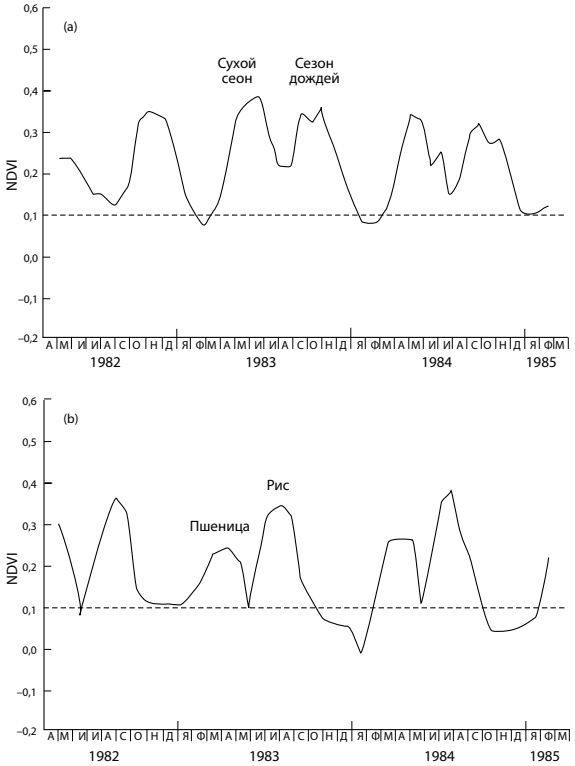


Рис. 8.16. Кривые развития NDVI для возделываемого риса на плато Бангкока (Таиланд) (a) и системы выращивания пшеницы и риса в провинции Янгцзы (Китай) (b)

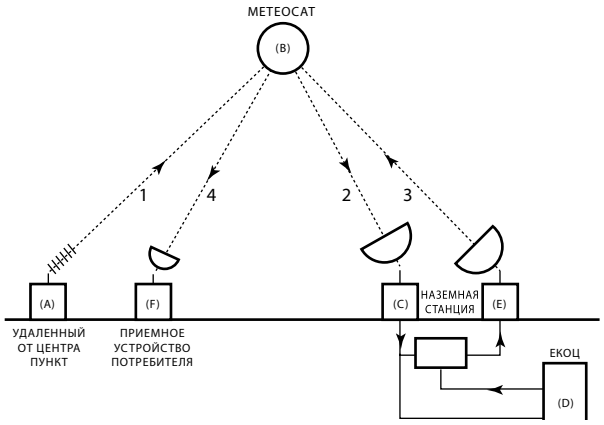


Рис. 8.17. Телеметрическая система METEOCAT

5 Вт (25 – 40 Вт для мобильных пунктов со всенаправленной антенной).

Спутник немедленно ретранслирует эти данные на наземную станцию (C) ЕКОЦ, расположенную в Оденвальде около Мишельштадта (Германия), по каналу 2 с частотой около 1 675 МГц.

Спутник немедленно ретранслирует эти данные на наземную станцию (C) ЕКОЦ, расположенную в Оденвальде около Мишельштадта (Германия), по каналу 2 с частотой около 1 675 МГц.

Отсюда данные передаются по наземным линиям связи в ЕКОЦ, находящийся примерно в 40 км северо-западнее Оденвальда в Дармштадте (D). Здесь они проходят проверку на качество, архивируются и, если необходимо, распространяются по Глобальной сети телесвязи. Они также сохраняются на наземной станции и возвращаются на METEOCAT (мультиплексированными с графическими данными) со второй тарелочной антенны (E) по каналу 3 для ретрансляции потребителям через спутник по каналу 4.

Уровень сигнала таков, что его можно получать с использованием тарелочной антенны диаметром 2 м, хотя антенна с диапазоном 1,5 м часто является достаточной. В тарелке антенны располагается «преобразователь», цель которого состоит в том, чтобы преобразовывать входящий сигнал с 1694,5 МГц в 137 МГц для ввода в приемник, который расшифровывает передачи, расставляет данные в знаки системы ASCII для принтера или ПК.

Центральным блоком в удаленном от центра пункте является ПСД. Это электронный блок, который во многих отношениях аналогичен регистрирующему устройству и может принимать либо несколько аналоговых входных напряжений непосредственно с датчиков или же серийные данные (RS232) от

процессора между датчиками и ПСД. Этот блок также имеет небольшую память для хранения информации, получаемой между передачами, участок процессора для общего управления, часовую цепь, радиопередатчик и либо направленную, либо всенаправленную антенну.

В памяти для передачи со скоростью 100 бит/с можно хранить до 600бит. Эту емкость можно удвоить, но для этого требуется два одноминутных временных интервала для передачи. Емкость устанавливается количеством данных, которые можно передавать в одноминутном временном интервале. Изготовитель ПСД программирует их таким образом, что у них есть адрес (8-значное байтовое число) и свой срок передачи, при этом оба элемента определяются ЕВМЕТСАТ. В последующих конструкциях, вероятно, они будут программироваться потребителем, с тем чтобы иметь большую гибкость.

При работе ПСД их внутренние часы настраиваются на СГВ «синхронизирующим элементом» или переносным ПК. Разрешается отклонение в любую сторону до 15 секунд, после превышения допуска их нужно вновь устанавливать. В назначенные сроки ПСД передает накопленное содержание своей памяти на МЕТЕОСАТ и после этого устанавливает ее в исходное положение в готовности получать следующий комплект данных для передачи в следующий период времени. Эта операция повторяется бесконечное число раз.

Синхронизатор (или ПК) можно также использовать для выделения станции названия (например, ее местоположение) и для проведения ряда тестов, которые включают проверку следующего:

установку часов, напряжение батарей, состояние передатчика, аналоговые вводы и содержание памяти. Можно также поставить часы на опережение, с тем чтобы провести проверку общей работы, включая проверку передачи (на эквивалент нагрузки, с тем чтобы предотвратить помехи путем передачи вне выделенного временного интервала).

ПСД помещается в небольшом отсеке и может работать от солнечной батареи. К другим остающимся частям удаленного от центра пункта относятся датчики, которые аналогичны датчикам на обычной регистрирующей станции или на наземном устройстве радиотелеметрии.

8.4.3 Обработка данных МЕТЕОСАТ

Изображения

Изображения получают построчно с помощью многоспектрального радиометра (см. предыдущие разделы). МЕТЕОСАТ вращается на своей оси со скоростью 100 оборотов в минуту, сканируя Землю по горизонтальным линиям с востока на запад. При каждом вращении зеркало делает небольшой шаг с юга на север, образуя полный просмотр Земли за 25 минут (включая 5 минут для перенастройки зеркала для следующего обзора). Изображение в видимом диапазоне образуется из 5 000 строк, при этом каждая строка состоит из 5 000 элементов изображения, позволяя обеспечивать разрешение в 2,5 км непосредственно под спутником (меньшее разрешение на более высоких широтах). Каждое из двух инфракрасных изображений образуется из 2 500 строк, каждая строка состоит из 2 500 элементов, обеспечивая разрешение под спутником в 5 км.

Изображения передаются в цифровой форме построчно со скоростью 333 000 бит/с в то время, когда сканирующее устройство обращено в космос. Эти передачи не предназначаются для конечного потребителя, а идут непосредственно на наземную станцию, где ЕКОЦ обрабатывает их, а затем распространяет среди потребителей снова через МЕТЕОСАТ по двум отдельным каналам.

Первый канал предназначен для цифровых данных высокого качества, принимаемых главной станцией использования данных (ПДУС). По второму каналу передаются изображения в аналоговой форме, известные как ВЕФАКС (факсимиле метеорологических данных), стандарт, используемый большинством метеорологических спутников (включая полярно-орбитальные спутники).

Эти изображения можно получать с помощью дополнительной станции использования данных (СДУС). СДУС получает изображения различных участков земной поверхности в области обзора МЕТЕОСАТ. Передачи ведутся по суточному расписанию, при этом одно изображение передается каждые четыре минуты. СДУС также принимает передачи ПСД.

Обработка данных ПСД

В настоящее время в дополнение к каналам для получения и распространения изображений МЕТЕОСАТ имеет 66 каналов для ретрансляции данных ПСД от удаленных от центра пунктов на наземную станцию. Половина этих каналов зарезервирована для международного использования, т. е. для подвижных ПСД, уходящих из поля обзора одного геостационарного метеорологического спутника в поле обзора другого спутника.

Остальные каналы предназначаются для фиксированных, «региональных» ПСД. В каждый канал могут входить столько ПСД, сколько позволяют их

частота и продолжительность сообщений. Таким образом, при трехчасовых сроках сообщений, одноминутной длительности сообщения со всех ПСД и при 30-секундном буферном периоде между каждым сообщением (с учетом отклонения часов) в каждом канале можно разместить 120 ПСД, а всего 7 920.

8.4.4 Телеметрические системы полярно-орбитальных спутников

Полярные спутники имеют низкие орбиты с направлением север-юг и с периодом обращения около 100 минут. Вследствие этого они не являются стационарными над одной точкой в небе, а появляются из-за горизонта, проходят небо (необязательно прямо над головой) и заходят за противоположный горизонт. При каждом витке их можно видеть в течение примерно 10 минут, однако это время варьирует в зависимости от угла, при котором они являются видимыми.

Такие орбиты требуют различного режима работы для использующей их телеметрической системы. В отличие от геостационарных систем, ПСД, используемые с полярно-орбитальными спутниками (называемые системой сбора данных (ССД)), не могут передавать данные в определенные сроки, так же как невозможно направить их антенну в одну точку неба. Вместо этого для ССД выделяются группы интервалов, в которые можно передавать данные, в диапазоне от 100 до 200 секунд. Они используют близкие, но не идентичные частоты для ПСД, а их антенны обязательно должны быть всенаправленными.

Каждому удаленному от центра пункту придается несколько отличающийся интервал передачи, с тем чтобы уменьшить шансы совпадения передач от двух станций. Дальнейшее разделение пунктов достигается за счет того факта, что благодаря движению спутника на приемной частоте возникает сдвиг Доплера. Он является различным для каждой ССД, поскольку они занимают различное положение по отношению к спутнику.

Это последнее свойство используется также для того, чтобы следить за положением подвижных пунктов. Это одна из полезных характеристик полярных орбит, которая может позволить, например, как следить за дрейфующим буем, так и собирать от него данные. Кроме того, буй может совершить полный оборот вокруг земного шара и находиться в поле зрения одного и того же спутника. Это является основой работы системы АРГОС, которая действует на спутниках НУОА и управляется Францией. Этим могут воспользоваться даже фиксированные ССД в том плане, что можно собирать данные из любой точки Земли через один спутник.

Передачи от ССД принимаются спутником, находящимся в какой-то точке своего витка. Средства дальнейшей передачи полученных данных для потребителя должны отличаться от средств, которые предназначены для МЕТЕОСАТ. Для этого пользуются двумя маршрутами.

Во-первых, они незамедлительно ретранслируются в реальном времени в УВЧ диапазоне, а затем их можно получать на приемнике потребителя на всенаправленную антенну. Для обеспечения связи как приемник, так и пункт должны находиться в пределах не более примерно 2 000 км друг от друга, поскольку оба этих средства должны обладать способностью «видеть» спутник одновременно.

Во втором маршруте полученные данные заносятся на магнитную ленту регистрирующего устройства на борту космического аппарата и ретранслируются на наземные станции по мере прохождения над ними спутника. Эти станции расположены в США и во Франции (система Аргос).

Отсюда данные вводятся в ГСТ или направляются в форме печатных снимков по почте, если нет большой срочности.

Расходы по эксплуатации полярно-орбитальных спутников значительные, и хотя они имеют уникальные преимущества перед геостационарными системами, их в меньшей степени используют для общих целей спутниковых измерений.

Самое большое преимущество этих спутников состоит в том, что они способны собирать данные с высоких широт, за пределами досягаемости геостационарных спутников.

Они также могут иметь большое значение в тех районах мира, которые в настоящее время не охватываются геостационарными спутниками. Например, японский спутник ГМС в настоящее время не обеспечивает функций ретрансляции, и потребители могут получать данные только по ГСТ. До тех пор пока вся поверхность Земли не будет охватываться геостационарными спутниками со средствами ретрансляции, полярно-орбитальные спутники будут с успехом заполнять эту нишу..

ПРИЛОЖЕНИЕ 8.A

КАНАЛЫ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОГО РАДИОМЕТРА ОЧЕНЬ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ (УРОВР)

Разрешение в надире 1,1 км; ширина полосы > 2 600 км

Канал	*Длина волны, мкм*	*Основное направление использования*
1	0,58 – 0,68	Получение изображения поверхности облаков днем
2	0,725 – 1,10	Определение водной поверхности, льда, тающего снега
3	3,55 – 3,93	Измерение температуры поверхности моря, получение изображения облачности ночью
4	10,30 – 11,30	Измерение температуры поверхности моря, получение изображения облаков днем и ночью
5	11,50 – 12,50	Измерение температуры поверхности моря, получение изображения облаков днем и ночью

ПРИЛОЖЕНИЕ 8.В

ПРИБОР ТАЙРОС ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ (ТОВС) КАНАЛЫ ИК-ЗОНДА С ВЫСОКОЙ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТЬЮ (ХИРС)

The television infrared observation satellite operational vertical sounder high resolution infrared sounder channels

Канал	*Центральная длина волны, мкм*	*Основное направление использования*
1	15,00	Измерение температуры
2	14,70	
3	14,50	
4	14,20	
5	14,00	
6	13,70	
7	13,40	
8	11,10	Измерение температуры подстилающей поверхности и облаков
9	9,70	Определение общего содержания озона
10	8,30	Измерение содержания водяного пара
11	7,30	
12	6,70	
13	4,57	Измерение температуры
14	4,52	
15	4,46	
16	4,40	
17	4,24	
18	4,00	Измерение температуры подстилающей поверхности
19	3,70	
20	0,70	Обнаружение облачности

Каналы прибора микроволнового зондирования (МСЮ)

Канал	*Частота, ГГц*	*Основное направление использования*
1	50,31	Определение излучательной способности поверхности и поглощения облаками
2	53,73	Измерение температуры
3	54,96	
4	57,95	

Каналы прибора стратосферного зондирования (ССЮ)

Три канала 15 мкм для измерения температуры.

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Всемирная Метеорологическая Организация, 1981: *Наставление по Глобальной системе наблюдений*, (ВМО-№ 544), Женева.

Всемирная Метеорологическая Организация, 1989: *Руководство по Глобальной системе наблюдений*, (ВМО-№ 488), Женева.

Alishouse, J. C. and McClain, E. P., 1985: Sea surface temperature determinations. *Advances in Geophysics*, 27, pp. 279 – 296.

Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies, 1993: *Technical Proceedings of the Sixth International TOVS Study Conference. University of Wisconsin* (see also proceedings of previous conferences, 1991, 1988).

Eyre, J. R., Brownscombe, J. L. and Allam, R. J., 1984: Detection of fog at night using advanced very high resolution radiometer imagery. *Meteorological Magazine*, 113, pp. 264 – 271.

Gesell, G., 1989: An algorithm for snow and ice detection using AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 10, pp. 897 – 905.

King-Hele, D., 1964: *Theory of Satellite Orbits in An Atmosphere*. Butterworth, London.

Ma, X. L., Smith, W. L. and Woolf, H. M., 1984: Total ozone from NOAA satellites: A physical model for obtaining measurements with high spatial resolution. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23, pp. 1309 – 1314.

Malingreau, J. P., 1986: Global vegetation dynamics: Satellite observations over Asia. *International Journal of Remote Sensing*, 7, pp. 1121 – 1146.

Massey, H., 1964: *Space Physics*. Cambridge University Press, London.

McClain, E. P., Pichel, W. G. and Walton, C. C., 1985: Comparative performance of AVHRR-based multichannel sea surface temperatures. *Journal of Geophysical Research*, 90, pp. 11587 – 11601.

Paltridge, G. W. and Barber, J., 1988: Monitoring grassland dryness and fire potential in Australia with NOAA/AVHRR data. *Remote Sensing of the Environment*, 25, pp. 381 – 394.

Potts, R. J., 1993: Satellite observations of Mt. Pinatubo ash clouds. *Australian Meteorological Magazine*, 42, pp. 59 – 68.

Prata, A. J., 1989: Observations of volcanic ash cloudsin the 10 – 12 micron window using AVHRR/2. *International Journal of Remote Sensing*, 10, pp. 751 – 761.

Prata, A. J., et al., 1990: The along-track scanning radiometer for ERS-1: Scan geometry and data simulation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 28, pp. 3 – 13.

Rao, P. K., et al., 1990: *Weather Satellites: Systems, Data, and Environmental Applications*.

American Meteorolological Society, Boston.

Robinson, J. M., 1991: Fire from space: Global fire evaluation using infrared remote sensing. International *Journal of Remote Sensing*, 12, pp. 3 – 24.

Saunders, R. W. and Kriebel, K. T., 1988: An improved method for detecting clear sky and cloudy irradiancesfrom AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 9, pp. 123 – 150.

Smith, W. L., 1985; Satellites. In: Haughton, D. D. (ed.), *Handbook of Applied Meteorology*, Wiley, New York, pp. 380 – 472.

Smith, W. L. and Platt, C. M. R., 1978: Comparisons of satellite-deduced cloud heights with indications from radiosonde and ground-based laser measurements. *Journal of Applied Meteorology*, 17, pp. 1796 – 1802.

World Meteorological Organization, 1994*a*: *Application of Satellite Technology*: Annual Progress Report 1993. WMO Satellite Report No. SAT-12, WMO/TD-No. 628, Geneva.

World Meteorological Organization, 1994*b*: *Information on Meteorological and Other Environmental Satellites*. Third edition, WMO No. 411, Geneva.

ГЛАВА 9

РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

9.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Данная глава содержит общее описание метеорологических радиолокаторов микроволнового диапазона – «погодных» радиолокаторов, основным назначением которых является наблюдения за гидрометеорами в атмосфере. В ней уделяется особое внимание техническим и оперативным характеристикам, которые должны учитываться при планировании, разработке и эксплуатации радиолокаторов и радиолокационных сетей в целом места размещения для метеорологического и гидрологического обслуживания. При подготовке главы был использован обширный список литературы. В ней также кратко упоминаются высокочастотные радиолокационные системы для наблюдения за поверхностью океана. Радиолокаторы, используемые для получения вертикальных профилей, описываются в главе 5 части II.

9.1.1 МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ РАДИОЛОКАТОР

Метеорологические радиолокаторы предназначены для обнаружения облачных полей и зон осадков, гроз и грозовых очагов, способны фиксировать изменения показателя преломления в атмосфере, которые могут создаваться локальными изменениями температуры или влажности. Наряду с метеорологическими целями радиолокационные эхосигналы также могут быть получены от воздушных судов, пыли, птиц или насекомых. В данной главе проводится обзор радиолокаторов оперативного использования во всем мире. Метеорологические радиолокаторы с характеристиками, которые наилучшим образом подходят для наблюдений и исследований атмосферы, излучают электромагнитные импульсы в диапазоне частот 3 – 10 ГГц (длина волны соответственно 3 – 10 см). Они предназначены для обнаружения и отображения зон осадков, оценки их интенсивности и направления перемещения, а также возможного определения типа осадков. Более высокие частоты используются для обнаружения гидрометеоров малого размера, таких как частицы облаков или даже тумана. Хотя это и представляет интерес исследователям физики облаков, такие частоты, как правило, не используют в оперативной практике из-за сильного ослабления радиолокационного сигнала средой, в которой он проходит. На более низких частотах радиолокаторы способны обнаруживать неоднородности показателя преломления в безоблачной атмосфере, и используются для получения вертикальных профилей скорости ветра. Несмотря на то, что они могут обнаруживать осадки, возможности сканирования ограничены размером апертуры антенны, который задает эффективную разрешающую способность.

Обратный сигнал, поступающий после отражения излучаемого импульса от метеорологической цели и называемый радиолокационным эхосигналом, имеет отличную от первоначальной амплитуду, фазу и поляризацию. Повсеместно большая часть оперативных радиолокаторов все еще обладает ограниченными возможностями для анализа характеристик амплитуды, которые связаны с распределением частиц по размеру и с их количеством в импульсном объеме, облучаемым радиолокационным лучом. Амплитуда отраженного сигнала используется для определения параметра, называемого отражаемостью (Z), которая позволяет с помощью эмпирических соотношений оценить сумму осадков в единице объема или их интенсивность. Таким образом, важнейшим применением метеорологических локаторов является мгновенное определение, интенсивности осадков на уровне земной поверхности в практически непрерывном режиме, а также получение карт сумм осадков за период по большим территориям.

Некоторые научно-исследовательские радиолокаторы измеряют отражаемость для двух поляризаций переданного и принятого сигналов. В ходе научных исследований продолжается выяснение полезности и возможности использования поляризационных систем для измерения осадков и определения фазового состояния метеорологических целей, но оперативных систем в настоящее время не существует.

Доплеровские радиолокаторы позволяют определять разность фаз между переданным и принятым импульсом. Эта разность является мерой средней доплеровской скорости частиц - отражаемости, средневзвешенной по радиальным компонентам скоростей перемещения гидрометеоров в импульсном объеме. Ширина доплеровского спектра является мерой пространственной изменчивости скоростей и приблизительно оценивает сдвиг ветра и турбулентность. Доплеровские радиолокаторы открывают новые возможности в области

ТАБЛИЦА 9.1 Радиолокационные частотные диапазоны

Радиолокационный диапазон	*Частота*	*Длина волны*	*Номинальная длина волны*
UHF	300–1 000 МГц	1–0,3 м	70 см
L	1 000–2 000 МГц	0,3–0,15 м	20 см
S[a]	2 000–4 000 МГц	15–7,5 см	10 см
C[a]	4 000–8 000 МГц	7,5–3,75 см	5 см
X[a]	8 000–12 500 МГц	3,75–2,4 см	3 см
K_u	12,5–18 ГГц	2,4–1,66 см	1,50 см
K	18–26,5 ГГц	1,66–1,13 см	1,25 см
K_a	26,5–40 ГГц	1,13–0,75 см	0,86 см
W	94 ГГц	0,30 см	0,30 см

[a] Самые распространенные диапазоны метеорологических радиолокаторов.

метеорологических радиолокационных наблюдений, и большинство современных систем имеют такую функциональную возможность.

Современные метеорологические радиолокаторы должны иметь характеристики, ориентированные для получения репрезентативных данных, удовлетворяющих оперативным потребностям, а также должны адекватным образом устанавливаться, эксплуатироваться и обслуживаться для использования в интересах метеорологов.

9.1.2 ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДИОЛОКАТОРОВ, ТЕРМИНЫ И ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ

Выбор характеристик радиолокаторов, а также учет климата и вида применения важны для определения точности измерений, приемлемой для оценки осадков (таблицы 9.1, 9.2 и 9.3).

9.1.3 ПРИМЕНЕНИЕ В МЕТЕОРОЛОГИИ

Радиолокационные наблюдения находят широкое применение для следующего:

(a) обнаружения, слежения и предупреждения об опасных явлениях погоды;

(b) слежения за метеорологическими системами синоптического мезомасштаба;

ТАБЛИЦА 9.2. Некоторые параметры используемые метеорологическими радиолокаторами и единицы измерения

Символ	*Параметр*	*Единица измерения*
Z_e	Эквивалентная или эффективная радиолокационная отражаемость	мм^6/м^3 или дБZ
V_r	Средняя радиальная скорость	м/с
v	Ширина спектра	м/с
Z_{dr}	Дифференциальная отражаемость	дБ
CDR	Коэффициент круговой деполяризации	дБ
LDR	Коэффициент линейной деполяризации	дБ
k_{dp}	Фаза прохождения	град/км
ρ	Коэффициент корреляции	

ТАБЛИЦА 9.3. Физические радиолокационные параметры и единицы измерения

Символ	*Параметр*	*Единица измерения*
c	Скорость света	м/с
f	Излучаемая частота	Гц
fd	Доплеровский сдвиг частоты	Гц
P_r	Принимаемая мощность	мВт или дБм
P_t	Излучаемая мощность	кВт
ЧПИ	Частота повторения импульсов	Гц
T	Период повторения импульсов (=1/ЧПИ)	мс
Ω	Скорость вращения антенны	град/с или об/мин
λ	Длина излучаемой волны	см
ϕ	Азимутальный угол	град
θ	Ширина диаграммы направленности на уровне половины мощности	град
τ	Длительность импульса	мкс
γ	Угол места	град

(c) оценки мгновенной интенсивности и сумм осадков.

Радиолокационные характеристики любого автономного радиолокатора не могут быть идеальными для всех видов наблюдений. Критерии выбора радиолокационной системы обычно оптимизируются для использования в нескольких областях, но могут также выделяться и специальные, наилучшим образом соответствующие конкретному, наиболее важному применению. Выбор длины волны, ширины луча, длительности импульса и частоты повторения импульсов (ЧПИ) определяются поставленными целями. Поэтому перед определением конфигурации радиолокатора пользователям следует уделить особое внимание виду применения и климатическим условиям.

Обнаружение и предупреждение об опасных явлениях погоды

Радиолокатор – единственное существующие наземное средство мониторинга опасных явлений погоды на обширной территории. Интенсивность эхосигнала, его площадь и характерные особенности могут быть использованы для определения зон с опасными явлениями погоды, включая грозы с возможным выпадением града и ветрами разрушительной силы. Доплеровские радиолокаторы, которые могут определять и измерять параметры сильного ветра, связанные с фронтами, порывы ветров, нисходящие микровихри и торнадо, открывают новые возможности. Номинальная дальность охвата составляет около 200 км, что является достаточным для местного краткосрочного прогноза и выдачи предупреждений. Для расширения зоны охвата используются сети радиолокаторов (Browning and others, 1982). Радиолокационные предупреждения требуют эффективной интерпретации, выполненной знающим и хорошо подготовленным персоналом.

Слежение за метеорологическими системами синоптического масштаба и мезомасштаба

Радиолокаторы могут обеспечить практически непрерывный мониторинг погоды, связанной со штормовыми возмущениями синоптического масштаба и мезомасштаба, на большой территории (например, при радиусе 220 км площадь обзора составляет 125 000 км^2), на равнинной местности. Из-за отражений от наземных предметов на малой дальности, а также из-за кривизны Земли максимальная практическая дальность метеорологических наблюдений составляет около 200 км. На больших водных пространствах другие средства наблюдений часто или отсутствуют, или не реализуемы. С помощью сети радиолокаторов можно расширить зону контролируемой территории при той же экономической эффективности. Радиолокаторы обеспечивают достоверное обнаружение зон осадков. Более узкие лучи обеспечивают лучшее разрешение измеряемых характеристик и эффективность на большей дальности действия. В регионах, где часто наблюдаются обильные и обширные по площади выпадения осадки, для корректного измерения осадков требуется длина волны радиолокатора 10 см. В других районах, таких как средние широты, радиолокаторы с длиной волны 5 см могут быть весьма эффективными при гораздо меньших затратах. Волны длиной 3 см слишком сильно ослабляются в осадках и мало эффективны, за исключением ситуаций с очень слабым дождем или снегом. Начата деятельность по разработке концепции создания сетей близкорасположенных радиолокаторов с длиной волны 3 см с поляриметрическими возможностями, которые могут решить проблему ослабления, характерную для автономных радиолокаторов с длиной волны 3 см.

Оценка интенсивности осадков

Длительное время радиолокаторы используются для оценки интенсивности осадков и, количества выпадающих осадков, осуществляемой с высоким пространственно-временным разрешением. Большая часть исследований касается жидких осадков, но при соответствующих допущениях о состоянии метеоцели можно также производить измерения количества выпавшего снега. Читателям следует ознакомиться с обзорами, подготовленными Joss and Waldvogel (1990) и Smith (1990), где содержится всеобъемлющее описание состояния вопроса, методик, проблем и трудностей, а также эффективности и точности измерения твердых осадков.

Оценки осадков на уровне земной поверхности, получаемые с помощью типичных радиолокационных систем, осуществляются обычно на площади 2 км^2 за последовательные 5 – 10-минутные интервалы с помощью индикатора кругового обзора при малом угле возвышения и ширине луча 1°. Было получено, что радиолокационные оценки интенсивности осадков сравнимы с локальными измерениями по осадкомеру с коэффициентом в пределах 2. Измерения с данными осадкомера и радиолокационных измерений оценивают непрерывно изменяющийся параметр. Осадкомер отбирает пробы на исключительно небольшой площади (100 см^2, 200 см^2), в то время как радиолокатор определяет среднее значение по объему в гораздо более крупном масштабе. Сопоставимость может быть повышена путем корректировки радиолокационных оценок осадкомерными измерениями.

9.1.4 МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОДУКЦИЯ

Радиолокатор может быть использован в целях обеспечения потребителя разнообразной метеорологической продукцией в зависимости от области применения. Продукция, которую можно получить с помощью метеорологического радиолокатора, зависит от его типа, характеристик обработки сигнала и используемой системы контроля и анализа. Большинство современных радиолокаторов автоматически выполняют сканирование по объему, состоящее из ряда полных вращений антенны по азимуту при нескольких углах места. Все необработанные данные, представленные в полярных координатах, хранятся в трехмерном массиве, обычно называемом объемным файлом обзора, который служит источником данных при дальнейшей обработке и архивации. С помощью средств прикладного программного обеспечения создается и выводится в качестве изображения на цветной монитор высокого разрешения разнообразная метеорологическая продукция. Значения, представленные в виде линий или элементов изображения, а также их преобразование в прямоугольную систему координат рассчитываются с помощью методик трехмерной интерполяции. Для типичного доплеровского метеорологического радиолокатора отображаемыми переменными являются отражаемость, интенсивность выпадения осадков, радиальная скорость и ширина спектра. Каждый элемент изображения представляет собой закодированное в цвете значение выбранной переменной.

Ниже следует перечень измерений и создаваемой продукции, большая часть которых описывается в данной главе:

(a) индикатор кругового обзора: отображение значений радиометеорологических величин, полученных за один полный оборот антенны при заданном угле места, в полярной системе координат. Это классический радиолокационный продукт, используемый прежде всего для наблюдения за погодой (термин PPI);

(b) индикатор «дальность-высота»: отображение значений радиометеорологических величин, полученных за один просмотр по высоте, обычно в диапазоне 0 – 90° при заданном азимуте. Это также классический радиолокационный индикатор, который показывает подробные эффективные площади структур и используется для распознавания сильных штормов, града и полос засветки от зон кристаллизации (термин RHI);

(c) индикатор кругового обзора постоянной высоты (ИКОПВ) (термин CFPPI) – отображение значений радиометеорологических величин, по горизонтальной эффективной площади на заданной высоте, полученное с помощью интерполяции объемных данных. Он используется для распознавания и слежения за сильными штормами и их распознавания. Индикатор также полезен и для мониторинга погоды на заданных эшелонах полета при обеспечении воздушного движения. Области «без данных», как видно по ИКОПВ, (вблизи и вдали от радиолокатора с привязкой к выбранной высоте) заполняются данными, полученными при изменении угла возвышения до максимума и минимума, в другой форме ИКОПВ, которая называется «псевдо ИКОПВ»;

(d) вертикальный разрез: отображение значений метеорологических величин вдоль заданной потребителем линии сечения (не обязательно проходящей через точку установки радиолокатора). Оно получается в результате интерполяции объемных данных;

(e) максимум в вертикальном направлении: отображенные на горизонтальной плоскости максимальные значения метеорологических величин над каждой точкой наблюдаемой территории;

(f) высоты эхосигнала – отображение в горизонтальной плоскости значения самого высокого, поддающегося определению контура отражаемости, полученное в результате поиска в базе объемных данных. Этот индикатор указывает на опасные явления погоды и град;

(g) интегральное содержание жидкокапельной влаги в вертикальном сечении (термин VIL): показатель интенсивности сильных штормов, может быть отображен в горизонтальной плоскости для любого указанного слоя атмосферы.

В дополнение к этим стандартным или базовым, отображениям может быть выработана другая продукция, призванная удовлетворить особые требования потребителей для целей, например, гидрологии, прогнозирования текущей погоды (см. раздел 9.10) или авиации:

(a) накопленная сумма осадков: Оценка Σосадков, накопленных за период времени в каждой точке наблюдаемой территории;

(b) общее количество осадков над водосбором: Количество накопленных осадков, проинтегрированное по территории;

(c) индикатор «скорость-азимут» (ИСА): оценка вертикального профиля ветра над радиолокатором. Профиль рассчитывается по данным, полученным за один оборот антенны при фиксированном угле места;

(d) объемная обработка данных о скорости, при которой используется трехмерный массив данных;

(e) траектория шторма: Продукция, полученная с помощью сложного программного обеспечения для определения траекторий ячеек шторма и прогноза будущих местоположений зон опасных явлений погоды;

(f) сдвиг ветра: Оценка радиального и тангенциального сдвига ветра на высоте, заданной пользователем;

(g) профиль дивергенции: оценка дивергенции по данным о радиальной скорости, на основе которых получен профиль дивергенции с учетом некоторых допущений;

(h) мезоциклон: продукт сложного программного обеспечения для распознавания ситуаций, с помощью которого определяются признаки вращения в рамках трехмерных данных о базовой скорости в масштабе порождающей мезоциклонической циркуляции, которая часто связана с торнадо;

(i) признак торнадообразующего вихря: продукт сложного программного обеспечения для распознавания ситуаций, с помощью которого определяются признаки сдвига «gate-to-gate» в рамках трехмерных данных о базовой скорости в масштабе циркуляций торнадообразующего вихря.

9.1.5 ТРЕБОВАНИЯ К ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ РАДИОЛОКАТОРОВ

Требования к точности измерений зависят от наиболее важных применений радиолокационных наблюдений. Современные радиолокаторы, установленные должным образом, калиброванные и регулярно обслуживаемые, являются относительно стабильными и не имеют значительных погрешностей измерения. Такие внешние факторы, как эффекты отражения от наземных предметов, аномальное распространение, эффекты ослабления и прохождения, влияние параметров луча, состав цели, особенно ее неоднородность по вертикали, а также неадекватность связи медуинтенсивностью дождя и отражаемостью», вносят самые большие погрешности в определение интенсивности осадков.

ТАБЛИЦА 9.4. Требования к точности

Параметр	*Определение*	*Допустимая точность* [a]
ϕ	Азимут	0,1
γ	Угол места	0,1
V_r	Средняя доплеровская скорость	1,0 м/с
Z	Отражаемость	1 дBZ
σ_v	Ширина доплеровского спектра	1 м/с

[a] Данные значения определены по отношению к нормальному гауссову спектру со стандартным отклонением менее 4 $м^{-1}$. Точность измерения скорости снижается при увеличении ширины спектра, а точность определения отражаемости повышается.

С учетом ошибок, относимых только на счет радиолокационной системы, измеряемые радиолокационные параметры можно определить с допустимой точностью (таблица 9.4).

9.2 ТЕХНОЛОГИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

9.2.1 Принципы радиолокационного измерения

Принципы радиолокационных наблюдений за явлениями погоды были установлены в 40-е годы. С тех пор сделаны огромные шаги в направлении улучшения оборудования, обработки сигналов и данных, а также их интерпретации. Для получения более подробной информации заинтересованному читателю следует ознакомиться с некоторыми другими соответствующими работами. Хорошими справочниками являются: Skolnik (1970) по аспектам, связанным с конструкцией и оборудованием; Battan (1981) по метеорологическим явлениям и применениям; Atlas (1964; 1990), Sauvageot (1982) и WMO (1985) - общий обзор; Rinehart (1991) по вопросам современных методов и Doviak and Zrnic (1993) по принципам и применениям доплеровских радиолокаторов. Краткое резюме этих принципов следует ниже.

Большинство метеорологических радиолокаторов являются импульсными. Электромагнитные волны на выбранных фиксированных частотах излучаются направленной антенной в атмосферу в виде высокочастотных импульсов большой мощности. На рисунке 9.1 показана направленная радиолокационная антенна, которая посылает импульсный луч электромагнитной энергии над искривленной земной поверхностью и облучающий часть метеорологической цели. Многие из физических ограничений, касающихся методик наблюдений, непосредственно очевидны из этого рисунка. Например, имеется ограничение по минимальной высоте, на которой могут проводиться наблюдения на больших расстояниях, связанное с кривизной земной поверхности.

Параболический отражатель антенной системы фокусирует электромагнитную энергию в виде

узконаправленного конусообразного луча,. Его линейная ширина увеличивается с расстоянием; например, номинальный луч с угловой шириной в 1° расходится на 0,9, 1,7 и 3,5 км на расстояниях 50, 100 и 200 км соответственно.

Высокочастотные импульсы электромагнитной энергии поглощаются и рассеиваются любыми встречающимися метеорологическими целями. Некоторая часть рассеянной энергии отражается обратно в направлении радиолокационной антенны и приемника. Поскольку электромагнитные волны распространяются со скоростью света (2,99·108 м/с) при помощи измерения интервала времени между излучением импульса и приемом отраженного сигнала, можно определить расстояние от радиолокатора до цели. Между последовательными импульсами приемник принимает любую отраженную волну. Отраженный от цели сигнал обычно называется эхосигналом.

Мощность сигнала, отраженного в направлении радиолокационного приемника, является функцией концентрации, размера и фазового состояния частиц облаков и осадков, которые представляют собой метеорологическую цель. Поэтому принимаемая мощность P_r обеспечивает измерение характеристик метеорологической цели и связана, но не однозначно, с интенсивностью осадков. «Уравнение радиолокационной дальности» связывает мощность отраженного от цели сигнала с характеристиками радиолокатора и параметрами цели.

Измерения мощности определяются общей мощностью обратного рассеяния целью в пределах объема, облученного в любой момент времени, – импульсного объема (т.е., облучаемого объема). Размеры

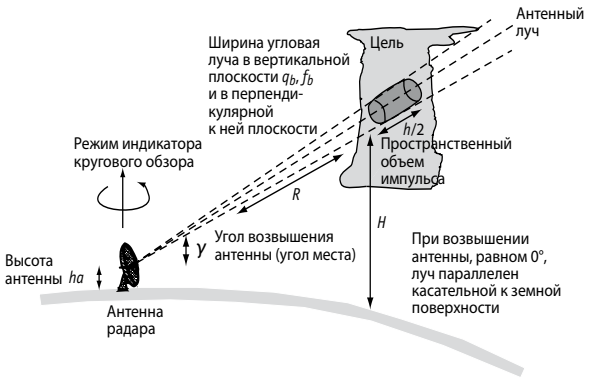


Рис. 9.1. Распространение электромагнитных волн от импульсного метеорологического радиолокатора; h_a – высота антенны над земной поверхностью, R – расстояние от локатора до цели h – пространственная протяженность импульса, $h/2$ – отсчетная объемная глубина импульса, H – высота импульса над земной поверхностью.

импульсного объема зависят от пространственной протяженности радиолокационного импульса (h), ширины диаграммы направленности в вертикальной (φ_b) и горизонтальной (θ_b) плоскостях. Ширина луча и соответственно импульсный объем возрастают с расстоянием. Поскольку энергия, которая возвращается к радиолокатору, проходит двойное расстояние, длина импульсного объема составляет только половину пространственной протяженности импульса ($h/2$) и не изменяется с расстоянием. Местоположения импульсного объема в пространстве определяется положением антенны по азимуту и углу места, а также дальностью цели. Дальность (r) определяется временем, которое требуется для прохождения импульса до цели и отражения обратно к радиолокатору.

Частицы в пределах импульсного объема непрерывно перемещаются относительно друг друга. Это проявляется в фазовых эффектах рассеянного сигнала и в интенсивности флуктуаций средней для цели интенсивности. Измерение интенсивности одного эхосигнала от метеорологической цели имеет небольшую значимость. Необходимо проинтегрировать по крайней мере 25 – 30 импульсов для получения приемлемой оценки средней интенсивности отраженного сигнала (Smith, 1995). Обычно это осуществляется электронным способом в схеме интегратора. Для увеличения облучаемого объема и повышения точности оценки часто проводится дальнейшее осреднение импульсов по дальности, азимуту и времени. Следовательно, пространственное разрешение становится более грубым.

9.2.2 Уравнение радиолокации для целей при наблюдении за осадками

Метеорологические цели представляют собой совокупность более или менее сферических частиц, свободно распределенных по объему и в пространстве и состоящих полностью изо льда и/или воды. Энергия обратного рассеяния объемом цели зависит от количества, размера, состава, относительного расположения, формы и ориентации рассеивающих частиц. Общая энергия обратного рассеяния представляет собой сумму значений энергии обратного рассеяния каждой из рассеивающих частиц.

Используя данную модель цели и теорию электромагнетизма, Probert-Jones (1962) вывел уравнение, связывающее мощность эхосигнала, полученного радиолокатором, с параметрами радиолокатора, расстоянием до целей и характеристиками рассеяния. Оно является общепринятым в метеорологической практике и обеспечивает количественный

расчет отражаемости с высокой точностью и учетом реальных допущений, и имеет вид:

$$\overline{P}_r = \frac{\pi^3}{1024 \ln 2} \frac{P_t h G^2 \theta_b \phi_b}{\lambda^2} \frac{|K|^2 10^{-18} Z}{r^2} \qquad (9.1)$$

где $\overline{P}_r$ – принятая радиолокатором мощность, осредненная по нескольких импульсам, в Ваттах; Pt - максимальная излучаемая импульсная мощность радиолокатора, в Ваттах; h – пространственная протяженность импульса ($h=c\tau/2$, где c – скорость света, τ – длительность импульса), в метрах; G – коэффициент направленного действия антенны по отношению к изотропному излучателю; θ_b и φ_b – ширина диаграммы направленности антенны соответственно в горизонтальной и вертикальной плоскостях на уровне –3 дБ при передаче в одном направлении, в радианах; λ – длина излучаемой волны, в метрах; $|K|^2$ – коэффициент преломления цели; r – наклонная дальность от радиолокатора до цели, в метрах; Z – радиолокационная отражаемость (обычно принимаемая равной отражаемости Z_e, когда характеристики цели достоверно не известны), в мм^6/м^3.

Второй член уравнения содержит параметры радиолокатора, а третий – параметры, зависящие от дальности и характеристик цели. Параметры радиолокатора, за исключением излучаемой мощности, являются относительно фиксированными, и если при работе передатчика поддерживается постоянная выходная мощность (как это и должно быть), то уравнение можно упростить:

$$\overline{P}_r = \frac{C|K|^2 Z}{r^2} \qquad (9.2)$$

где C – потенциал радиолокатора.

Имеется ряд основных допущений, неизбежных при выводе уравнения, значимость которых зависит от конкретного применения и интерпретации результатов. Несмотря на то, что они являются достаточно реалистичными, они не всегда соответствуют действительности, что при особых условиях влияет на результаты измерений (Aoyagi and Kodaira, 1995). Упомянутые допущения сводятся к следующим:

(a) частицы осадков, на которых происходит рассеяние в объеме цели, являются однородными диэлектрическими сферами, диаметры которых малы по сравнению с длиной волны $D < 0{,}06\ \lambda$, для строгого применения аппроксимаций рассеяния Рэлея;
(b) весь импульсный объем заполнен свободно распределенными частицами осадков;
(c) отражаемость Z является однородной по всему облучаемому импульсному объему и постоянной в течение интервала зондирования;
(d) все частицы являются каплями воды или ледяными кристаллами, таким образом они все имеют одинаковый коэффициент преломления $|K|^2$ и рассеяние энергии частицами изотропно;
(e) многократное рассеяние (между частицами) пренебрежимо мало;
(f) в среде между радиолокатором и объемом цели не происходит ослабления;
(g) падающая и отраженная волны линейно поляризованы;
(h) основной лепесток диаграммы направленности антенны имеет гауссову форму;
(i) антенна радиолокатора является параболическим отражателем кругового сечения;
(j) коэффициент направленного действия антенны радиолокатора известен либо может быть вычислен с достаточной точностью;
(k) вклад боковых лепестков диаграммы направленности антенны в принимаемую мощность пренебрежимо мал;
(l) блокирование излучаемого сигнала отражениями от наземных предметов на пути луча пренебрежимо мало;
(m) максимальная излучаемая мощность (P_t) является фактической мощностью, излучаемой антенной, т. е. все потери в волноводах и т. д., а также ослабление в обтекателе антенны учтены;
(n) средняя принимаемая мощность (P_r) осредняется по достаточному числу импульсов или независимых измерений для репрезентативности среднего по импульсному объему цели.

Это упрощенное выражение связывает мощность эхосигнала, измеренную радиолокатором, с радиолокационной отражаемостью Z, которая, в свою очередь, связана с интенсивностью осадков. Эти величины и их взаимосвязь являются ключевыми для интерпретации мощности объекта и оценки количества осадков по данным радиолокационных измерений. Несмотря на многие допущения, данное выражение обеспечивает приемлемую оценку массы объекта. Ее можно улучшить дополнительным учетом факторов, принятых в допущениях.

9.2.3 Типовой метеорологический радиолокатор

Основной метеорологический радиолокатор состоит из следующих элементов:

(a) передатчика для излучения радиоволн определенной мощности в микроволновом диапазоне;
(b) антенны для фокусировки излучаемых микроволн в узкий луч и приема отраженной мощности;

(c) приемника для обнаружения, усиления и преобразования микроволнового сигнала в низкочастотный сигнал;
(d) процессора для извлечения полезной информации из полученного сигнала;
(e) системы отображения информации в доступной форме.

Другими элементами, которые увеличивают возможности радиолокатора, являются:
(a) процессор для получения дополнительных отображений;
(b) система регистрации для архивации данных в целях их использования для обучения, исследования и систематизации.

Метеорологический радиолокатор может быть некогерентным, т. е. фаза последовательных импульсов является случайной и неизвестной.

Практически все современные системы используют компьютеры для управления радиолокатором, цифровой обработки сигнала, регистрации, отображения и архивации радиолокационной продукции.

Мощность обратного рассеяния типичных радиолокаторов имеет порядок от 10^{-8} до 10^{-15} Вт, охватывая диапазон около 70 дБ от самых сильных до самых слабых сигналов, которые можно обнаружить. Для адекватного охвата этого диапазона сигналов в прошлом использовался логарифмический приемник. Однако, современные оперативные и научно-исследовательские радиолокаторы с линейными приемниками, имеющими динамический диапазон 90 дБ (и другие усовершенствования), только еще внедряются (Heiss, McGrew and Sirmans, 1990; Keeler, Hwang and Loew, 1995). Для обеспечения достоверности измерения в процессоре должно быть осреднено множество импульсов, которые могут интегрироваться различными способами, обычно в цифровой форме, и должны обуславливать передаточную функцию ресивера (а именно, линейную или логарифмическую). На практике обычная система принимает поступивший в антенну сигнал, усиливает его, осредняет по многим импульсам, корректирует для передачи ресивера и по уравнению радиолокационной дальности преобразует в отражаемость Z.

Радиолокационная отражаемость является фундаментальным параметром для интерпретации радиолокационных данных. Она выводится из модели рассеяния Рэлея и теоретически определяется как сумма диаметров частиц (капель), возведенных в шестую степень, в облучаемом объеме:

$$Z = \sum_{vol} D^6 \qquad (9.3)$$

где единица измерения Z – мм^6/м^3. Во многих случаях, когда количество частиц, их состав и форма неизвестны, определяется эквивалентная, или эффективная, отражаемость Z_e. Частицы снега и льда должны описываться эквивалентной Z_e, которая равна Z, при допущении, что все частицы обратного рассеяния являются сферическими каплями.

В основном на практике пользуются единицами логарифмической шкалы или единицами дБZ, которые связаны соотношением: дБZ = 10 log10 Z_e

Пространственное исследование атмосферы обычно проводится при помощи сканирования антенной при фиксированном угле места с последующим его увеличением при каждом обороте. Важным аспектом является способность радиолокатора различать цели. Для фокусировки волн в луч конической формы используются антенны с параболическим отражателем. Чем шире отражатели, тем более узкие лучи они создают, имеют более высокое разрешение и чувствительность. Ширина диаграммы направленности антенны, т. е. угол стянутый дугой между двумя точками на луче, где мощность уменьшается в два раза по сравнению с мощностью на оси, зависит от длины волны и может быть аппроксимирована по формуле:

$$\theta_e = \frac{70\lambda}{d} \qquad (9.4)$$

Здесь единица измерения для θ_e – градусы; d – диаметр антенны, в тех же единицах, что и λ. Современные метеорологические радиолокаторы имеют ширину диаграммы направленности антенны 0,5 – 1°.

Полезная дальность действия метеорологических радиолокаторов, за исключением дальнего обнаружения гроз, имеет порядок 200 км. При этом луч с углом места, например, 0,5° на этом расстоянии достигает высоты 4 км над земной поверхностью. Ширина луча составляет порядка 1,5 км или больше. Для надежных измерений осадков дальность должна составлять менее 200 км. На больших расстояниях луч проходит слишком высоко, что исключает измерение осадков у поверхности земли. Кроме того с расширением луча ухудшается разрешение и на измерения может оказать влияние недостаточное заполнение импульсного объема. Формально существует максимальная однозначная дальность, определяемая частотой повторения импульсов (формула (9.6)), так как она измеряется в течение периода повторения импульсов. При стандартной ЧПИ это не является проблемой. Например, при ЧПИ, равной 250 импульсов в секунду, максимальная дальность составляет 600 км. При более

высоких ЧПИ, обычно 1000 импульсов в секунду, что требуется для доплеровских систем, дальность должна быть сильно снижена, примерно до 150 км. Новые достижения смогут улучшить данную ситуацию (Joe, Passarelli and Siggia, 1995).

9.2.4 Доплеровский радиолокатор

Разработка доплеровских метеорологических радиолокаторов и внедрение их в процесс слежения за погодой открывают новые возможности в области радиолокационных наблюдений (Heiss, McGrew and Sirmans, 1990). Доплеровский радиолокатор обеспечивает измерение скорости метеорологических целей вдоль радиальной линии, проведенной от радиолокатора в направлении либо к нему, либо от него. Дополнительное преимущество доплеровской методики заключается в большей чувствительности радиолокатора тесно связанной с собственными шумами к целям с низкой отражаемостью, при такой чувствительности можно различить поле скорости метеоцелей на фоне собственных шумов радиолокатора *Z*.

При обычных скоростях метеорологических целей сдвиг частоты является относительно малым по сравнению с частотой радиолокатора и его очень трудно измерить. Более простая задача заключается в том, чтобы запомнить фазу излученного импульса, сравнить ее с фазой принятого импульса и затем определить изменения фазы между последовательными импульсами. Затем интенсивность изменения фазы во времени непосредственно соотносится со сдвигом частоты, который, в свою очередь, прямо связан со скоростью цели – это и есть доплеровский эффект. Если фаза изменяется более чем на ±180°, оценка скорости становится неоднозначной. Самая высокая однозначная скорость, которая может быть измерена доплеровским радиолокатором, это скорость, с которой цель между последовательными импульсами перемещается на расстояние, большее, чем четверть длины волны. При более высоких скоростях, для получения истинного значения скорости, во время обработки сигналов потребуется дополнительная операция.

Максимальная однозначная доплеровская скорость зависит от длины волны радиолокатора (λ) и ЧПИ и может быть выражена следующим образом:

$$V_{max} = \pm \frac{PRF \quad \lambda}{4} \tag{9.5}$$

Максимальную однозначную дальность можно определить по выражению:

$$r_{max} = \frac{c}{PRF \quad 2} \tag{9.6}$$

Таким образом, V_{max} и r_{max} связаны уравнением:

$$V_{max} r_{max} = \pm \frac{\lambda c}{8} \tag{9.7}$$

Эти соотношения показывают ограничения, налагаемые выбором длины волны и ЧПИ. Для увеличения однозначной скорости желательна высокая ЧПИ; низкая ЧПИ желательна для увеличения дальности действия радиолокатора. До тех пор пока не будет доступна более совершенная технология получения однозначной информации вне этих ограничений, требуется компромисс (Doviak and Zrnic, 1993; Joe, Passarelli and Siggia, 1995). Это соотношение также показывает, что более длинные волны имеют более высокие пределы. В численном выражении для типичного радиолокатора S-диапазона с ЧПИ, равной 1 000 Гц, V_{max} = ±25 м/с, в то время как для радиолокатора X-диапазона V_{max} = ±8 м/с.

Поскольку сдвиг частоты принимаемого импульса измеряется с помощью сравнения фаз излученного и принятого импульсов, необходимо знать фазу излучаемых импульсов. В некогерентном радиолокаторе начальная фаза последовательных импульсов является случайной и неизвестной, так что такую систему нельзя применить для доплеровских измерений, однако можно использовать при основных операциях, описанных в предыдущем разделе.

Некоторые доплеровские радиолокаторы являются полностью когерентными; в их передатчиках используются очень стабильные источники частоты, в которых фаза определена и известна от импульса к импульсу. Полукогерентные радиолокационные системы, в которых фаза последовательных импульсов является случайной, но известной, дешевле и имеют большее распространение. В полностью когерентных радиолокаторах для выходных усилителей высокой мощности обычно используются клистроны, а частоты их приемников стабилизируются тем же источником, что и у передатчиков. Такой подход в значительной степени снижает фазовые нестабильности, обнаруживаемые в полукогерентных системах, что ведет к более полному устранению отражений от наземных предметов и лучшему распознаванию слабых атмосферных явлений в безоблачной атмосфере, которые могут быть незаметны в остальных случаях. Микроволновым передатчиком для некогерентного и полукогерентного радиолокаторов обычно служит магнетрон с учетом его относительной простоты и более низкой стоимости наряду с приемлимыми для регулярных наблюдений эксплуатационными характеристиками. Дополнительное преимущество магнетрона заключается в уменьшении

доплеровской чувствительности к второму и третьему эхосигналам (эхосигналы, поступающие на антенну радиолокатора с расстояний, превышающих максимальную однозначную дальность) из-за их случайных фаз, хотя такой же эффект можно получить и в когерентных системах с помощью ввода известных псевдослучайных нарушений фазы в приемник и передатчик.

Некогерентные радиолокаторы можно относительно легко преобразовать в полукогерентные доплеровские системы. Преобразование должно также включать установку более стабильного магнетрона коаксиального типа.

С помощью доплеровской радиолокационной системы получают данные как об отражаемости, так и о скорости. Цель обычно состоит из большого числа гидрометеоров (капли дождя, снежные хлопья, ледяные крупинки, град и т. д.) всевозможных форм и размеров, движущихся с различными скоростями вследствие их беспорядочного движения внутри объема и из-за их разных скоростей падения. Поэтому поле скорости представляет собой спектр скоростей, т. е. доплеровский спектр (рисунок 9.2).

Для обработки доплеровских параметров используются две системы различной сложности. В более простой системе обработки пары импульсов (ОПИ) происходит сравнение последовательных импульсов во времени для получения средней скорости и ширины спектра. Во второй, более сложной системе, используется процессор, реализующий быстрое преобразование Фурье (БПФ) для получения полного спектра скоростей в каждом облучаемом объеме. Система ОПИ работает быстрее, в ней производится меньше вычислительных операций, она более надежна при низких соотношениях сигнал-шум, но ее характеристики, касающиеся устранения помех, хуже, чем у систем БПФ. В современных системах предпринимаются попытки использовать наилучший из двух подходов устраняя помехи с использованием методов БПФ и дополнительно используя ОПИ для определения радиальной скорости и ширины спектра.

9.2.5 Радиолокаторы с поляризационным эффектом

Эксперименты с радиолокаторами с поляризационным эффектом продолжаются уже многие годы в целях определения их потенциала для расширения радиолокационных наблюдений за погодой (Bringi and Hendry, 1990). Полученные результаты указывают на возможность установления различий между типами гидрометеоров, что является шагом в направлении распознавания дождя, снега и града. Но здесь существуют практические технические трудности, и методики применения еще не перешли из стадии научных исследований в оперативное использование. Потенциальное значение измерений с поляризационным эффектом для определения осадков, вероятно, может лежать в основе того, что более точное распределение капель по размерам и знание о форме осадков улучшит измерения.

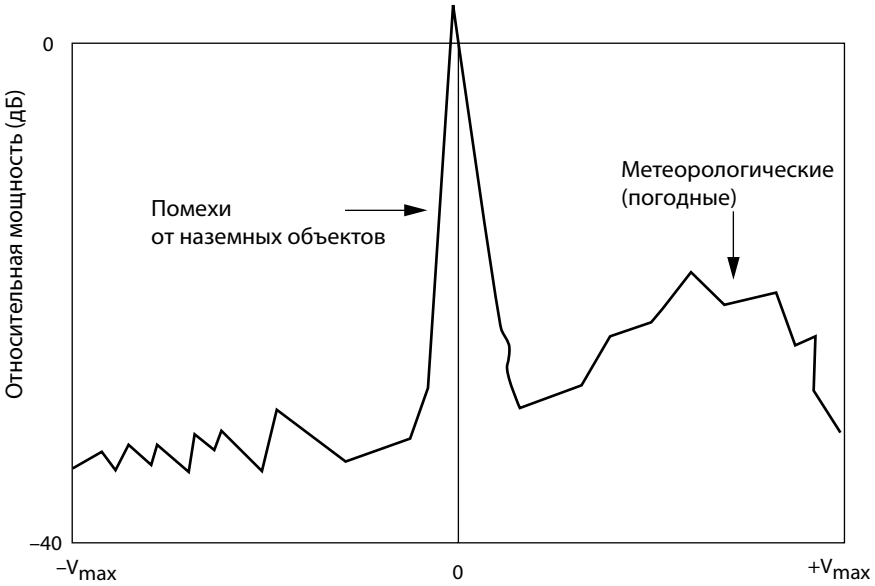


Рис. 9.2. Допплеровский спектр отражения от метеорологического объекта и от наземной цели. Вклад от наземной цели сосредоточен на нуле и намного уже по сравнению с отражением от метеообъекта.

Работа, проведенная недавно в лаборатории США по сильным штормам (Melnikov and others, 2002) по добавлению поляризационного эффекта для радиолокатора NEXRAD продемонстрировала устойчивую к ошибкам инженерную разработку с использованием одновременной передачи и приема как горизонтально, так и вертикально поляризованных импульсов. Оценка поляриметрических моментов и полученной продукции в целях классифицирования аккумуляции жидких осадков и гидрометеоров показала, что разработка является многообещающей в качестве основы для добавления поляризационного эффекта на всей сети NEXRAD.

В настоящее время используются две основные радиолокационные системы. Одна система излучает волну с круговой поляризацией, и при этом измеряются кополярная и ортогональная поляризации. Другая система излучает попеременно импульсы с горизонтальной, затем с вертикальной поляризацией, используя при этом переключатель большой мощности. Линейная система как правило предпочтительнее, поскольку получение метеорологической информации требует меньше вычислений. Последняя система является более распространенной, поскольку обычные радиолокаторы могут быть преобразованы в локаторы с возможностями поляризации. Однако первый тип систем имеет несколько заметных технологических преимуществ. Системы с различными поляризационными базами (Holt, Chandra and Wood, 1995) и системы с двойным передатчиком (Mueller and others, 1995) находятся на стадии экспериментального использования. Основные различия применяемых радиолокаторов связаны с качеством антенной системы, точности электронной калибровки и обработке принимаемого сигнала. Согласование лучей, переключение поляризаций и измерение малых значений сигналов являются основными задачами, требующими большого внимания при обработке методик испытания.

Методика основана на микроразличиях рассеивающих частиц. При свободном падении в атмосфере сферические капли дождя приобретают эллиптическую форму с большой осью в горизонтальной плоскости. Сплюснутость капли связана с ее размером. Мощность обратного рассеяния сплюснутого сфероида больше для горизонтально поляризованной волны, чем для вертикально поляризованной, при условии рэлеевского рассеяния. Используя соответствующие допущения, можно сделать заключение о распределении капель по размерам и, таким образом, определить интенсивность выпадения дождя.

Дифференциальная отражаемость, обозначаемая Z_{DR}, определяется как десятикратный логарифм соотношения отражаемости при горизонтальной поляризации Z_H и при вертикальной Z_V. Сравнение эквивалентной Z_e и дифференциальной Z_{DR} отражаемости дает возможность различить, из чего состоит цель: из града, дождя, мороси или снега (Seliga and Bringi, 1976).

Поскольку электромагнитная волна проходит через среду со сплюснутыми частицами, фаза падающего луча изменяется. Влияние на вертикальную и горизонтальную компоненту фазы учтено в параметре, который называется специальной дифференциальной фазой (K_{DP}). Для измерений сильного дождя K_{DP} имеет определенные преимущества (Zrnic and Ryzhkov, 1995). English and others (1991) продемонстрировали, что для оценки жидких осадков гораздо лучше использовать K_{DP}, чем Z, при интенсивности осадков выше 20 мм/ч, измеренной в S-диапазоне.

Влияние условий распространения на падающий луч при прохождении его через среду может доминировать над влиянием обратного рассеяния целью, и исказить интерпретацию результирующего сигнала. Bebbington (1992) ввел для радиолокатора с круговой поляризацией параметр, названный степенью поляризации, который является нечувствительным к влиянию условий распространения. Данный параметр аналогичен линейной корреляции для радиолокаторов с линейной поляризацией. Он оказывается полезным в процессе распознавания цели. Например, его экстремально низкие значения указывают на наличие случайно ориентированных рассеивающих частиц, которые возникают в случае помех, вызванных самолетами или отражениями от наземных предметов (Holt and others, 1993).

9.2.6 Исключение отражений от наземных предметов

Эхосигналы от целей, не являющихся осадками, известны как помехи и должны быть устранены. Эхосигналы от ясного неба или от насекомых, которые можно использовать для построения полей ветра, являются исключением. Помехи могут появиться от разнообразных целей, включая здания, холмы, горы, самолеты, и дипольные отражатели - это лишь некоторые из них. Хорошее размещение радиолокатора является первым условием борьбы против влияния отражений от наземных предметов. Однако помехи в некоторых секторах всегда присутствуют. Интенсивность отражений от наземных предметов обратно пропорциональна длине волны (Skolnik, 1970), в то время как обратное рассеяние от дождя обратно пропорционально четвертной степени длины волны. Поэтому более коротковолновые радиолокаторы меньше подвержены влиянию отражений от наземных предметов.

Точечные цели, такие как воздушные суда, можно исключить, если они являются изолированными, путем удаления эхосигналов, которые занимают единичный элемент разрешения радиолокатора. Метеорологические цели занимают несколько элементов разрешения радиолокатора. Точечные цели могут быть устранены на этапе обработки данных. Точечные цели, такие как эхосигналы от воздушного судна, совмещенные с эхосигналами от осадков, не всегда можно исключить с помощью данной методики.

Распределенные цели требуют более сложных методик обработки сигнала и данных. Концептуально привлекательная идея заключается в использовании карт отражений от местных предметов. Для построения такой карты используются изображения эхосигналов при отсутствии осадков, которые в дальнейшем вычитаются из радиолокационного изображения, полученного в условиях осадков. Проблема данной методики заключается в том, что очертания наземных помех изменяются во времени. Эти изменения прежде всего связаны со сменой метеорологических условий ли времени года; самым простым примером является аномальное прохождение эхосигналов, которое длится несколько часов и затем исчезает. Микроизменения в окружающей среде вызывают небольшие флуктуации очертаний эхосигналов от наземных предметов, что вносит путаницу при использовании карт помех. В адаптивных методиках (Joss and Lee, 1993) предпринята попытка динамически определить контуры помех для учета краткосрочных флуктуаций, но для повсеместного использования они не достаточно исследованы.

В методике доплеровской обработки предпринимается попытка устранить помехи из метеорологического эхосигнала в процессе его обработки. Основные допущения состоят в том, что эхосигнал вследствие мешающих отражений, имеет малую спектральную ширину и что помехи являются постоянными. Однако для удовлетворения первого условия необходимо принять и обработать значительное число импульсов, чтобы достичь спектрального разрешения, достаточного для различения эхосигналов от метеорологического объекта и эхосигналов вследствие мешающих отражений. Выделение метеорологического эхосигнала возможно только при относительно большом интервале Найквиста. Спектральная ширина отражений от наземных предметов и эхосигналов от метеорологического объекта, как правило, гораздо меньше 1 – 2 м/с и больше 1^{-2} м/с соответственно. Поэтому необходимы интервалы Найквиста примерно 8 м/с. Помеха обычно является стационарной и выделяется на спектре как узкий пик на нулевой скорости (см. рисунок 9.2). пик имеет ограниченную ширину, поскольку эхосигнал от наземных целей, таких как раскачивающиеся деревья, несет в себе некоторые соответствующие характеристики движения. Временная фильтрация, для исключения компонента с нулевой скоростью (или постоянной составляющей), из конечной последовательности является проблемой, поскольку процесс фильтрации также устранит и эхосигнал от метеорологического объекта (Zrnic and Hamidi, 1981). Применяемая спектральная обработка (преобразование Фурье) позволяет устранить отражения от наземных предметов из эхосигналов от метеорологического объекта, даже если они перекрываются (Passarelli and others, 1981; Crozier and others, 1991), что является основным преимуществом спектральной обработки. Устранив эхосигналы вследствие мешающих отражений, можно рассчитать метеорологические параметры в отсутствии помех.

В альтернативном подходе используется преимущество наблюдений, связанное с тем, что размеры объектов, вносящих вклад в отражения от наземных предметов, невелики (например, менее 100 м). Определение дальности проводится с очень высоким разрешением (менее 100 м), а помехи определяются при обработке отражаемости и доплеровского сигнала. Осреднение дальности (до конечного разрешения, равного 1 км) выполняется по элементам разрешения свободным от отражений местных предметов по дальности. Смысл такого приема заключается в обнаружении и игнорировании элементов разрешения по дальности, содержащих отражения от местных предметов, а не в корректировке этих помех (Joss and Lee, 1993; Lee, Della Bruna and Joss, 1995). В этом состоит коренное отличие от ранее описанных методик. Остается проверить, будет ли эта методика эффективной во всех ситуациях, в частности при аномальном распространении радиоволн, когда помехи являются повсеместными.

С помощью радиолокатора с поляризацией также можно выделить отражение от местных предметов. Однако для определения преимуществ и недостатков этого метода необходимо провести большую работу.

Помехи можно уменьшить путем тщательного выбора места размещения радиолокатора (см. раздел 9.7). Радиолокаторы, используемые для наблюдений на больших расстояниях, например для обнаружения тропических циклонов, или при широко размещенной сети наблюдений, обычно располагают на вершинах холмов, чтобы расширить их полезную дальность, и, вероятно, поэтому они способны отмечать много эхосигналов вследствие мешающих отражений. Простая методика подавления таких помех заключается в автоматическом сканировании при нескольких углах места и отбраковывании данных,

полученных на малой дальности при малых углах места, где содержится большая часть помех. При помощи переработки данных радиолокаторов в продукцию ИКОПВ, данные, полученные при малых углах места на малой дальности, выбраковываются автоматически.

9.3 РАСПРОСТРАНЕНИЕ И РАССЕЯНИЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ

В однородной среде электромагнитные волны распространяются по прямой со скоростью света. Земная атмосфера не является однородной, и микроволны на своем пути подвергаются преломлению, поглощению и рассеянию. Атмосфера обычно вертикально стратифицирована, и лучи изменяют направление в зависимости от изменений показателя преломления (или температуры и влажности) с высотой. Когда волны на своем пути встречают осадки или облака, то часть энергии поглощается, а часть рассеивается во всех направлениях, в том числе и обратно в направлении радиолокатора.

9.3.1 Преломление в атмосфере

Величину отклонения электромагнитных волн можно прогнозировать, используя вертикальные профили показателя преломления, рассчитанного по температуре и влажности (Bean and Dutton, 1966). В нормальных атмосферных условиях волны распространяются по кривой, слегка отклоняясь по направлению от земной поверхности. Траектория луча может отклоняться либо вверх (отрицательная рефракция), либо больше к земной поверхности (сверхрефракция). В обоих случаях высота луча будет содержать ошибку, если используется допущение о стандартной атмосфере.

С точки зрения измерения осадков самая большая проблема возникает в условиях сверхрефракции или «волноводного распространения». Луч может искривиться так, что достигнет земной поверхности, и возникающие при этом эхосигналы обычно не учитываются. Такое явление происходит, когда показатель преломления резко уменьшается с высотой, например при увеличении температуры и уменьшении влажности с высотой. Эти эхосигналы должны учитываться при построении например карты осадков. Явление сверхрефракции принято считать аномальным распространением (AP либо ANAPROD).

Некоторые эхосигналы от «ясного неба» возникают из-за турбулентных неоднородностей показателя преломления, встречаемых в зонах турбулентности, слоях усиленной нестабильности, ячейках сдвига ветра или глубоких инверсиях. Очертания этих эхосигналов по большей части распознаваемы, но не должны приниматься в качестве полей осадков (Gossard and Strauch, 1983).

9.3.2 Ослабление в атмосфере

Микроволны ослабляются вследствие их поглощения и рассеяния атмосферными газами, облаками и осадками.

Ослабление газами

Газы ослабляют микроволны в диапазонах 3 – 10 см. Поглощение атмосферными газами происходит главным образом за счет молекул водяного пара и кислорода. Ослабление водяным паром прямо пропорционально давлению и абсолютной влажности и почти линейно возрастает с понижением температуры. Концентрация кислорода до высоты 20 км является относительно однородной. Ослабление кислородом также пропорционально квадрату давления.

Ослабление газами незначительно изменяется в зависимости от климатических условий и времени года. Оно значительно для длин волн метеорологических радиолокаторов при больших дальностях и может составить от 2 – 3 дБ на длинных волнах и 3 – 4 дБ на коротких волнах на расстоянии 200 км. В таких случаях стоит вводить компенсацию, которую весьма легко можно выполнить автоматически. Ослабление может быть вычислено с учетом сезонов как функция дальности для траекторий луча, используемых при измерениях осадков, и применяться для корректировки поля осадков.

Ослабление гидрометеорами

Ослабление гидрометеорами может быть результатом как поглощения, так и рассеяния. Это самый значительный источник ослабления. Оно зависит от формы, размеров, количества и состава частиц. Преодолеть влияние такой зависимости, используя какой-либо количественный способ и только радиолокационные наблюдения, весьма трудно. На удовлетворительном уровне этого еще не достигнуто для автоматизированных систем оперативных измерений. Однако данное явление необходимо учитывать, а его влияние уменьшать путем некоторого субъективного вмешательства, применяя общие практические знания.

Ослабление зависит от длины волны. На длинах волн порядка 10 см ослабление достаточно мало, в то время как на длинах волн 3 см, оно становится весьма значительным. На длине волны 5 см ослабление может быть приемлемым для различных

климатических условий, в особенности в высоких и средних широтах. Для достоверных измерений интенсивности осадков не рекомендуются использовать длины волн менее 5 см, за исключением применений на малых дальностях (таблица 9.5).

ТАБЛИЦА 9.5. Соотношения для ослабления при прямолинейном распространении луча

Длина волны (см)	*Соотношение (дБ/км)*
10	0,000 343 $R^{0,97}$
5	0,00 18 $R^{1,05}$
3,2	0,01 $R^{1,21}$

По Burrows and Attwood (1949). Принятое ослабление при прямолинейном распространении луча при температуре 18 °C, R – в мм/ч.

В отношении оценок осадков с помощью радиолокатора можно высказать несколько общих соображений, связанных с величиной ослабления. Ослабление зависит от массы воды в цели, таким образом, более сильные дожди ослабляют сигнал больше; облака с гораздо меньшей массой ослабляют сигнал меньше. Ледяные кристаллы вносят значительно меньшее ослабление в сравнении с жидкими частицами. Облака вызывают небольшое ослабление и обычно его можно не принимать в расчет. Снежинки или ледяные кристаллы (либо градины) могут достигать гораздо большего размера, чем капли дождя. Они становятся влажными по мере таяния, в результате чего сильно увеличиваются их отражаемость и, следовательно, ослабляющие свойства. Это обстоятельство может исказить оценки осадков.

9.3.3 Рассеяние облаками и осадками

Мощность сигнала, обнаруживаемого и обрабатываемого радиолокатором (а именно, эхосигнала), является мощностью волны обратного рассеяния целью или гидрометеорами. Эффективная площадь обратного рассеяния (σ_b) определяется как площадь изотропного отражателя, который возвращает в направлении излучателя такое же количество энергии, что и фактическая цель. Эффективная площадь обратного рассеяния сферических частиц была впервые определена Mie (1908). Рэлей обнаружил, что если соотношение диаметра частицы к длине волны является равным или меньше 0,06, то для определения эффективной площади обратного рассеяния:

$$\sigma_b = \frac{\pi^5 |K|^2 D^6}{\lambda^4} \qquad (9.8)$$

которое является основой для уравнения (9.3). $|K|^2$ – коэффициент преломления, равный 0,93 для жидкой воды и 0,197 для льда.

Измерения мощности радиолокатора применяются для расчета интенсивности рассеяния целью с использованием уравнения (9.2) в форме

$$z = \frac{C\overline{P}_r r^2}{|K|^2} \qquad (9.9)$$

Метод и трудности приведения коэффициента преломления к величине интенсивности осадков (R) описываются в разделе 9.9.

9.3.4 Рассеяние в безоблачной атмосфере

В безоблачной атмосфере, было обнаружено, что эхосигналы обусловлены главным образом отражением от насекомых или большими градиентами показателя преломления в атмосфере. Эхосигналы имеют довольно низкую интенсивность и определяются только очень чувствительными радиолокаторами. Значения, эквивалентные Z_e, для явлений в безоблачной атмосфере как правило находятся в диапазоне от –5 до –55 дБZ, хотя они и не являются истинными параметрами Z; при этом физические процессы, порождающие эхосигналы, совершенно различны. Для измерения осадков такие эхосигналы являются незначительным «шумом». Обычно они могут быть связаны с некоторыми метеорологическими явлениями, такими как морской бриз или отток воздуха из зоны грозы. Эхосигналы в безоблачной атмосфере также могут быть связаны с очень малыми скоплениями птиц и насекомых. Не является редкой мощность эхосигналов от 5 до 35 дБZ, особенно в периоды миграций (таблица 9.6).

ТАБЛИЦА 9.6. Эффективные площади обратного рассеяния для различных объектов

Объект	σ_b *(m²)*
Воздушное судно	10 – 1 000
Человек	0,14 – 1,05
Шар-зонд	0,01
Птицы	0,001 – 0,01
Пчелы, стрекозы, мотыльки	$3 \times 10^{-6} – 10^{-5}$
Капли воды диаметром 2 мм	$1,8 \times 10^{-10}$

Хотя обычная радиолокационная обработка интерпретирует сигнал в значениях Z или R, рассеивающие свойства безоблачной атмосферы и гидрометеоров существенно различаются. Чаще всего это выражается в значениях структурного параметра показателя преломления, C_n^2. Это мера среднеквадратических

флуктуаций показателя преломления как функции расстояния (Gossard and Strauch, 1983).

9.4 ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ

9.4.1 Доплеровский спектр

Доплеровские радиолокаторы измеряют скорость гидрометеоров путем оценки сдвига частоты между излученным и отраженным сигналом, который возникает за счет наличия ансамбля движущихся целей. Доплеровские радиолокаторы также предоставляют информацию об общей отраженной мощности сигнала и о ширине спектра частиц осадков в пределах импульсного объема. Средняя доплеровская скорость равна средней скорости движения рассеивающих частиц, взвешенной по их эффективным площадям рассеяния, а для углов сканирования антенны близких к горизонтальным она близка к скорости движения воздуха в направлении к радиолокатору или от него. Более того, ширина спектра является мерой дисперсии скорости, т. е. сдвига или турбулентности в пределах разрешаемого объема.

Доплеровский радиолокатор измеряет фазу отраженного сигнала при помощи сопоставления фазы принятого сигнала с фазой излученного передатчиком. Фаза определяется в декартовой системе координат при помощи получения синфазной (I) и квадратурной (Q) составляющих сигнала. Составляющие I и Q измеряются при фиксированной дальности. Они накапливаются и обрабатываются для получения средней скорости и ширины спектра.

9.4.2 Доплеровские неоднозначности

Чтобы выделить сигналы на разных удалениях от радиолокатора, периодически, обычно примерно каждую микросекунду, производится выборка отраженных сигналов для получения информации приблизительно через каждые 150 м по дальности. Этот отбор продолжается до тех пор, пока не наступит время передачи следующего импульса. Элемент выборки во времени (соответствующий расстоянию от радиолокатора) называется селектором дальности. Радиальный компонент ветра по всей зоне шторма или осадков отображается по последовательным обзорам антенны.

Фундаментальная проблема использования любого импульсного доплеровского радиолокатора заключается в исключении неоднозначности в оценках доплеровской средней скорости, такой как наложение скоростей. Дискретные, равноотстоящие выборки изменяющейся во времени функции дают в результате максимальную однозначную частоту, равную половине частоты зондирования (f_s). Затем частоты, большие $f_s/2$, налагаются («вкладываются») на коинтервал Найквиста ($\pm f_s/2$) и интерпретируются как скорости в пределах $\pm\lambda f_s/4$, где λ – длина волны излученной энергии.

К методикам разделения скоростей относятся методика двойной ЧПИ (Crozier and others, 1991; Doviak and Zrnic, 1993) и методика непрерывности (Eilts and Smith, 1990). В первой из них оценки радиальной скорости определяются на двух различных ЧПИ с разными максимальными однозначными скоростями и объединяются для получения новой оценки радиальной скорости с расширенной однозначной скоростью. Например, радиолокатор С-диапазона, использующий ЧПИ, равные 1 200 и 900 Гц, имеет номинальные однозначные скорости 16 и 12 м/с соответственно. Величина наложения может быть вычтена из разницы между двумя оценками скорости для разделения скорости в расширенном диапазоне, равном ±48 м/с (рисунок 9.3).

Методика непрерывности основана на наличии эхосигнала, достаточного для обнаружения наложенных скоростей и их корректировки при допущении о непрерывности скорости (нет разрывов больше $2V_{max}$).

Имеются ограничения по дальности, налагаемые использованием высоких ЧПИ (около 1000 Гц и более), которые описаны в разделе 9.2. Эхосигналы с расстояний, превышающих максимальную дальность, будут совмещаться с сигналами первоначальной дальности. Для радиолокаторов с когерентными передатчиками (напр., клистронных систем) эхосигналы окажутся в пределах первоначальной дальности. Для систем, когерентных на приеме, вторичные эхосигналы будут проявляться как шум (Joe, and Passarelli and Siggia, 1995; Passarelli and others 1981).

9.4.3 Измерения при вертикальном сканировании

В принципе, доплеровский радиолокатор, работающий в режиме вертикального сканирования, является идеальным инструментом для получения точных измерений вертикальных скоростей ветра и распределений капель по размерам в масштабе облака (РКР). Однако точность вертикальных скоростей и РКР, полученных из доплеровских спектров, ограничена строгой математической взаимозависимостью этих двух количественных характеристик. Реальная трудность состоит в том, что доплеровский спектр измеряется как функция суммарной вертикальной скорости рассеивающих частиц - конечная скорость падения гидрометеоров плюс

скорость восходящих или нисходящих потоков. В целях вычисления РКР на основе доплеровского спектра, полученного при вертикальном падении, этот спектр должен быть выражен как функция только одной конечной скорости. Ошибки в вертикальной скорости всего лишь ±0,25 м/с могут вызвать ошибки до 100 % в значениях концентрации капель (Atlas, Scrivastava and Sekhon, 1973). Была разработана методика двойной длины волны (названная методом соотношений), с помощью которой вертикальная скорость движения воздуха может быть точно определена независимо от РКР. При данном подходе достигается компромисс между потенциальной точностью и возможностью успешного применения.

9.4.4 Измерение полей скорости

С одного доплеровского радиолокатора в режиме реального времени можно получить большое количество информации. Следует отметить, что интерпретация оценок радиальной скорости, полученных с автономного радиолокатора, не всегда является однозначной. Цветные отображения полей радиальной скорости, полученных с одного доплеровского радиолокатора, в режиме реального времени помогают в интерпретации полей отражаемости и могут выявить важные особенности, не являющиеся очевидными в отдельно взятых распределениях отражаемости (Burgess and Lemon, 1990). Такая возможность приобретает особую важность при идентификации и отслеживании сильных штормов. На обычных цветных дисплеях скорости между $\pm V_{max}$ отображаются одним из 8 – 15 цветов или более. Скорости, выходящие за пределы интервала Найквиста, вводятся в шкалу цветов с противоположного конца. Этот процесс может повторяться, если скорости накладываются больше чем на один интервал Найквиста.

Доплеровский радиолокатор может быть также использован для получения вертикальных профилей горизонтальных ветров. Когда луч антенны радиолокатора светит в горизонтальном направлении, увеличение расстояния влечет за собой рост высоты обнаруживаемого метеообъекта. Если ветер является относительно однородным над зоной сканирования, то его профиль по высоте может быть получен путем аппроксимации наблюдаемых данных синусоидальной кривой (отображаемой индикатором «скорость-азимут» (ИСА), по Lhermitte and Atlas, 1961). Ветры вдоль контура нулевой радиальной скорости являются перпендикулярными оси луча радиолокатора. Для простой интерпретации данных ИСА, полученных от крупномасштабных систем осадков, может быть использовано цветное отображение. На типичных изображениях, полученных путем конического сканирования в обложных осадках, обнаруживается контур нулевой радиальной скорости, имеющий форму S, поскольку средний

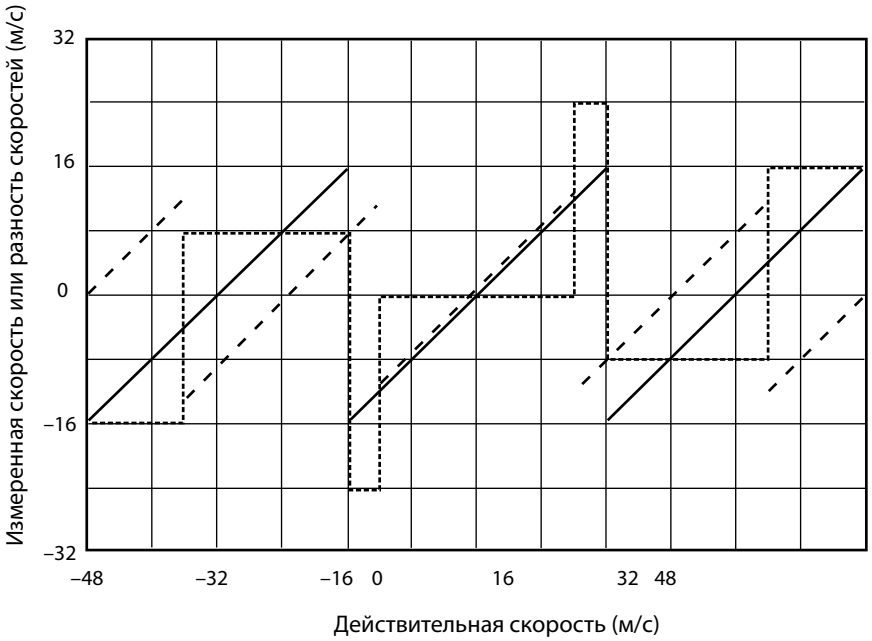


Рис. 9.3. Сплошные и пунктирные линии показывают результаты измерений скорости по допплеровскому смещению, полученные с помощью двух последовательностей импульсов на частотах 1 200 и 900 Гц для частотного радарного диапазона С. Скорости, большие, чем очевидные максимальные, рассматриваются как псевдоскорости. Разности (пунктирная линия) между оценками допплеровской скорости отличаются и могут быть использованы для идентификации степени псевдоскорости.

ветер изменяет направление с высотой (Wood and Brown, 1986). В других случаях можно увидеть замкнутые контуры, представляющие струйные течения.

Поскольку точность измерения является достаточной, применяя методику ИСА, можно также получить оценки дивергенции. Эту методику нельзя с достаточной точностью использовать в периоды выпадения конвективных осадков в окрестностях радиолокатора. Однако с помощью чувствительных доплеровских радиолокаторов средней мощности были успешно получены ИСА профилей ветра и оценки дивергенции в оптически прозрачном пограничном слое в течение всех за исключением наиболее холодных месяцев до высот 3 – 5 км над уровнем земной поверхности. Представляется, что методика ИСА хорошо подходит для измерения ветров в системах осадков, связанных с внетропическими и тропическими циклонами. При использовании радиолокатора в режиме «безоблачная атмосфера» временные ряды измерений дивергенции и вычисленной вертикальной скорости являются исключительно полезными при прогнозировании текущей вероятности мощной конвекции.

С середины 70-х годов проводятся эксперименты по измерению трехмерных полей ветра с использованием систем, состоящих из нескольких доплеровских радиолокаторов. Измерения, сделанные в произвольной точке внутри зоны осадков, могут быть объединены с помощью соответствующего геометрического преобразования в целях получения трех компонентов ветра. Такие оценки также возможны с помощью только двух радиолокаторов при использовании уравнения непрерывности. Кинематический анализ поля ветра описан в Browning and Wexler (1968).

9.5 ИСТОЧНИКИ ОШИБКИ

Заполнение радиолокационного луча

Во многих случаях, и в особенности на больших расстояниях от радиолокатора, импульсный объем не целиком заполняется однородными осадками. Часто интенсивности осадков сильно изменяются на небольшой площади, а на больших расстояниях от радиолокатора импульсный объем увеличивается. В то же время становятся значительными эффекты кривизны Земли. Как правило, измерения могут быть значимо полезными на расстояниях менее 100 км. Этот результат является важным для измерений высоты верхней границы облаков и оценки отражаемости.

Неоднородность вертикального распределения осадков

Первым параметром, представляющим интерес при радиолокационных измерениях, как правило, являются осадки на уровне земной поверхности. Из-за эффектов, связанных с шириной луча, его наклоном и кривизной Земли, радиолокационные измерения осадков осуществляются на некоторой высоте и являются осредненными по значительному слою. Эти измерения зависят от особенностей вертикального распределения осадков и могут внести свой вклад в большие ошибки оценок осадков у земной поверхности.

Вариации в соотношении Z-R

Для различных типов осадков были найдены разнообразные соотношения *Z-R*. Однако одним радиолокатором (исключение составляют радиолокаторы с двойной поляризацией) нельзя оценить изменения типов и распределения гидрометеоров по размерам. В оперативном режиме эти изменения могут быть основным источником ошибки.

Ослабление в осадках

Ослабление в экранирующих осадках в виде дождя может стать значительным, особенно на коротких длинах волн радиолокатора (5 и 3 см). Ослабление в снеге хотя и меньше, чем при дожде, но может стать существенным на больших расстояниях.

Затенение луча

В зависимости от места установки радиолокатора его луч может быть частично или полностью экранирован рельефом или препятствиями, располагающимися между радиолокатором и целью. В итоге это ведет к недооценкам отражаемости и соответственно к ошибкам в интенсивности выпадения дождя.

Ослабление за счет намокания ветрозащитного обтекателя антенны радиолокатора

Большинство радиолокационных антенн защищены от ветра и дождя ветрозащитным обтекателем, который обычно изготовляется из стеклопластика. Обтекатель спроектирован таким образом, чтобы вызывать минимальные потери излучаемой энергии. Например, благодаря такому устройству обтекателя потери при двойном прохождении сигнала могут довольно легко поддерживаться на уровне ниже 1 дБ в С-диапазоне при нормальных условиях наблюдений. Однако при обильном дожде поверхность обтекателя может покрыться тонкой пленкой воды или льда, вызывающей сильное,

зависящее от азимута, ослабление. Опыт использования радиолокаторов NEXRAD WSR-88D показывает, что покрытие антенного обтекателя особой гидрофобной краской в значительной степени устраняет этот источник ослабления, по крайней мере, на длинах волн порядка 10 см.

Электромагнитные помехи

В некоторых случаях электромагнитные помехи от других радиолокаторов или установок, таких как микроволновые линии, могут стать важным фактором ошибок. Проблема данного типа легко решается с помощью коррекции наблюдения. Ее можно разрешить путем изменения частоты, использования фильтров в приемнике радиолокатора и иногда с помощью программного обеспечения.

Отражения от наземных предметов

Искажение эхосигналов дождя отражениями от наземных предметов может повлечь очень большие ошибки в оценке интенсивности осадков и скорости ветра. Отражения от наземных предметов должны быть сведены к минимуму прежде всего за счет хорошей конструкции антенны и удачного выбора места установки радиолокатора. Их влияние можно в значительной степени уменьшить с помощью сочетания технических средств подавления помех (Aoyagi, 1983) и обработки сигналов. Отражения от наземных предметов существенно усиливаются в условиях аномального распространения радиоволн.

Аномальное распространение

Аномальное распространение радиоволн искажает траекторию радиолокационного луча и ведет к усилению отражений от наземных предметов за счет искривления луча по направлению к земной поверхности. Оно может также способствовать обнаружению радиолокатором штормов, находящихся гораздо дальше обычного радиуса действия, но с ошибками в определении их удаления из-за искажения дальности. В некоторых районах аномальное распространение является частым, когда в атмосфере происходит сильное уменьшение влажности и/или повышение температуры с высотой. Помехи, связанные с аномальным распространением, могут значительно запутать неопытных наблюдателей и их намного труднее полностью устранить в процессе обработки по сравнению с обычными помехами от наземных предметов.

Точность установки диаграммы направленности антенны

В хорошо сконструированной и откалиброванной системе ошибка горизонтирования антенны радиолокатора не превышает 0,2°. Ошибки могут также создаваться за счет увеличения ширины диаграммы направленности антенны или за счет присутствия в ней боковых лепестков при наличии помех или мощных эхосигналов от осадков.

Электронная стабильность

Современные электронные системы с течением времени претерпевают небольшие изменения. Их можно контролировать путем использования хорошо сконструированной системы мониторинга, которая поддерживает изменения в электронных приборах на уровне менее 1 дБ или включает предупреждающий сигнал при обнаружении ошибки.

Точность обработки

Обработка сигналов должна осуществляться для оптимизации технических возможностей системы в отношении зондирования. Вариации в оценке отражаемости, доплеровской скорости и ширины спектра необходимо свести к минимуму. Искажения дальности и скорости могут быть значительными источниками ошибок.

Уравнение радиолокационной дальности

При интерпретации измерений принимаемой мощности радиолокатора принимается много допущений относительно метеорологического параметра Z, определяемого с помощью уравнения радиолокационной дальности. Несоответствие допущениям может привести к ошибке интерпретации радиолокационных данных.

9.6 ОПТИМИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИОЛОКАТОРА

9.6.1 Выбор радиолокатора

Радиолокатор является высокоэффективной наблюдательной системой. Характеристики радиолокатора и климатические условия определяют эффективность любого конкретного применения. Ни один радиолокатор не может быть максимально эффективным для всех видов наблюдений. Можно опытным путем выбрать характеристики, которые будут наиболее приемлимыми в одном из видов наблюдений, например обнаружению торнадо. Чаще всего для основных применений принимаются компромиссные решения, удовлетворяющие нескольким требованиям пользователя. Многие из характеристик взаимосвязаны в отношении эффективности работы

радиолокатора, и поэтому необходима их оптимизация для планирования необходимой конфигурации. Финансовые затраты на реализацию необходимых конфигураций являются существенным обстоятельством.

Большинство взаимосвязей между финансовыми затратами и технической реализации можно проследить из уравнения радиолокации дальности. Ниже следует краткое перечисление некоторых важных факторов.

9.6.2 Длина волны

Чем больше длина волны, тем больше стоимость радиолокационной системы, в частности, антенна оценивается по ширине луча (т. е. доступному разрешению). Это связано с увеличением количеством расходного материала и с трудностью подгонки деталей при более крупных размерах. В пределах диапазонов метеорологических радиолокаторов, представляющих интерес (*S*, *C*, *X* и *K*), чувствительность радиолокатора или его способность обнаруживать цель, преимущественно зависит от длины волны. Она также тесно связана с размером антенны, коэффициентом усиления и шириной луча. Для одной и той же антенны вероятность обнаружения цели возрастает с уменьшением длины волны. При переходе от длины волны 5 см к длине 3 см чувствительность возрастает на 8,87 дБ в теории и 8,6 дБ на практике. Таким образом, более короткие волны обеспечивают лучшую чувствительность. В то же время меньшая ширина луча улучшает разрешение и повышает коэффициент усиления. Основной недостаток состоит в том, что более короткие волны намного сильнее ослабляются в атмосфере и зонах осадков.

9.6.3 Ослабление

Ослабление энергии радиоволн наиболее значительно в дожде, меньше – в снеге и на ледяных кристаллах и еще меньше – в облаках и атмосферных газах. В более широком смысле ослабление в S-диапазоне относительно меньше и, как правило, не такое значительное. Радиолокатор S-диапазона, несмотря на его стоимость, работает существенно лучше при сканировании целей с очень высокой отражаемостью в сильных штормах с градом в умеренных и субтропических широтах. Ослабление для радиолокаторов X-диапазона может быть сильным на небольших удалениях, и они не подходят для наблюдений и оценок интенсивности осадков, за исключением очень малых расстояний, в отсутствии экранирующих осадков. Ослабление радиоволн C-диапазона лежит между двумя вышеупомянутыми.

9.6.4 Излучаемая мощность

Вероятность обнаружения цели непосредственно связана с максимальной выходной мощностью радиолокационного импульса. Однако имеются практические ограничения для величины выходной мощности, которые диктуются технологией волноводов. Неограниченное увеличение мощности не является самым эффективным средством повышения вероятности обнаружения цели. Например, удвоение мощности повышает потенциал системы только на 3 дБ. Технически максимально возможная выходная мощность возрастает с увеличением длины волны. Повышение чувствительности приемника, коэффициента усиления антенны или выбор длины волны могут быть наиболее действенными средствами увеличения способности локатора обнаруживать цели.

Магнетроны и клистроны являются широко распространенными усилителями мощности. Магнетроны менее дорогие, но менее стабильны по частоте. В доплеровском режиме стабильность клистронов должна быть обязательной. В результате анализа Strauch (1981) пришел к заключению, что магнетроны могут быть весьма эффективными для общих метеорологических применений. Многие доплеровские радиолокаторы в настоящее время выполнены на магнетронах. В методиках исключения эхосигнала от наземных предметов и применениях, связанных с обнаружением целей в безоблачной атмосфере, можно предпочесть клистроны. С другой стороны, магнетронные системы упрощают исключение эффекта вторичного отражения.

При рабочих длинах волн типовые радиолокаторы должны над плоской землей обнаруживать осадки с интенсивностью выпадения порядка 0,1 мм/ч на расстоянии 200 км и иметь максимальную выходную мощность порядка 250 кВт или больше в C-диапазоне.

9.6.5 Длительность импульса

Длительность импульса определяет разрешающую способность радиолокатора по дальности. Разрешающая способность по дальности, или способность радиолокатора различать две отдельные цели, на разных расстояниях пропорциональна половине длины импульса в пространстве. Для большинства клистронов и магнетронов максимальное отношение ширины импульса к ЧПИ составляет около 0,001. Обычная длительность импульса имеет порядок от 0,3 до 4 мкс. Длительность импульса 2 мкс соответствует разрешающей способности 300 м, а импульс 0,5 мкс может соответствовать разрешению 75 м.

При допущении, что импульсный объем заполнен целью, удвоение длительности импульса повышает чувствительность радиолокатора на 6 дБ при использовании согласованной фильтрации, в то же время снижая разрешение; уменьшение длительности импульса снижает чувствительность, одновременно увеличивая разрешение. Импульсы с меньшей длительностью позволяют получить более независимые данные зондирования цели в пределах дальности действия и могут способствовать повышению точности оценки.

9.6.6 Частота повторения импульсов

Для получения максимального числа измерений цели в единицу времени ЧПИ должна быть настолько высокой, насколько это практически осуществимо. Исходным ограничением ЧПИ является нежелательный эффект вторичного отражения. Большинство традиционных радиолокаторов имеют однозначную дальность, превышающую полезную дальность метеорологических наблюдений, осуществляемых радиолокатором. Важным ограничением полезной дальности обнаружения метеорологической цели является значительная высота луча над земной поверхностью на дальности 250 км.

В доплеровских радиолокационных системах высокая ЧПИ используется для повышения предела однозначного измерения доплеровской скорости. Недостатки высокой ЧПИ отмечены выше.

Фактор ЧПИ не связан со значительными финансовыми расходами, но сильно влияет на эффективность работы системы. Вкратце, высокая ЧПИ желательна для увеличения количества измерений, повышения максимальной однозначно измеряемой скорости и получения возможно более высоких скоростей сканирования. Низкая ЧПИ желательна для увеличения максимальной однозначной измеряемой дальности и обеспечения оптимального режима работ.

9.6.7 Антенная система, ширина луча, скорость вращения и коэффициент усиления

Для получения сфокусированного узкого конического луча в метеорологических радиолокаторах обычно используется параболическая антенна с рупорным облучателем. Две важные характеристики – это ширина луча (угловое разрешение) и усиление по мощности. Для общепринятых метеорологических радиолокаторов размер антенны увеличивается с ростом длины волны и с уменьшением ширины необходимого луча.

Ширина луча метеорологических радиолокаторов обычно находится в пределах 0,5 – 2°. Для луча шириной 0,5 и 1° в С-диапазоне диаметр зеркала антенны составляет 7,1 и 3,6 м соответственно; в S-диапазоне – 14,3 и 7,2 м. С увеличением размеров зеркала антенны цена антенной системы и ее платформы резко возрастает. Существуют также технически реализуемый и стоимостной пределы. Кроме того, соответствующим образом должна быть выбрана опора, которая сможет выдержать вес антенны.

Требование обеспечения узкого луча для максимального разрешения и увеличения вероятности заполнения луча целью является особенно критичным с ростом дальности. Для луча в 0,5° азимутальная (и вертикальная) его ширина на дальности 50, 100 и 200 км составляет 0,4, 0,9 и 1,7 км соответственно. Для луча в 1° этот параметр соответственно равен 0,9, 1,7 и 3,5 км. Даже при таких относительно узких лучах их ширина на больших расстояниях существенно возрастает.

Коэффициент усиления антенны также обратно пропорционален ширине луча, и поэтому более узкие лучи повышают чувствительность системы при помощи этого коэффициента, равного дифференциальному коэффициенту усиления. Оценки отражаемости и осадков требуют установленного минимального количества зондирований цели для обеспечения приемлемой точности измерений. Следовательно, луч должен иметь достаточное время задержки на цели при эксплуатации в режиме кругового обзора. Таким образом, существуют пределы скорости вращения антенны. Уменьшение цикла сканирования будет иметь последствия. Для значимых измерений распределенных целей их частицам необходимо время, достаточное для смены положения перед проведением независимой оценки. В основном системы сканируют в диапазоне скорости вращения антенны примерно 3 – 6 об/мин.

Большинство метеорологических радиолокаторов являются линейно поляризованными, с горизонтально либо вертикально направленным вектором излучаемого электрического поля. На практике в основном используется горизонтальная поляризация. Причины предпочтения горизонтальной поляризации заключаются в следующем: (a) эхосигналы от поверхности моря и земли обычно меньше при горизонтальной поляризации; (b) меньшие размеры по горизонтали боковые лепестки диаграммы направленности обеспечивают более точные измерения по вертикали; (c) большее обратное рассеяние от дождя в связи с эллиптичностью падающих капель. Однако при малых углах места антенны лучшее отражение горизонтально поляризованных волн от плоских поверхностей на земле может привести к нежелательному эффекту, зависящему от дальности.

И наконец, малая ширина диаграммы направленности антенны луча (ДН) влияет на чувствительность системы, ее способность обнаруживать цели, горизонтальное и вертикальное разрешение, эффективную дальность действия и точность измерений. По этим причинам, как доказано (Crozier and others, 1991), наименьшая ширина луча ДН, определяемая техническими органичениями, в наибольшей степени повышает полезность радиолокатора.

9.6.8 Стандартные характеристики метеорологических радиолокаторов

Стандартные характеристики радиолокаторов, в основном используемых в метеорологической практике, содержатся в таблице 9.7.

ТАБЛИЦА 9.7. Технические характеристики обычных метеорологических радиолокаторов

Тип	*Только Z*	*Доплеровский*	*Только Z*	*Доплеровский*	*Микродоплеровский*
Диапазон	C	C	S	S	C
Частота (ГГц)	5,6	5,6	3,0	2,8	5,6
Длина волны (см)	5,33	5,33	10,0	10,7	5,4
Максимальная мощность (кВт)	250	250	500	1 000	250
Длительность импульса (с)	2,0	0,5, 2,0	0,25, 4,0	1,57, 4,5	1,1
ЧПИ (Гц)	250–300	250–1 200	200–800	300–1 400	235–2 000
Приемник	Log	Log/Lin	Log	Log/Lin	Log/Lin
МДС(дБм)	–105	–105	–110	–113	–106
Диаметр антенны (м)	3,7	6,2	3,7	8,6	7,6
Ширина луча (°) ДН	1,1	0,6	1,8	1,0	0,5
Коэффициент усиления антенны (дБ)	44	48	38,5	45	51
Поляризация	H	H	H	H	H
Скорость вращения (об/мин)	6	1–6	3	6	5

Как указывалось, характеристики и параметры радиолокаторов являются взаимосвязанными. Технические ограничения для элементов радиолокатора и доступность промышленно производимых элементов являются важными обстоятельствами при проектировании радиолокационных систем.

Радиолокаторы типа «только Z» являются традиционными некогерентными импульсными радиолокаторами, которые использовались десятилетиями и все еще остаются очень востребованными. Доплеровские радиолокаторы относятся к современному поколению радиолокаторов, которые открывают новые возможности применения. Они обеспечивают оценки радиальной скорости. «Микродоплеровские» радиолокаторы – радиолокаторы, разработанные для улучшения обнаружения мелкомасштабных микровихрей и торнадо по очень ограниченной территории, например для защиты аэропортов.

9.7 УСТАНОВКА РАДИОЛОКАТОРОВ

9.7.1 Оптимальный выбор места

Оптимальный выбор места установки метеорологического радиолокатора зависит от предполагаемого использования. Когда имеется определенная зона, по которой требуются штормовые предупреждения, то обычно самым лучшим компромиссом является расположение оборудования на расстоянии 20 – 50 км от интересующей зоны и, как правило, в направлении навстречу ветру в соответствии с основной траекторией движения штормов. Рекомендуется устанавливать радиолокатор несколько в стороне от основной траектории, с тем, чтобы избежать сложностей измерения при прохождении штормов над радиолокатором. Одновременно это приведет к получению высокого разрешения над интересующей зоной и созданию более заблаговременного предупреждения о надвигающихся штормах (Leone and others, 1989).

В случае если радиолокационная сеть созданная в средних широтах, предназначена прежде всего для синоптических применений, радиолокаторы следует располагать на расстоянии приблизительно 150 – 200 км друг от друга. Расстояние может быть увеличено на широтах, более близких к экватору, если радиолокационные эхосигналы, представляющие интерес, часто достигают больших высот. Во всех случаях радиолокаторы с узким лучом ДН будут давать лучшую точность для измерения осадков.

На выбор места установки радиолокатора влияют многие экономические и технические факторы, а именно:

(a) существование дорог для сообщения с радиолокатором;

(b) наличие электролиний и линий связи. Часто необходимо добавить серийно выпускаемые установки для защиты от молний;

(c) стоимость земли;

(d) близость средств контроля и обслуживания;

(e) необходимо исключить затенение луча препятствиями. Не должно быть никаких препятствий при угле места антенны над горизонтом, большем половины ширины луча ДН, либо препятствий с горизонтальными размерами больше половины ширины луча ДН;

(f) необходимо, насколько это возможно, избежать влияния отражений от наземных предметов. Для радиолокатора, который будет использоваться для работы на относительно малой дальности, после внимательного обследования места установки и изучения подробных топографических карт, иногда можно найти относительно плоскую территорию внутри небольшого понижения, края которого будут служить естественной защитой от помех для боковых лепестков диаграммы направленности антенны при минимуме блокирования основного луча. Во всех случаях обследование места установки должно включать фото- и оптико-теодолитную проверку на потенциальные препятствия. В определенных случаях полезно применить подвижную радиолокационную систему для подтверждения того, что данное место является подходящим, В некоторых современных радиолокационных системах имеется программное и аппаратное обеспечение, которое подавляет большую часть отражений от наземных предметов при минимальном отбраковывании эхосигналов от метеорологических объектов (Heiss, McGrew and Sirmans, 1990);

(g) когда радиолокатор используется в целях обнаружения метеообъектов на больших расстояниях, например за тропическими циклонами, , то его обычно устанавливают на вершине холма. В зону его видимости попадает значительное количество отраженных сигналов от местных наземных предметов, которые могут не иметь особой важности на большой дальности (см. раздел 9.2.6, посвященный подавлению помех);

(h) ветротурбинные электростанции, расположенные в близости к метеорологическим радиолокаторам, могут негативно воздействовать на эффективность радиолокатора различными способами. Всвязи с этим радиолокаторы не должны располагаться вблизи ветровых электростанций. Более подробно описание этой проблемы и руководящие принципы, призванные помочь в минимизации влияния ветровых турбин на метеорологические радиолокаторы, содержатся в приложении 9.A.

(k) каждое обследование потенциальных мест установки должно включать тщательную проверку на наличие электромагнитных помех в целях максимально возможного исключения взаимного влияния с другими системами связи, такими как телевидение, микроволновые линии, или другие радиолокаторы. Следует также убедиться, что микроволновое излучение радиолокатора не представляет угрозы для здоровья населения, живущего вблизи предполагаемого места его установки (Skolnik, 1970; Leone and others, 1989).

9.7.2 Телесвязь и дистанционное отображение данных

Современные достижения в области телесвязи и компьютерной технологии предоставляют возможность передачи радиолокационных данных на большое число удаленных терминалов (рабочих мест). В частности, существуют компьютерные системы, способные принимать и накапливать данные с многих радиолокаторов, а также информацию с других источников данных, таких как спутники. Также возможно осуществлять мониторинг и управление функционированием радиолокатора, который допускает дистанционно автоматическую эксплуатацию. Благодаря этим техническим достижениям во многих странах «наблюдение за текущей погодой» осуществляется для пунктов, удаленных от места расположения радиолокатора.

Передача изображений может производиться с помощью практически любых современных средств передачи данных, таких как телефонные линии (специализированные или нет), оптико-волоконные линии, радио- или микроволновые линии, а также спутниковые каналы связи. Во многих странах наиболее широко используются передающие системы на базе специализированных телефонных линий ввиду простого доступа и относительно низкой стоимости. Следует иметь в виду, что радиолокаторы часто располагаются в удаленных местах, где современные системы телесвязи отсутствуют.

В настоящее время радиолокационные изображения могут передаваться в течение нескольких секунд благодаря быстрому развитию коммуникационной технологии. Например, размер файла, содержащего продукцию с дальностью 100 км с разрешением 0,5 км, может иметь размер 160 Кбайт. При использовании алгоритма сжатия размер файла можно сократить на 20 – 30 Кбайт в формате GIF.

Данный файл с продукцией может быть передан по аналоговой телефонной линии менее, чем за 30 с, а с передача использованием сети ISDN со скоростью 64 кбит/с может занять не более 4 с. Однако передача большего количества уровней отражаемости либо дополнительных данных, таких как данные по отражаемости при сканировании по объему, или доплеровских данных увеличит время передачи.

9.8 КАЛИБРОВКА И ОБСЛУЖИВАНИЕ

Калибровка и обслуживание любого радиолокатора должны осуществляться в соответствии с процедурами, предписанными производителем. Ниже следует их общее описание.

9.8.1 Калибровка

В идеальном случае для полной калибровки отражаемости используется точечная мишень с известной радиолокационной отражаемостью, например сфера с металлическим покрытием. Смысл заключается в том, чтобы проверить антенну и волноводы на соответствие их номинальным характеристикам. Однако данный метод используется очень редко из-за практических трудностей подъема сферы и многочисленных отражений от наземных предметов. Параметры антенны могут также быть верифицированы по измерению солнечного излучения. При обычной калибровке антенна не проверяется, а калибруются волноводный тракт и приемопередающая система. Обычно предписываются следующие мероприятия:

(a) измерение излучаемой мощности и формы волнового фронта в соответствующем диапазоне частот;
(b) проверка излучаемой частоты и частотного спектра;
(c) подача известного микроволнового сигнала на вход приемника, с тем чтобы проверить правильность связи определяемых радиолокатором уровней отражаемости с мощностью входного сигнала;
(d) измерение отношения сигнал-шум, которое должно быть в пределах номинального диапазона, соответствующего техническим характеристикам радиолокатора.

Если по результатам этих калибровочных проверок выявлены какие-либо изменения или отклонения, необходимо произвести корректирующие настройки. Доплеровская калибровка включает проверку и настройку фазовой стабильности с использованием фиксированных целей или искусственных сигналов, масштабирование реальной и мнимой частей комплексного видеосигнала и тестирование процессора сигналов по известным искусственно генерируемым сигналам.

Установка по горизонтали и угла места лучше всего проверяется отслеживанием положения солнца в режиме «только прием» и путем использования имеющейся информации о положении солнца; в противном случае нужна механическая установка уровня антенны. Наличие или отсутствие эхосигналов от неподвижных наземных целей может также служить грубой проверкой качества работы передатчика или приемника.

Несмотря на то, что современные радиолокаторы обычно снабжаются очень стабильными электронными устройствами, калибровки необходимо выполнять достаточно часто, чтобы гарантировать надежность и точность данных. Калибровка должна производиться либо квалифицированным персоналом, либо с помощью автоматических методик, например с использованием контрольно-диагностического оборудования, которое работает в непрерывном режиме. В первом случае, который требует участия оператора, оптимальными являются по крайней мере еженедельные калибровки; во втором они могут выполняться ежесуточно или даже полунепрерывно. Простые сравнительные проверки мощности эхосигнала и местоположения можно осуществлять часто, используя два или более радиолокаторов с перекрывающимися зонами обзора и следящих за соответствующей целью.

9.8.2 Обслуживание

Современные радиолокаторы, если они надлежащим образом установлены и эксплуатируются, не должны часто выходить из строя. Некоторыми производителями заявлено, что для их радиолокаторов среднее время бесперебойной работы (СВБР) составляет около года. Однако эти заявления часто являются оптимистичными, и обеспечение СВБР требует спланированного профилактического обслуживания. Для минимизации времени ремонта необходимо плановое повседневное обслуживание и достаточное количество хорошо подготовленного технического персонала.

Профилактическое обслуживание должно включать по крайней мере ежемесячную проверку всех подверженных износу частей радиолокатора, например редукторов, моторов, вентиляторов, а также несущих конструкций. Местный обслуживающий персонал должен вносить результаты проверок в журнал обслуживания радиолокатора и по мере надобности посылать их в центральную службу. Когда имеется сеть радиолокаторов, можно

организовать централизованную службу материально-технического снабжения и ремонтный цех. Последний получает вышедшие из строя части радиолокаторов, ремонтирует их и передает в службу материально-технического снабжения для хранения в качестве запасных частей с тем, чтобы они использовались по мере необходимости в месте эксплуатации.

Для выполнения ремонтных работ служба должна быть достаточным образом укомплектована, а именно:

(a) запасными частями для всех самых важных элементов радиолокатора, например радиолампами, твердыми электронными компонентами, панелями, шасси, моторами, редукторами, блоками питания и т. д. Опыт показывает, что желательно предусмотреть 30 % первоначальных затрат на радиолокатор для приобретения запасных частей, хранимых в месте его расположения. Если имеется много радиолокаторов, то эта процентная доля может быть снижена до уровня примерно 20 % при соответствующем распределении между централизованным и местным обслуживанием;

(b) испытательной аппаратурой, включая оборудование для калибровки, упомянутое выше, обычно затраты на нее составляют приблизительно 15 % от стоимости радиолокатора;

(c) хорошо подготовленным персоналом, способным определить проблему и быстро и эффективно произвести ремонтные работы.

Продуманная организация обслуживания повысит регулярность работы радиолокатора до 96 % в течение года при наличии стандартного оборудования. Более высокая эффективность возможна при более высоких расходах.

Рекомендуемый минимум оборудования для калибровки и обслуживания включает следующие виды:

(a) генератор микроволновых сигналов;
(b) микроволновый измеритель мощности;
(c) мегагерцевый осциллограф;
(d) микроволновый измеритель частоты;
(e) рупорные антенны со стандартным усилением;
(f) генератор сигналов промежуточной частоты;
(g) микроволновые компоненты, включая нагрузочные устройства, блоки сопряжения, аттенюаторы, соединительные устройства, кабели, адаптеры и т. д.;
(h) универсальный анализатор микроволнового спектра в центральной службе;
(i) стандартные электрические и механические инструменты и оборудование.

9.9 ИЗМЕРЕНИЯ ОСАДКОВ

Измерение осадков с помощью радиолокатора является предметом интереса с момента возникновения радиолокационной метеорологии. Наиболее важным преимуществом использования радиолокаторов для измерения осадков является охват большой территории при высоком пространственном и временном разрешении, осуществляемый с единой точки наблюдения и в режиме реального времени. Более того, двумерная картина метеорологической ситуации может быть расширена на очень большую территорию с помощью объединения данных от нескольких радиолокаторов. Однако только недавно появилась возможность проводить измерения на большой территории с точностью, приемлемой для гидрологических применений.

К сожалению, правильная оценка этой точности невозможна – частично из-за того, что нет удовлетворительной основы для сравнения. Общепринятый подход заключается в использовании сети осадкомеров как эталона, относительно которого сравниваются радиолокационные оценки. Интуитивно такой подход является привлекательным, но страдает от фундаментального ограничения: нет никакого эталонного стандарта, по отношению к которому можно было бы установить точность пространственного распределения осадков, измеренных с помощью сети осадкомеров в масштабах радиолокационного луча. В природе не существует случаев выпадения однородных стандартных осадков для проверки сети, а также нет никакого более высокого стандарта, с которым можно было бы сравнить данные, полученные на такой сети. Поэтому не известна истинная сумма осадков для данной территории или точность осадкомерной сети. Имеются сведения, что точность осадкомера для некоторых результатов может оказаться гораздо ниже обычно предполагаемой, в особенности, если оценки получены по относительно небольшому количеству осадкомеров (Neff, 1977).

9.9.1 ХАРАКТЕРИСТИКИ ОСАДКОВ, КОТОРЫЕ ВЛИЯЮТ НА РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ: СООТНОШЕНИЕ *Z-R*

В метеорологической радиолокации интенсивность осадков обычно определяется по соотношению *Z-R*:

$$Z = A\,R^{b} \qquad (9.10)$$

где A и b – постоянные величины. Данное соотношение неодинаково для различных климатических условий или районов. Номинальные и принятые значения коэффициента и показателя степени

равны: A = 200 и b = 1,60 (Marshall and Palmer, 1948; Marshall and Gunn, 1952).

Уравнение разработано в рамках ряда допущений, которые не всегда бывают полностью справедливыми. Тем не менее, история и опыт показали, что соотношение в большинстве случаев дает надежную оценку осадков у земной поверхности в отсутствие очевидных аномалий. Имеется несколько общих положений, которые следует перечислить. При длинах волн 5 и 10 см аппроксимация Рэлея действительна для большинства практических целей до тех пор, пока не появляются градины. Большие концентрации ледяных кристаллов, смешанных с каплями, могут вызвать аномалии, особенно вблизи уровня таяния. Принимая во внимание коэффициент преломления для льда (т. е. $|K|^2$ = 0,208) и выбирая соответствующее соотношение между отражаемостью и интенсивностью осадков (Z_e по отношению к R), можно достаточно хорошо оценить количество осадков при наличии снега (значение, равное 0,208 вместо 0,197 для льда, используется для учета изменения диаметра капель воды и ледяных кристаллов в эквивалентной массе).

Интенсивность выпадения осадков (R) зависит от влагозапаса и скорости падения частиц в облучаемом радиолокатором объеме. Она примерно пропорциональна четвертой степени диаметров частиц. Поэтому не существует единого соотношения между радиолокационной отражаемостью и интенсивностью осадков, поскольку оно зависит от распределения частиц по размерам. Таким образом, естественная изменчивость распределения капель по размерам является важным источником неопределенности при радиолокационных измерениях осадков.

Эмпирические связи Z-R, а также их изменчивость от шторма к шторму или во время одного шторма были предметом многих исследований на протяжении последних 40 лет. Соотношение Z-R может быть получено путем расчетов значений Z и R по измеренным функциямраспределениям капель по размерам. Альтернативой является сравнение величины Z, измеренной на высоте с помощью радиолокатора (тогда она называется эквивалентной радиолокационной отражаемостью и обозначается Z_e), с величиной R, измеренной у земной поверхности. В последнем подходе предпринимается попытка учесть любые различия между осадками на высоте и теми, которые достигают земной поверхности. Он также может включать ошибки калибровки радиолокатора, поэтому результат не определяется строго соотношением Z-R.

Достаточно большое внимание уделяется эмпирическому соотношению Z-R в зависимости от классификации штормов по типу дождя Достигнутые результаты столь незначительны, и остается открытый вопрос практического применения этой методики на оперативной основе. Несмотря на то, что изменения в распределении капель по размерам, бесспорно, являются важными, их относительная значимость часто переоценивается. После некоторого осреднения по времени и/или пространству ошибки определения интенсивности выпадения дождя, связанные с этими изменениями, редко превышают 100 % (в 2 раза). Они являются основными источниками ошибок в четко организованных экспериментах на малых дальностях. Однако на больших расстояниях обычно преобладают ошибки, связанные с невозможностью наблюдать осадки вблизи земной поверхности и с заполнением луча. Эти ошибки, несмотря на их важность, большей частью игнорировались.

В связи с увеличением или испарением осадков, движением воздуха и изменением фазового состояния (лед и вода в слое таяния или полоса усиления эхосигнала от зон кристаллизации) наблюдаются весьма изменчивые вертикальные профили отражаемости как в пределах данного шторма, так и от шторма к шторму. За исключением случаев, когда ширина луча является достаточно малой, это ведет к неоднородному распределению отражаемости в пределах облучаемого радиолокатором объема. В конвективных осадках, как показывает опыт, возникает меньше трудностей, связанных с проблемой вертикального профиля.

Однако, при дожде или снеге, выпадающем из слоистообразных облаков, значение вертикального профиля возрастает. С ростом дальности луч становится шире и располагается выше над земной поверхностью. Поэтому различия между оценками количества осадков и их сумм, измеренных у земной поверхности с помощью радиолокатора, также возрастают. Отражаемость обычно снижается с высотой, поэтому в ситуациях с наличием слоистообразной облачности или снега дождь недооценивается радиолокатором.

На больших дальностях для приземных штормов и в особенности когда при малых углах места антенны происходит затенение такими препятствиями, как горы, недооценка может быть очень серьезной. Ошибка данного типа часто преобладает над всеми остальными. Но этому обстоятельству часто не придается значения, когда штормы наблюдаются только вблизи, либо когда анализируются штормы, располагающиеся приблизительно на одинаковом удалении.

Эти и другие вопросы, такие как выбор длины волны радиолокатора, ошибки, вызванные ослаблением, радиоволны в осадках, выбор места установки

радиолокатора для гидрологических применений, калибровка аппаратных средств радиолокационных систем, зондирование и осреднение, а также метеорологическая интерпретация радиолокационных данных, обсуждаются в работах Joss and Waldvogel (1990), Smith (1990) and Sauvageot (1994). Ниже рассматриваются только измерения жидких осадков; небольшой оперативный опыт накоплен в области радиолокационных измерений снега и еще меньше - в области измерений града.

9.9.2 ПРОЦЕДУРЫ ИЗМЕРЕНИЯ

Основная процедура вычисления интенсивности осадков по измеренной отражаемости для гидрологических применений требует следующих шагов:

(a) с помощью калибровки и соответствующего технического обслуживания обеспечить стабильную работу аппаратных средств;

(b) произвести корректировку ошибок с использованием вертикального профиля отражаемости;

(c) с учетом всей информации о соотношении Z_e-R вычислить количество осадков;

(d) сравнить радиолокационные данные с показаниями дождемеров.

Первые три шага основываются на известных физических коэффициентах, а в последнем используется статистический подход к компенсации остаточных ошибок, что позволяет применять статистические методы наиболее эффективно. В прошлом основное ограничение при выполнении этих шагов было вызвано использованием аналоговых электрических схем и фотографических методик для регистрации и анализа данных. Поэтому было исключительно трудно определить и сделать необходимые корректировки и, конечно, это производилось не в режиме реального времени. В настоящее время данные могут быть получены в трех измерениях, в форме, пригодной для их преобразования, а также для решения этих задач имеются компьютерные возможности. Большая часть текущих научных исследований направлена на развитие методик для выполнения такой обработки на оперативной основе (Ahnert and others, 1983).

Методы, используемые для выполнения указанных выше шагов (b) – (d), , и адекватность результатов, получаемых при радиолокационном измерении осадков, очень сильно зависят от ситуации. Она может определяться конкретной задачей, географическим районом, который необходимо охватить, особенностями использования информации и другими факторами. В определенных ситуациях желателен интерактивный процесс, например такой, который разработан для FRONTIERS и описан в приложении А к работе Joss and Waldvogel (1990). Там используется вся относящаяся к данному вопросу информация, имеющаяся в современных центрах метеорологических данных.

До настоящего момента ни один из методов компенсации влияния вертикального профиля отражаемости в режиме реального времени широко не применяется (шаг (b)). Однако можно выделить три метода компенсации:

(a) корректировка зависимости от расстояния: влияние вертикального профиля связано с сочетанием возрастания высоты оси луча и его расширения при увеличении дальности. Соответственно для получения корректировки первого порядка может применяться средний климатический коэффициент зависимости от расстояния. Различные коэффициенты могут быть приемлемыми для разных видов штормов, например, конвективный шторм отличается от слоистообразного;

(b) пространственно-ориентированная корректировка: в ситуациях, где характеристики осадков систематически изменяются в зоне наблюдения либо где территория охвата радиолокатором не является топографически однородной, могут быть полезны поправки, изменяющиеся как по азимуту, так и по дальности. Если имеется достаточная фоновая информация, то можно внести в соответствующую справочную таблицу средние поправочные коэффициенты. В противном случае поправки должны выводиться на основании самих данных по отражаемости либо по результатам сравнений с данными по осадкомерам (что в обоих случаях является трудно осуществимым);

(c) полные вертикальные профили: вертикальные профили в штормах изменяются по месту и времени, а самый нижний уровень профиля, отмечаемый радиолокатором, обычно изменяется из-за нарушения радиогоризонта. Соответственно для получения наилучших результатов может понадобиться осуществляемый от точки к точке процесс корректировки с использованием репрезентативного вертикального профиля для каждой зоны, представляющей интерес. Репрезентативные профили могут быть получены с помощью самих радиолокационных данных по объему сканирования, климатологических справочников или из моделей штормов. Это наиболее сложный подход, но его можно осуществить с помощью современных систем данных (Joss and Lee, 1993).

После осуществления корректировок профиля для вычисления значения R (шаг (c) первого параграфа данного раздела) следует использовать соотношение

отражаемость/интенсивность дождя, соответствующее ситуации, географическим условиям и времени года. Существует распространенное мнение, что сравнение с данными осадкомеров следует производить регулярно, как и проверку эффективности работы радиолокатора, и вводить соответствующие поправки, если отклонения данных радиолокатора четко определены (шаг (d) первого параграфа данного раздела). В ситуациях, когда радиолокационные оценки сильно расходятся с принятыми за эталон из-за калибровки радиолокатора или других причин, такие поправки могут привести к значительным улучшениям.

Однако поправки автоматически не обеспечивают улучшения радиолокационных оценок, и иногда скорректированные оценки хуже, чем исходные. Это в особенности справедливо для конвективных дождей, когда вертикальное расширение эхосигнала смягчает проблемы, связанные с вертикальным профилем и осадкомерные данные являются сомнительными из-за нерепрезентативности измерений. Кроме того, пространственный радиус корреляции может быть малым, и соотношение осадкомер-радиолокатор становится все более неточным с увеличением расстояния от осадкомера. Общий принцип заключается в том, что поправки будут давать существенное улучшение только тогда, когда систематическая разница (т. е. отклонение) между оценками осадков по осадкомеру и радиолокатору больше, чем стандартное отклонение случайного рассеяния при сравнении данных осадкомера и радиолокатора. Такой принцип позволяет судить, следует ли использовать осадкомерные данные для корректировок, а также приводит к заключению, что имеющиеся данные необходимо проверять перед непосредственным введением любой поправки. Были исследованы различные методы выполнения этой процедуры, но к настоящему времени широко применяемого подхода не имеется.

Для использования радиолокатора с поляризационным эффектом в целях улучшения измерений жидких осадков предложены разные методики. В частности, было выдвинуто предположение, что различие между значениями отражаемости, измеренными при горизонтальной и вертикальной поляризации (Z_{DR}), может дать полезную информацию о распределениях капель по размерам (Seliga and Bringi, 1976). Альтернативный метод заключается в использовании K_{DP}, который зависит от значительной сплюснутости сфероидов облучаемых частиц, нарушающей форму рассеиваемой волны. Метод зависит от гидродинамических возмущений формы больших капель дождя; более интенсивные дожди с более крупными каплями дают более сильные признаки поляризации. Однако все еще имеются значительные расхождения во мнениях по поводу того, имеет ли эта методика перспективу оперативного использования при измерениях осадков (English and others, 1991).

На малых дальностях (при высоком пространственном разрешении) радиолокаторы с поляризационным эффектом могут дать ценную информацию о распределениях частиц осадков и других параметрах, относящихся к физике облаков. На больших дальностях нельзя быть уверенным в том, что луч радиолокатора заполнен однородно распределенными гидрометеорами, так что неопределенность эмпирической связи признака поляризации с распределением капель по размерам растет. Конечно, поможет увеличение знаний о соотношении *Z-R*, но даже если многопараметрические методики будут работать прекрасно, можно уменьшить ошибку, вызываемую соотношением *Z-R*, только с 33 до 17 %, как это указывается в работе Ulbrich and Atlas (1984). Для гидрологических применений на малых дальностях поправки для других отклонений (уже описанных) обычно гораздо больше, возможно, на порядок величины или более.

9.9.3 Современное состояние вопроса и резюме

На протяжении ряда лет многие научные исследования были направлены на изучение потенциала радиолокатора как инструмента для измерения осадков. Как правило, радиолокационные измерения осадков, выведенные из эмпирического соотношения *Z-R*, хорошо согласуются с измерениями по осадкомерам для небольших расстояний от радиолокатора. Возрастание неопределенности и недооценка интенсивности и сумм осадков радиолокатором происходит с увеличением расстояния. Например, швейцарский радиолокатор оценивает на дальности 100 км в среднем только 25 % фактической суммы осадков, измеренных дождемером, несмотря на тот факт, что он измеряет 100 % на малых дальностях.

Аналогичные, но не настолько серьезные неопределенности возникают на равнинной территории или при конвективном дожде. Причинами являются: кривизна Земли, затенение за счет рельефа местности и расширение радиолокационного луча с дальностью. Таким образом, основной недостаток использования радиолокаторов при оперативных применениях для измерений осадков и в гидрологии связан с невозможностью измерения осадков у земной поверхности на произвольной дальности. Поскольку эта проблема не часто возникает в четко спланированных экспериментах, она не получила того внимания, которого заслуживает в качестве

доминирующей проблемы при оперативных наблюдениях.

Благодаря наличию недорогого высокоскоростного оборудования для обработки данных сейчас возможно определить распределение эхосигнала во всей зоне обзора радиолокатора в трех измерениях. Эти сведения вместе со сведениями о местоположении радиолокатора и рельефе местности вокруг него в режиме реального времени позволяют корректировать большую часть величин, связанных с вертикальным профилем, или, по крайней мере, оценивать их значения. Эта корректировка дает возможность расширить район, в котором достигается точность, приемлемая для многих гидрологических применений.

При эксплуатации радиолокатора в максимально возможной степени необходимо придерживаться следующих правил:

(a) позиция установки радиолокатора необходимо выбирать таким образом, чтобы радиолокатор имел возможность наблюдать осадки вблизи земной поверхности. Это означает, что не должно быть ни затенения, ни эхосигналов вследствие наличия отражающих объектов в ближней зоне можно исключить, например, с помощью доплеровского анализа. Однако наличие местников в ближней зоне может часто ограничивать полезную дальность действия радиолокатора, пригодную для получения количественных характеристик, до 50 – 100 км;

(b) длину волны и размер антенны следует выбирать таким образом, чтобы достичь удовлетворительного компромисса между ослаблением, вызываемым осадками, и пространственным разрешением. На больших дальностях могут потребоваться более короткие волны для формирования достаточно узкого луча, либо антенны больших размеров, если использование S-диапазона необходимо в связи с часто наблюдаемым ослаблением в осадках;

(c) системы следует тщательно обслуживать и контролировать качество их функционирования, включая обеспечение достаточной стабильности и калибровки оборудования;

(d) если измерения отражаемости проводятся выше, чем непосредственно у земной поверхности, их следует проверять на ошибки, связанные с изменением вертикального профиля отражаемости. Поскольку эти профили изменяются со временем, с помощью радиолокатора необходимо осуществлять непрерывный мониторинг отражаемости. Может понадобиться вычисление поправки для каждого пикселя изображения, поскольку она зависит от высоты над землей самого низкого видимого объема. Важно, чтобы восстановление вертикального профиля отражаемости производилась перед остальными корректировками, поскольку она является основной ошибкой на больших дальностях;

(e) площадь зондируемого пространства должна выбираться в зависимости от цели применения. Для гидрологических целей, и в особенности когда проводится сравнение радиолокационных оценок интенсивности осадков с результатами, полученными по осадкомерам, желательно интегрировать данные по времени и/или площади. Интегрирование должно осуществляться по обследуемой величине (линейной интенсивности дождя R) во избежание любых отклонений, вызываемых этим интегрированием.

Даже грубая оценка фактического вертикального профиля отражаемости может привести к положительному результату. Поляриметрическими измерениями можно обеспечить некоторое дальнейшее улучшение, но еще необходимо показать, что дополнительные расходы, сложность и риск неправильной интерпретации поляризационных измерений могут быть обоснованы для оперативных применений в гидрологии.

Основные преимущества радиолокатора - это высокое пространственное и временное разрешение, охват обширных территорий и немедленное получение данных (данные в режиме реального времени). Радиолокаторы также способны производить измерения над недоступными пространствами, например озерами, а также следить за «блуждающей целью» или «конвективным комплексом» в режиме реального времени, например при подготовке краткосрочного прогноза. Хотя это только в малой степени подходит для достижения абсолютной точности при измерении сумм жидких осадков.

Надежная количественная информация об осадках в настоящее время поступает с радиолокационных сетей, расположенных во многих местах. Маловероятно, что радиолокатор когда-либо полностью заменит осадкомер, поскольку осадкомеры предоставляют дополнительную информацию и являются существенным элементом для приведения и/или проверки показаний радиолокаторов. С другой стороны, как отмечали многие специалисты, понадобилась бы исключительно плотная и дорогостоящая сеть осадкомеров для получения результатов, легко достижимых с помощью радиолокаторов.

9.9.4 Комплексная методика «площадь-время»

В климатологических применениях, не требующих данных в режиме реального времени, можно использовать преимущества тесной связи между общим количеством осадков и охватываемой ими площадью и продолжительностью дождя (Byers, 1948; Leber, Merrit and Robertson, 1961). Не используя соотношение *Z-R* Doneaud and others (1984, 1987) обнаружили линейную связь между площадью выпадения дождя и общим количеством осадков в пределах этой территории с очень малой дисперсией. Данная связь зависит от порогового критерия, выбранного для определения площади выпадения дождя. Несмотря на то, что эта методика имеет ограниченное использование при краткосрочном прогнозировании, осуществляемом в режиме реального времени, ее реальную ценность она представляет в климатологических исследованиях.

9.10 ПРИМЕНЕНИЕ РАДИОЛОКАТОРОВ В ОБЛАСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ОПАСНЫХ ЯВЛЕНИЙ ПОГОДЫ И СОЗДАНИЯ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА ПОГОДЫ

9.10.1 Использование информации об отражаемости

В настоящее время наиболее широко используемым критерием для радиолокационного обнаружения потенциально сильных гроз является интенсивность отражаемости. Оперативным прогнозистам рекомендуется искать районы с высокой отражаемостью (50 дБZ или больше). Они включают соответствующие тропическим циклонам спиральные ленты и структуры, образующие глаз циклона. Эхосигналы в виде кулака или пальцев, изображения с выступами и другие формы, полученные при радиолокационном сканировании по объему, используются для предупреждений о торнадо или сильных грозах (Lemon, Burgess and Brown, 1978), но при этом высока вероятность подачи ложной тревоги.

Улучшение обнаружения сильных гроз было недавно достигнуто в результате обработки цифровых данных об отражаемости, полученных с помощью автоматического объемного сканирования с интервалом обновления 5 – 10 минут. Комплексное измерение отражаемости, так же как и интегрального содержания жидкокапельной влаги по вертикали и определение вероятности опасных явлений погоды привели к улучшению обнаружения сильных гроз и оправдываемости предупреждений, в особенности о граде.

Для обнаружения града с помощью типового 10-сантиметрового радиолокатора было предложено много методик, например по эхосигналу 50 дБZ на высотах 3 или 8 км (Dennis, Schock and Koscielski, 1970; Lemon, Burgess and Brown, 1978). Однако сообщений о верификационных исследованиях для других регионов мира не имеется. Federer and others (1978) обнаружили, что для оправдываемого выпадения града высота контура 45 дБZ должна превосходить высоту нулевой изотермы больше чем на 1,4 км. Данный метод был доработан, прошел проверку в Королевском нидерландском метеорологическом институте и используется в оперативном режиме (Holleman, and others, 2000; Holleman, 2001). Различные подходы к улучшению обнаружения града связаны с применением радиолокаторов, работающих на двух длинах волн – обычно в диапазонах X и S (Eccles and Atlas, 1973). Физические аспекты того, что радиолокатор «видит» на этих различных длинах волн, являются исключительно важными для понимания сильных сторон и ограничений этих методик (изменения эффективных площадей гидрометеоров или распределение интенсивности). Исследования на различных поляризациях позволяют надеяться на улучшение оправдываемости прогноза града и оценки обильных осадков на основе дифференциальной отражаемости (Z_{DR}), измеряемой с помощью доплеровского радиолокатора с двойной поляризацией (Seliga and Bringi, 1976).

С конца 70-х годов для обеспечения дискретности по времени и изменчивости радиолокационных данных используются компьютерные системы. Британская система FRONTIERS (Browning and Collier, 1982; СоШег, 1989), японская система AMeDAS, французская система ARAMIS (Commission of the European Communities, 1989) и система США PROFS позволяют пользователям взаимодействовать и создавать композитные цветные изображения по данным, поступающим одновременно от нескольких расположенных на расстоянии радиолокаторов, а также объединять радиолокационные данные с информацией других источников.

Синтез данных радиолокаторов и данных осадкомеров представляет собой полнофункциональный продукт для мониторинга дождевых осадков. «Анализ выпадения осадков, выполненный с помощью радиолокаторов и системы AMeDAS» является одним из продуктов, созданных в Японии (Makihara, 2000). Интенсивность эхосигнала, полученная в результате использования сети радиолокаторов, переводится в скорость выпадения осадков с использованием соотношения Z_e-R, и количество осадков, выпавшее за одни час, оценивается на основе скорости выпадения осадков. Полученные количества затем калибруются с

использованием значений количеств осадков, полученных в результате использования дождемеров для разработки карты осадков высокой точности, выпавших за один час.

9.10.2 Использование доплеровской информации

Самым лучшим методом измерения ветра внутри зон осадков является кратный доплеровский метод, который используется с середины 70-х годов для научных полевых программ ограниченной продолжительности. Однако на сегодняшний день никакого использования в режиме реального времени двойного или тройного доплеровского анализа не ожидается из-за требований к пространственному охвату. Исключением могут быть потребности аэропортов, касающиеся ограниченной зоны, где может быть полезной система из двух стационарных радиолокаторов (Wurman, Randall and Burghart, 1995).

Первое применение доплеровского радиолокатора для обнаружения и отслеживания сильных гроз в режиме реального времени относится к началу 70-х годов. Donaldson (1970) был, вероятно, первым, кто определил вихревую структуру потоков в сильных грозах. Квазиоперативные эксперименты продемонстрировали, что очень высокий процент этих вихревых признаков, определенных с помощью одного доплеровского радиолокатора, сопровождался вызывающим повреждения градом, сильным ветром одного направления или торнадо (Ray and others, 1980; JDOP, 1979).

С тех пор стало очевидным существование двух полезных характеристик сильных штормов с типичными формами, или «признаков». Первый из них – признак мезоциклона, который представляет собой вертикальный столб поднимающегося и вращающегося воздуха, обычно 2 – 10 км в диаметре. Признак мезоциклона (или соотношение скорости), как наблюдалось, формируется на средних уровнях шторма и опускается до высоты границы облачности одновременно с развитием торнадо (Burgess, 1976; Burgess and Lemon, 1990). В ходе квазиоперативных экспериментов в Оклахоме (JDOP 1979) такая последовательность дала возможность повысить заблаговременность предупреждения о торнадо до 20 минут или больше. Большинство доплеровских наблюдений проводилось в США. В ходе экспериментов в Оклахоме отмечено, что приблизительно в 50 % всех случаев мезоциклонов возникали торнадо, сведения о которых были подтверждены; а также что все штормы, сопровождавшиеся разрушительными торнадо, формировались в средах со значительным сдвигом ветра и соответствовали глубоким мезоциклонам (Burgess and Lemon,1990).

Второй признак – признак торнадообразующего вихря (ПТВ), который создается самим торнадо. Это место возникновения небольших циркуляционных образований внутри мезоциклона. В некоторых случаях ПТВ обнаруживали на высоте за полчаса или больше до того, как торнадо касался земной поверхности. Опыт изучения ПТВ на протяжении нескольких лет показал их пригодность для определения местоположения торнадо, обычно в пределах ±1 км. Оценивается, что могут быть обнаружены 50 – 70 % торнадо, возникающих к востоку от высокогорных равнин Скалистых гор в США (Brown and Lemon, 1976). Большие значения ширины спектра Доплера (второй момент) были связаны с местоположением торнадо. Однако большие значения ширины спектра также хорошо коррелируют с увеличением турбулентности в шторме.

Дивергенция, вычисленная по данным о радиальной скорости, как представляется, является хорошей мерой общей дивергенции. Оценки радиальной дивергенции на верхней границе шторма совпадают с оценками вершины эхосигнала облачности, которая является показателем мощности восходящих движений. Квазиоперативные эксперименты с доплеровскими радиолокаторами показали, что рост значения дивергенции, может быть самым ранним признаком усиления шторма. Кроме того, большие значения дивергенции вблизи вершины шторма, как обнаружилось, являются характерным признаком града.

Признаки дивергенции на нижних уровнях в виде нисходящих микровихрей регулярно отслеживаются с помощью аэронавигационных доплеровских метеорологических радиолокаторов для защиты воздушных судов во время взлета и приземления. Эти радиолокаторы специально построены для обслуживания ограниченной площади и повторяют частые сканирования воздушного пространства в зоне аэропорта. Микровихри имеют жизненный цикл от 10 до 20 минут, что требует специализированных радиолокационных систем для их эффективного обнаружения. В этом случае радиолокационно-компьютерная система автоматически предоставляет предупреждения для центра управления воздушным движением (Michelson, Schrader and Wieler, 1990).

Проводимые с помощью доплеровских радиолокаторов исследования роли линий конвергенции пограничного слоя в формировании новых гроз подтверждают выводы более ранних спутниковых исследований облачных дуг. Имеются указания на то, что мезомасштабные линии конвергенции пограничного слоя (включая перекрещивающиеся фронтальные порывы ветра от предыдущей

конвекции) играют основную роль в определении того, где и когда сформируются штормы. Wilson and Schreiber (1986) описали и объяснили несколько случаев развития торнадо на линиях сдвига ветра при отсутствии осадков, которые наблюдались с помощью доплеровского радиолокатора (Mueller and Carbone, 1987).

Современные достижения в области цифровой обработки радиолокационных данных и методик отображения привели к разработке новых количественных, основанных на данных радиолокаторов, информационных продуктов для гидрометеорологических применений. Ряд европейских стран, а также Япония используют такие виды радиолокационной продукции наряду с численными моделями для оперативного прогнозирования и контроля за паводками (например, см. Cluckie and Owens, 1987).

Таким образом, основные достижения в настоящее время открывают возможность прогнозирования гроз с заблаговременностью 0 – 2 часа. Разработка этой методики потребует эффективного объединения данных доплеровских радиолокаторов, спутниковой информации высокого разрешения, а также приземных данных и данных зондирований.

Доплеровские радиолокаторы особенно полезны для мониторинга тропических циклонов: предоставляют данные о динамической эволюции глаза циклона, структур, образующих глаз циклона, и спиральных облачных лент, а также о местоположении и интенсивности ветров ураганной силы (Ruggiero and Donaldson, 1987; Baynton, 1979).

9.11 ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ РАДИОЛОКАТОРЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ОКЕАНА

Радиосигналы в диапазоне высокой частоты (от 3 до 30 МГц) отражаются в обратном направлении от волн на поверхности моря; их частота имеет доплеровский сдвиг. Они могут быть обнаружены высокочастотным радиолокатором, установленным для наблюдения за волнением. Мощность отраженного сигнала связана с усиливающейся интерференцией лучей, рассеянных на последовательности морских волн, располагающихся в пространстве таким образом, что рассеиваемые лучи попадают в резонанс, как это происходит в дифракционной решетке. В случае скользящего падения резонанс происходит, когда длина морской волны составляет половину длины радиоволны. Отраженный сигнал имеет доплеровский сдвиг, связанный с движением морских волн. По доплеровскому спектру можно установить направление движения морских волн с допуском влево или вправо от направления луча, который может быть определен путем использования другой информации, например, поля первого приближения. Если морские волны согласуются с приповерхностным ветром, то их движение дает направление ветра; это основное морское измерение при помощи высокочастотного радиолокатора. Затем может быть проведен анализ спектра отраженных сигналов для получения спектра морских волн и ориентировочной скорости ветра.

Измерения могут быть получены на расстоянии до 200 км или более с помощью наземных волновых радиолокаторов и до 3 000 км или более для ионосферных загоризонтных радиолокаторов (использующих отражение от ионосферы). Последние известны как загоризонтные радиолокаторы.

Большинство оперативных высокочастотных радиолокаторов являются военными, но некоторые из них используются для регулярного получения данных о направлении ветра над очень обширными зонами в целях обеспечения гидрометеорологического обслуживания.

Сведения о метеорологических применениях высокочастотных радиолокаторов приводятся в работах Shearman (1983), Dexter, Heron and Ward (1982), Keenan and Anderson (1987), and Harlan and Georges (1994), в которых имеются обширные списки дополнительной литературы.

ПРИЛОЖЕНИЕ

РУКОВОДЯЩИЕ УКАЗАНИЯ ВМО ПО ВЗАИМОСОГЛАСОВАННОМУ РАЗМЕЩЕНИЮ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ РАДИОЛОКАТОРОВ (МЕТЕОРАДАРОВ) И ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

ВМО выражает беспокойство в связи с увеличивающимся воздействиям ветроэнергетических установок на функционирование метеорадаров и акцентирует внимание на потребности в соответствующих консультациях по защите и усилиях по смягчению таких влияний.

ВМО адресует свое беспокойство к влиятельным политикам, к национальным администрациям, связанным с радио агентствами, национальным гидрологическим и метеорологическим обществам, разработчикам ветроэнергетических установок, продавцам этого оборудования и метеорологическому сообществу.

Защита данных, поступающих от метеорадаров, играет важную роль в отношении длительного воздействия погоды, контроля, прогнозирования и предупреждения, т.е. служит на благо государственной безопасности. Модели предсказания погоды и применяемые местные прогнозы все более и более зависят от национальных сетей наземных допплеровских метеорадаров и ветровых профилемеров для предупреждения о таких опасных метеоявлениях как торнадо, внезапные наводнения, смерчи, ливневые осадки (дождь, снег, град), обледенение самолётов, а также о возможных нарушениях деятельности авиации из-за сложных погодных условий. Во всем мире допплеровские метеорадары и сети ветровых профилемеров оказываются подверженными воздействию ветроэнергетических установок.

Ветроэнергетические установки уже оказали влияние на работу сетей метеорадаров, создавая своеобразное отражение, которое приводит к значительной потери данных или ложной информации об осадках в гидрологических приложениях. Вращающиеся лопасти могут создать скорости, которые потенциально могут быть ошибочными, и воспринимаются как опасные явления, такие как торнадо. В тех случаях, когда возникает необходимость перемещения метеорадаров из-за размещения энергоустановок, метеорологическое сообщество, как правило, не имеет никакой юридической поддержки и вынуждено полагаться лишь на политику «хорошего соседа».

Развитие сетей новых радаров и ветровых профилемеров и параллельное размещение ветроэнергетических установок потребует, естественно, стратегического планирования взаимодействия метеорологического и ветроэнергетического сообщества. ВМО и метеорологическое сообщество поддерживают международные и национальные радио-агентства и готовы обеспечить усилия этих

Расстояние	*Потенциальное воздействие*	*Рекомендация*
0 – 5 км	Ветроэнергетическая установка может полностью или частично заблокировать радар, что может привести к значительной потере данных, которые не могут быть восстановлены.	Сильная зона воздействия: ветроэнергетические установки не должны быть установлены в этой зоне.
5 – 20 км	Многократное отражение и рассеивание могут создать ложные эхо и возвышения. Вращающиеся лопасти могут искажать результаты измерений скорости допплеровскими метеорадарами.	Умеренная зона воздействия: ландшафт будет усиливать влияние. Анализ и консультация рекомендуются. Переориентация или перемещение отдельных ветроэнергетических установок могут уменьшить или смягчить их воздействие на работу метеорадара.
20 – 45 км	При самом низком возвышении антенны сигнал наблюдается; будет наблюдаться в отражённом сигнале эхо,похожее на эхо от поверхности земли. Вращающиеся лопасти могут искажать результаты измерений скорости допплеровскими метеорадарами.	Низкая зона воздействия: рекомендуется уведомление.
>45 км	Влияние на данные не наблюдается, но может иметь место из-за особых условий распространения сигнала.	Неустойчивая зона воздействия: рекомендуется уведомление.

агентств по способствованию и защите метеорологического использования свободного пространства. ВМО поощряет национальные радио-агентства в направлении развития приемлемых критериев ограничений и обеспечении средств помощи при выборе места размещения ветровой энергоустановки.

ВМО поощряет финансирование и внедрение исследований с целью разработки технологий, обеспечивающих смягчение воздействий ветроэнергетических установок на метеорадары. Для того, чтобы смягчить влияние ветроэнергетических установок в широком диапазоне, необходимо использовать приёмы обработки сигналов от метеорадаров или другие материалы. Далее, ВМО рекомендует, чтобы результаты этих исследований оказались доступными как для изготовителей метеорадаров, так и для изготовителей ветроэнергетических установок.

В интересах всех стран защитить свободное пространство для размещения метеорадаров и ветровых профилемеров с целью обеспечения точного прогнозирования опасных атмосферных явлений. Хорошо просматриваются решения на локальном, национальном и технологическом уровнях. ВМО будет поддерживать и обеспечивать руководящими материалами и средствами для защиты свободного пространства по оптимальному размещению метеорадаров и ветровых профилемеров.

Информация о расстояниях между ветроэнергетическими установками и метеорадарами, может использоваться, чтобы описать влияние на качество данных от метеорадаров, а также для того, чтобы сформировать стратегию взаимосогласованного расположения метеорадаров и ветроэнергетических установок. Ниже в таблице представленны общие руководящие принципы для типичных радаров, размещаемых на равнинной местности, которые могут видоизменяться в специфических ситуациях и для обычных радаров. Более мощные радары, такие как из группы S (с длинной волны 10 см) с меньшим ослаблением могут требовать изменений расстояний указанных в таблице..

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Ahnert, P.R., M. Hudlow, E. Johnson, D. Greene and M. Dias, 1983: Proposed on-site processing system for NEXRAD. *Preprints of the Twenty-first Conference on Radar Meteorology* (Edmonton, Canada), American Meteorological Society, Boston, pp. 378–385.

Aoyagi, J., 1983: A study on the MTI weather radar system for rejecting ground clutter. *Papers in Meteorology and Geophysics*, Volume 33, Number 4, pp. 187–243.

Aoyagi, J. and N. Kodaira, 1995: The reflection mechanism of radar rain echoes. *Preprints of the Twenty-seventh Conference on Radar Meteorology* (Vail, Colorado), American Meteorological Society, Boston, pp. 246–248.

Atlas, D., 1964: Advances in radar meteorology. *Advances in Geophysics* (H.E. Landsberg and J. Van Meighem, eds.), Volume 10, Academic Press, New York, pp. 317–479.

Atlas, D. (ed.), 1990: *Radar in Meteorology*. American Meteorological Society, Boston.

Atlas, D., R.C. Scrivastava and R.S. Sekhon, 1973: Doppler radar characteristics of precipitation at vertical incidence. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, Volume 11, Number 1, pp. 1–35.

Battan, L.J., 1981: *Radar Observation of the Atmosphere*. University of Chicago Press, Chicago.

Baynton, H.W., 1979: The case for Doppler radars along our hurricane affected coasts. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Volume 60, pp. 1014–1023.

Bean, B.R. and E.J. Dutton, 1966: *Radio Meteorology*. Washington DC, U.S. Government Printing Office.

Bebbington, D.H.O., 1992: Degree of Polarization as a Radar Parameter and its Susceptibility to Coherent Propagation Effects. *Preprints from URSI Commission F Symposium on Wave Propagation and Remote Sensing* (Ravenscar, United Kingdom) pp. 431–436.

Bringi, V.N. and A. Hendry, 1990: Technology of polarization diversity radars for meteorology. In: *Radar in Meteorology* (D. Atlas, ed.) American Meteorological Society, Boston, pp. 153–190.

Browning, K.A. and R. Wexler, 1968: The determination of kinetic properties of a wind field using Doppler radar. *Journal of Applied Meteorology*, Volume 7, pp. 105–113.

Brown, R.A. and L.R. Lemon, 1976: Single Doppler radar vortex recognition: Part II – Tornadic vortex signatures. *Preprints of the Seventeenth Conference on Radar Meteorology* (Seattle, Washington), American Meteorological Society, Boston, pp. 104–109.

Browning, K.A. and C.G. Collier, 1982: *An integrated radar-satellite nowcasting system in the United Kingdom*. In: *Nowcasting* (K.A. Browning, ed.). Academic Press, London, pp. 47–61.

Browning, K.A., C.G. Collier, P.R. Larke, P. Menmuir, G.A. Monk and R.G. Owens, 1982: On the forecasting of frontal rain using a weather radar network. *Monthly Weather Review*, Volume 110, pp. 534–552.

Burgess, D.W., 1976: Single Doppler radar vortex recognition: Part I – Mesocyclone signatures. *Preprints of the Seventeenth Conference on Radar Meteorology*, (Seattle, Washington), American Meteorological Society, Boston, pp. 97–103.

Burgess, D.W. and L.R. Lemon, 1990: Severe thunderstorm detection by radar. In *Radar in Meteorology* (D. Atlas, ed.). American Meteorological Society, Boston, pp. 619–647.

Burrows, C.R. and S.S. Attwood, 1949: *Radio Wave Propagation*. Academic Press, New York.

Byers, H.R., 1948: The use of radar in determining the amount of rain falling over a small area. *Transactions of the American Geophysical Union*, pp. 187–196.

Cluckie, I.D. and M.E. Owens, 1987: *Real-time Rainfall Run-off Models and Use of Weather Radar Information*. In: *Weather Radar and Flood Forecasting* (V.K. Collinge and C. Kirby, eds). John Wiley and Sons, New York.

Collier, C.G., 1989: *Applications of Weather Radar Systems: A Guide to Uses of Radar Data in Meteorology and Hydrology*. John Wiley and Sons, Chichester, England.

Commission of the European Communities, 1990: *Une revue du programme ARAMIS* (J.L. Cheze). Seminar on Cost Project 73: Weather Radar Networking (Brussels, 5–8 September 1989), pp. 80–85.

Crozier, C.L., P. Joe, J. Scott, H. Herscovitch and T. Nichols, 1991: The King City operational Doppler radar: Development, all-season applications and forecasting. *Atmosphere-Ocean*, Volume, 29, pp. 479–516.

Dennis, A.S., C.A. Schock, and A. Koscielski, 1970: Characteristics of hailstorms of western South Dakota. *Journal of Applied Meteorology*, Volume 9, pp. 127–135.

Dexter, P.E., M.L. Heron and J.F. Ward, 1982: Remote sensing of the sea-air interface using HF radars. *Australian Meteorological Magazine*, Volume 30, pp. 31–41.

Donaldson, R.J., Jr., 1970: Vortex signature recognition by a Doppler radar. *Journal of Applied Meteorology*, Volume 9, pp. 661–670.

Doneaud, A.A., S. Ionescu-Niscov, D.L. Priegnitz and P.L. Smith, 1984: The area-time integral as an indicator

for convective rain volumes. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, Volume 23, pp. 555–561.

Doneaud, A.A., J.R. Miller Jr., L.R. Johnson, T.H. Vonder Haar and P. Laybe, 1987: The area-time integral technique to estimate convective rain volumes over areas applied to satellite data: A preliminary investigation. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, Volume 26, pp. 156–169.

Doviak, R.J. and D.S. Zrnic, 1993: *Doppler Radar and Weather Observations*. Second edition, Academic Press, San Diego.

Eccles, P.J. and D. Atlas, 1973: A dual-wavelength radar hail detector. *Journal of Applied Meteorology*, Volume 12, pp. 847–854.

Eilts, M.D. and S.D. Smith, 1990: Efficient dealiasing of Doppler velocities using local environment constraints. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Volume 7, pp. 118–128.

English, M.E., B. Kochtubajda, F.D. Barlow, A.R. Holt and R. McGuiness, 1991: Radar measurement of rainfall by differential propagation phase: A pilot experiment. *Atmosphere-Ocean*, Volume 29, pp. 357–380.

Federer, B., A. Waldvogel, W. Schmid, F. Hampel, E. Rosini, D. Vento and P. Admirat, 1978: Grossversuch IV: Design of a randomized hail suppression experiment using the Soviet method. *Pure and Applied Geophysics*, 117, pp. 548–571.

Gossard, E.E. and R.G. Strauch, 1983: *Radar Observations of Clear Air and Clouds*. Elsevier Scientific Publication, Amsterdam.

Harlan, J.A. and T.M. Georges, 1994: An empirical relation between ocean-surface wind direction and the Bragg line ratio of HF radar sea echo spectra. *Journal of Geophysical Research*, Volume 99, C4, pp. 7971–7978.

Heiss, W.H., D.L. McGrew, and D. Sirmans, 1990: NEXRAD: Next generation weather radar (WSR-88D). *Microwave Journal*, Volume 33, Number 1, pp. 79–98.

Holleman, I., 2001: *Hail Detection Using Single-polarization Radar*. Scientific Report, Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI) WR-2001-01, De Bilt.

Holleman, I., H.R.A. Wessels, J.R.A. Onvlee and S.J.M. Barlag, 2000: Development of a hail-detection product. *Physics and Chemistry of the Earth*, Part B, 25, pp. 1293–1297.

Holt, A.R., M. Chandra, and S.J. Wood, 1995: Polarisation diversity radar observations of storms at C-Band. *Preprints of the Twenty-seventh Conference on Radar Meteorology* (Vail, Colorado), American Meteorological Society, Boston, pp. 188–189.

Holt, A.R., P.I. Joe, R. McGuinness and E. Torlaschi, 1993: Some *examples of the use of degree of polarization in interpreting weather radar data*. *Proceedings of the Twenty-sixth International Conference on Radar Meteorology*, American Meteorological Society, pp. 748–750.

Joe, P., R.E. Passarelli and A.D. Siggia, 1995: Second trip unfolding by phase diversity processing. *Preprints of the Twenty-seventh Conference on Radar Meteorology* (Vail, Colorado), American Meteorological Society, Boston, pp. 770–772.

Joint Doppler Operational Project, 1979: *Final Report on the Joint Doppler Operational Project*. NOAA Technical Memorandum, ERL NSSL-86, Norman, Oklahoma, National Severe Storms Laboratory.

Joss, J. and A. Waldvogel, 1990: Precipitation measurement and hydrology. In: *Radar in Meteorology* (D. Atlas, ed.), American Meteorological Society, Boston, pp. 577–606.

Joss, J. and R.W. Lee, 1993: Scan strategy, clutter suppression calibration and vertical profile corrections. *Preprints of the Twenty-sixth Conference on Radar Meteorology* (Norman, Oklahoma), American Meteorological Society, Boston, pp. 390–392.

Keeler, R.J., C.A. Hwang and E. Loew, 1995: Pulse compression weather radar waveforms. *Preprints of the Twenty-seventh Conference on Radar Meteorology* (Vail, Colorado), American Meteorological Society, Boston, pp. 767–769.

Keenan, T.D. and S.J. Anderson, 1987: Some examples of surface wind field analysis based on Jindalee skywave radar data. *Australian Meteorological Magazine*, 35, pp. 153–161.

Leber, G.W., C.J. Merrit, and J.P. Robertson, 1961: WSR-57 Analysis of Heavy Rains. *Preprints of the Ninth Weather Radar Conference*, American Meteorological Society, Boston, pp. 102–105.

Lee, R., G. Della Bruna and J. Joss, 1995: Intensity of ground clutter and of echoes of anomalous propagation and its elimination. *Preprints of the Twenty-seventh Conference on Radar Meteorology* (Vail, Colorado), American Meteorological Society, Boston, pp. 651–652.

Lemon, L.R., D.W. Burgess and R.A. Brown, 1978: Tornadic storm airflow and morphology derived from single-Doppler radar measurements. *Monthly Weather Review*, Volume 106, pp. 48–61.

Leone, D.A., R.M. Endlich, J. Petriceks, R.T.H. Collis and J.R. Porter, 1989: Meteorological considerations used in planning the NEXRAD network. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Volume, 70, pp. 4–13.

Lhermitte, R. and D. Atlas, 1961: Precipitation motion by pulse Doppler radar. *Preprints of the Ninth Weather Radar Conference*, American Meteorological Society, Boston, pp. 218–233.

Makihara, Y., 2000: Algorithms for precipitation nowcasting focused on detailed analysis using radar and raingauge data. *Technical Report of the*

Meteorological Research Institute, JMA, 39, pp. 63–111.

Marshall, J.S. and K.L.S. Gunn, 1952: Measurement of snow parameters by radar. *Journal of Meteorology*, Volume 9, pp. 322–327.

Marshall, J.S. and W.M. Palmer, 1948: The distribution of raindrops with size. *Journal of Meteorology*, Volume 5, pp. 165–166.

Melnikov, V., D.S. Zrnic, R.J. Dovink and J.K. Carter, 2002: Status of the dual polarization upgrade on the NOAA's research and development WSR-88D. *Preprints of the Eighteenth International Conference on Interactive Information Processing Systems* (Orlando, Florida), American Meteorological Society, Boston, pp. 124–126.

Michelson, M., W.W. Schrader and J.G. Wilson, 1990: Terminal Doppler weather radar. *Microwave Journal*, Volume 33, Number 2, pp. 139–148.

Mie, G., 1908: Beiträge zur Optik träber Medien, speziell kolloidaler Metalläsungen. *Annalen der Physik*, 25, pp. 377–445.

Mueller, C.K. and R.E. Carbone, 1987: Dynamics of a thunderstorm outflow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, Volume 44, pp. 1879–1898.

Mueller, E.A., S.A. Rutledge, V.N. Bringi, D. Brunkow, P.C. Kennedy, K. Pattison, R. Bowie and V. Chandrasekar, 1995: CSU-CHILL radar upgrades. *Preprints of the Twenty-seventh Conference on Radar Meteorology* (Vail, Colorado), American Meteorological Society, Boston, pp. 703–706.

Neff, E.L., 1977: How much rain does a rain gage gage? *Journal of Hydrology*, Volume 35, pp. 213–220.

Passarelli, R.E., Jr., P. Romanik, S.G. Geotis and A.D. Siggia, 1981: Ground clutter rejection in the frequency domain. *Preprints of the Twentieth Conference on Radar Meteorology* (Boston, Massachusetts), American Meteorological Society, Boston, pp. 295–300.

Probert-Jones, J.R., 1962: The radar equation in meteorology. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Volume 88, pp. 485–495.

Ray, P.S., C.L. Ziegler, W. Bumgarner and R.J. Serafin, 1980: Single- and multiple-Doppler radar observations of tornadic storms. *Monthly Weather Review*, Volume 108, pp. 1607–1625.

Rinehart, R.E., 1991: *Radar for Meteorologists*. Grand Forks, North Dakota, University of North Dakota, Department of Atmospheric Sciences.

Ruggiero, F.H. and R.J. Donaldson, Jr., 1987: Wind field derivatives: A new diagnostic tool for analysis of hurricanes by a single Doppler radar. *Preprints of the Seventeenth Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology* (Miami, Florida), American Meteorological Society, Boston, pp. 178–181.

Sauvageot, H., 1982: *Radarmétéorologie*. Eyrolles, Paris.

Sauvageot, H., 1994: Rainfall measurement by radar: A review. *Atmospheric Research*, Volume 35, pp. 27–54.

Seliga, T.A. and V.N. Bringi, 1976: Potential use of radar differential reflectivity measurements at orthogonal polarizations for measuring precipitation. *Journal of Applied Meteorology*, Volume 15, pp. 69–76.

Shearman, E.D.R., 1983: Radio science and oceanography. *Radio Science*, Volume 18, Number 3, pp. 299–320.

Skolnik, M.I. (ed.), 1970: *Radar Handbook*. McGraw-Hill, New York.

Smith, P.L., 1990: Precipitation measurement and hydrology: Panel report. *In: Radar in Meteorology*. (D. Atlas, ed.), American Meteorological Society, Boston, pp. 607–618.

Smith, P.L., 1995: Dwell time considerations for weather radars. *Preprints of the Twenty-seventh Conference on Radar Meteorology* (Vail, Colorado), American Meteorological Society, Boston, pp. 760–762.

Strauch, R.G., 1981: Comparison of meteorological Doppler radars with magnetron and klystron transmitters. *Preprints of the Twentieth Conference on Radar Meteorology* (Boston, Massachusetts), American Meteorological Society, Boston, pp. 211–214.

Ulbrich, C.W. and D. Atlas, 1984: Assessment of the contribution of differential polarization to improve rainfall measurements. *Radio Science*, Volume 19, Number 1, pp. 49–57.

Wilson, J.W. and W.E. Schreiber, 1986: Initiation of convective storms at radar-observed boundary-layer convergence lines. *Monthly Weather Review*, Volume 114, pp. 2516–2536.

Wood, V.T. and R.A. Brown, 1986: Single Doppler velocity signature interpretation of nondivergent environmental winds. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Volume 3, pp. 114–128.

World Meteorological Organization, 1985: *Use of Radar in Meteorology* (G.A. Clift). Technical Note No. 181, WMO-No. 625, Geneva.

Wurman, J., M. Randall and C. Burghart, 1995: Real-time vector winds from a bistatic Doppler radar network. *Preprints of the Twenty-seventh Conference on Radar Meteorology* (Vail, Colorado), American Meteorological Society, Boston, pp. 725–728.

Zrnic, D.S. and S. Hamidi, 1981: *Considerations for the Design of Ground Clutter Cancelers for Weather Radar*. Report DOT/FAA/RD-81/72, NTIS, pp. 77.

Zrnic, D.S. and A.V. Ryzhkov, 1995: Advantages of rain measurements using specific differential phase. *Preprints of the Twenty-seventh Conference on Radar Meteorology* (Vail, Colorado), American Meteorological Society, pp. 35–37.

ГЛАВА 10

МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ШАРЫ-ЗОНДЫ

10.1 ОБОЛОЧКИ

10.1.1 Основные виды оболочек

В метеорологии используются следующие два основных типа оболочек:

(a) шары-пилоты, применяемые для визуальных измерений ветра на высотах и высоты нижней границы облаков, обычно поднимают небольшой груз и поэтому значительно меньше радиозондовых баллонов. Они почти всегда представляют собой эластичный шар, а основное требование к ним, помимо способности достигать достаточной высоты, заключается в том, что при подъеме они должны сохранять строго шарообразную форму;

(b) оболочки, используемые для подъема записывающих или передающих приборов при регулярных аэрологических наблюдениях, как правило, имеют шарообразную форму и могут растягиваться. Обычно они известны как радиозондовые баллоны или шары-зонды. Их размер и качество должны обеспечивать подъем требуемого груза (обычно от 200 г до 1 кг) на высоту до 35 км (ВМО, 2002) со скоростью подъема, при которой обеспечивается достаточная вентиляция датчиков и измерительных элементов. Для измерения ветра на высотах радиолокационными методами используются большие шары-пилоты (100 г) или шары-зонды, причем размер оболочек зависит от массы поднимаемого оборудования и от его аэродинамических характеристик.

Оболочки других типов, используемые для специальных целей, в этой главе не описываются. Уравновешенные шары-зонды, которые поднимаются и держатся в воздухе на заранее определенном уровне, делают из нерастягивающегося материала. Большие шары-зонды постоянного уровня при запуске наполняются не в полном объеме. Шары-зонды постоянного уровня со сверхвысоким давлением наполняются при запуске до полного растяжения. Тетроны представляют собой небольшие уравновешенные шары-зонды сверхвысокого давления четырехгранной формы, которые используются для изучения траекторий. Использование привязных аэростатов для получения профилей обсуждается в главе 5 части II.

10.1.2 Материалы для оболочек и их свойства

Наилучшими материалами для изготовления растягиваемых оболочек являются высококачественный природный каучуковый латекс и синтетический латекс, основанный на полихлоропрене. Изделия из натурального латекса держат форму лучше, чем полихлоропреновые, и являются более прочными. Их также можно изготовлять из более толстой пленки для придания им определенных характеристик. Они менее подвержены воздействию температуры, но в большей степени реагируют на озон и ультрафиолетовое излучение на больших высотах, и срок хранения их меньше. Оба материала могут смешиваться с различными добавками для увеличения срока их хранения, повышения прочности и улучшения их характеристик при низких температурах как во время хранения, так и в ходе полета, а также для того, чтобы на них меньше сказывалось влияние озона и ультрафиолетового излучения. В процессе изготовления оболочек, предназначенных для наполнения водородом, в качестве меры предохранения от взрыва можно добавлять антистатик.

Существуют два основных способа изготовления растяжимых оболочек. Оболочка может быть произведена путем погружения формы в латексную эмульсию или посредством формирования ее на внутренней поверхности полой формы. В последнем случае можно изготовить более однородные по толщине оболочки, что желательно для достижения больших высот, поскольку при этом оболочка растягивается; горловина может изготовляться как единое целое с остальной частью оболочки, что дает возможность избежать образования возможного слабого участка.

Нерастягивающимся материалом, используемым для производства уравновешенных шаров-зондов, является полиэтилен.

10.1.3 Технические характеристики оболочек

Готовые оболочки должны быть свободны от посторонних вкраплений, мельчайших проколов или других дефектов; они также должны быть однородными и иметь одинаковую толщину материала. Диаметр их горловины должен составлять 1 – 5 см, а

длина 10 – 20 см в зависимости от размера оболочки; горловина радиозондовой оболочки должна выдерживать воздействие с силой в 200 Н без разрыва. Для того чтобы уменьшить возможность отрыва горловины, важно, чтобы толщина материала оболочки постепенно увеличивалась по направлению к горловине. Резкое изменение толщины уменьшает прочность.

Оболочки различаются по размеру – их номинальной массе в граммах. Фактическая масса отдельных оболочек не должна отличаться от установленной номинальной массы больше чем на десять процентов, а предпочтительнее на пять. Их расширение должно быть, по крайней мере, четырехкратным, а желательно пяти- или шестикратным по отношению к диаметру нерастянутой оболочки, и такое расширение должно сохраняться как минимум в течение часа. Наполненные оболочки должны иметь шарообразную или грушевидную форму.

Важным представляется вопрос о сроке хранения оболочек, особенно в тропических условиях. Существуют испытания на искусственное старение, однако они не дают надежных результатов. Одно из таких испытаний заключается в том, что образцы оболочек держат в печи при температуре 80 °C в течение четырех дней, что примерно соответствует четырем годам хранения в тропиках, после чего эти образцы должны по-прежнему удовлетворять требованиям минимального растяжения. Во избежание быстрой порчи оболочек их следует тщательно упаковывать для предохранения от воздействия света (особенно солнечного), свежего воздуха и экстремальных температур.

Оболочки, изготовленные из синтетического латекса, содержат пластификатор, предотвращающий уплотнение или замерзание пленки при низких температурах, наблюдающихся вблизи тропопаузы и выше нее. Некоторые изготовители предлагают оболочки, предназначенные для использования только в ночное или в дневное время, причем содержание пластификатора в них различно.

10.2 СВОЙСТВА ОБОЛОЧЕК

10.2.1 Скорость подъема

В соответствии с принципом плавучести полная подъемная сила шара определяется подъемной силой находящегося в нем газа следующим образом:

$$T = V(\rho - \rho_g) = 0.523\, D^3 (\rho - \rho_g) \qquad (10.1)$$

где T – полная подъемная сила; V – объем шара; ρ – плотность воздуха; ρ_g – плотность газа; D – диаметр оболочки (предполагается, что она имеет форму шара).

Все величины выражены в единицах СИ. Для водорода на уровне земной поверхности подъемная сила $(\rho - \rho_g)$ составляет около 1,2 кг/м^3. Все величины в уравнении (10.1) изменяются с высотой.

Свободная подъемная сила шара L есть величина, на которую полная подъемная сила превышает общий вес W оболочки и груза (если таковой имеется):

$$L = T - W \qquad (10.2)$$

т. е. это результирующая подъемная сила или дополнительный вес, который оболочка со всеми принадлежностями будет выдерживать, не поднимаясь и не опускаясь.

Используя принцип динамического подобия, можно показать, что скорость подъема V шара в неподвижном воздухе можно выразить общей формулой.

$$V = \frac{qL^n}{(L+W)^{1/3}} \qquad (10.3)$$

в которой q и n зависят от коэффициента торможения и, следовательно, от числа Рейнольдса $V\rho D/\mu$ (где μ – вязкость воздуха). К сожалению, для большого числа метеорологических оболочек на некоторых стадиях полета число Рейнольдса находится в пределах критической области 1.10^5 – 3.10^5, где наблюдается быстрое изменение коэффициента торможения; при этом форма оболочек может отличаться от шарообразной. Поэтому представляется практически нецелесообразным использование простой формулы, применимой для оболочек различных размеров и имеющих разную свободную подъемную силу.

Следовательно, значения q и n в приведенной выше формуле надо определять экспериментальным путем; как правило, очень приближенно их можно принять равными 150 и 0,5 соответственно в том случае, если скорость подъема выражается в метрах в минуту. Другие факторы, такие как изменение плотности воздуха и утечка газа, также могут влиять на скорость подъема и вызывать ощутимые ее колебания в зависимости от высоты.

При зондировании в условиях выпадения осадков или обледенения может потребоваться увеличение свободной подъемной силы почти на 75 % в зависимости от сложности обстановки. Предполагаемую скорость подъема не следует использовать при

выпадении любых осадков, за исключением слабых. Точные данные о скорости подъема обычно не требуются. Однако они необходимы при проведении шаропилотных измерений ветра или определении нижней границы облаков, когда нет других средств определения высоты. Скорость подъема зависит, главным образом, от свободной подъемной силы и, рт сопротивления воздуха, действующего на оболочку и подвес. Сопротивление может быть более важным, особенно в случае отклонения формы оболочки от сферической. Максимальная высота подъема зависит, главным образом, от полной подъемной силы и от размера и качества оболочки.

10.2.2 Эксплуатационные качества оболочек

В нижеследующей таблице приводятся типичные значения характеристик оболочек различных размеров. Они являются весьма приблизительными. Если необходима точная информация о характеристиках конкретных оболочки и подвеса, то она должна быть получена путем анализа фактических запусков. Полезная нагрузка, которую несет оболочка, может быть больше указанной в таблице в том случае, если увеличивается полная подъемная сила. Это достигается путем использования большего объема газа, что приводит к увеличению объема оболочки и, следовательно, влияет на скорость подъема и максимальную высоту.

При выборе оболочки для метеорологических целей руководствуются массой поднимаемого груза, если таковой имеется, скоростью подъема, требуемой высотой, возможным использованием оболочки для визуального слежения, а также облачным покровом в том, что касается ее цвета. Как правило, предпочтительнее высокая скорость подъема – от 300 до 400 м/мин, это позволяет сократить время наблюдения и при необходимости обеспечить достаточную вентиляцию датчиков радиозонда. При выборе оболочки необходимо помнить, что достигаемая высота обычно меньше в тех случаях, когда температура при запуске очень низкая.

При использовании воздушных шаров в регулярных наблюдениях предпочтителен свободный подъем, при котором высота разрыва оптимальна. Например, было установлено, что уменьшение средней скорости подъема от 390 до 310 м/мин при использовании некоторых шаров среднего размера с уменьшенным количеством газа может позволить увеличить высоту разрыва в среднем на 2 км. Полученные данные о высоте разрыва следует сохранять и анализировать, для того чтобы убедиться в оптимальности достигнутых результатов.

Визуальные наблюдения легче проводить при использовании неокрашенных оболочек в ясные солнечные дни и окрашенных в темные тона – в пасмурные дни.

Характеристики оболочки лучше всего определяются по максимальному линейному растяжению, которое она выдерживает до разрыва, и наиболее удобным способом его выражения является соотношение диаметра (или длины окружности) в момент разрыва к диаметру нерастянутой оболочки. Однако характеристики оболочки в полете не всегда совпадают с характеристиками, определенными в ходе испытания на разрыв на земле. На эти характеристики может повлиять неосторожное обращение с оболочкой во время ее наполнения, а также напряжение во время запуска при сильном ветре. В полете на растяжимость оболочки может повлиять потеря эластичности при низкой температуре, химическая активность кислорода и озона и ультрафиолетовое излучение, а также производственные дефекты, например свищи или неоднородность латексной пленки. Однако на практике оболочка, обладающая удовлетворительными качествами, должна выдерживать по меньшей мере четырехкратное

Типичные характеристики оболочек

Вес (г)	10	30	100	200	350	600	1 000	1 500	3 000
Диаметр при выпуске (см)	30	50	90	120	130	140	160	180	210
Полезная нагрузка (г)	0	0	0	250	250	250	250	1 000	1 000
Свободная подъемная сила (г)	5	60	300	500	600	900	1 100	1 300	1 700
Скорость подъёма (м/мин)	60	150	250	300	300	300	300	300	300
Максимальная высота подъёма (км)	12	13	20	21	26	31	34	34	38

растяжение. Толщина пленки при запуске обычно колеблется от 0,1 до 0,2 мм.

Во время подъема внутри оболочки всегда существует небольшое избыточное давление p_1, достигающее нескольких гектопаскалей, обусловленное натяжением каучука. Это устанавливает предел по отношению к внешнему давлению, которое может быть достигнуто. Можно показать, что при одинаковой температуре внутри и вне оболочки предельное давление p описывается выражением:

$$p = \left(\frac{1.07W}{L_0} + 0.075\right) p_1 \cong \frac{Wp_1}{L_0} \qquad (10.4)$$

где W – масса оболочки и аппаратуры, а L_0 – свободная подъемная сила на уровне земной поверхности; и то и другое выражается в граммах. Если оболочка способна достичь высоты, соответствующей p, то на этой высоте она будет дрейфовать.

10.3 ОБРАЩЕНИЕ С ОБОЛОЧКАМИ

10.3.1 Хранение

Очень важно правильно хранить радиозондовые оболочки для того, чтобы их качество не ухудшалось после нескольких месяцев хранения. Рекомендуется ограничивать запасы оболочек тем минимумом, который требуется для оперативных нужд. Там, где это возможно, частые поставки оболочек предпочтительнее, чем закупки их в большом количестве с последующим длительным хранением. Во избежание необходимости использования оболочек, хранившихся длительное время, их следует расходовать в порядке дат их изготовления.

Оптимальная сохранность обычно обеспечивается в течение приблизительно 18 месяцев после изготовления при условии тщательного соблюдения условий хранения. Многие изготовители составляют инструкции к своим оболочкам, которые следует тщательно соблюдать. Однако нижеследующие общие рекомендации применимы для большинства типов радиозондовых оболочек.

Оболочки следует предохранять от прямого воздействия солнечного света и по возможности хранить в темноте. Ни в коем случае нельзя их хранить рядом с источником тепла или озона. Свойства полихлоропреновых оболочек или оболочек, изготовленных из смеси полихлоропрена и натурального каучука, могут ухудшаться при воздействии озона, выделяемого в процессе работы больших электрогенераторов или электродвигателей. Все оболочки следует хранить в их оригинальной упаковке до момента предполетной подготовки. Необходимо следить за тем, чтобы они не соприкасались с маслами или любыми другими веществами, которые могут просочиться сквозь упаковку и повредить оболочку.

Везде, где можно, оболочки следует хранить в помещении при температуре от 15 до 25 °C; некоторые изготовители дают особые указания на этот счет, которым необходимо следовать.

10.3.2 Подготовка к запуску

Оболочки, изготовленные из натурального каучука, перед использованием не требуют специальной тепловой обработки, поскольку натуральный каучук не замерзает при обычных для жилых и служебных помещений температурах. Однако желательно, чтобы оболочки, которые длительное время хранились при температуре 10 °C, выдерживались при комнатной температуре в течение нескольких недель перед их использованием.

Полихлоропреновые оболочки при длительном хранении при температуре ниже 10 °C частично теряют свою эластичность. Для получения наилучших результатов необходимо восстановить эластичность до момента наполнения посредством подготовки оболочки. При этом следует выполнять рекомендации изготовителя. Обычно оболочка помещается в термически изолированную камеру с принудительной циркуляцией воздуха, в которой поддерживаются необходимые температура и влажность, за несколько дней до ее наполнения; в качестве альтернативы можно использовать теплую водяную баню.

На полярных станциях в периоды экстремально низких температур рекомендуется использовать оболочки, обладающие особыми свойствами, позволяющими им сохранять прочность и эластичность в таких условиях.

10.3.3 Наполнение

В том случае, если для запуска шаров не используется пусковое устройство, наполнение оболочек необходимо проводить в специальном помещении, по возможности изолированном от других зданий. Оно должно хорошо проветриваться (например, NFPA, 1999). При использовании водорода важно соблюдать особые меры осторожности (см. раздел 10.6). Из помещения необходимо удалить все источники образования искр, а все электрические выключатели и осветительная арматура должны быть искробезопасными; другие необходимые подробности содержатся в разделе 10.6.2. При использовании гелия в холодную

погоду помещение следует прогреть. Стены, двери и пол должны быть гладкими, и в помещении не должно быть песка и пыли. Отопление мест, используемых для наполнения водородом, можно обеспечивать посредством пара, горячей воды или любых других косвенных средств; в то же время электроотопление, если оно имеется, должно соответствовать национальным электротехническим нормам (например, NFPA 50A для класса I, раздел 2, помещения).

На время наполнения необходимо надеть защитную одежду (см. раздел 10.6.4). Оператор не должен находиться в закрытом помещении, в котором размещена оболочка с водородом. Если двери в помещении закрыты, следует контролировать поступление водорода и наблюдать за операцией наполнения за пределами того помещения, в котором она происходит; двери следует оставить открытыми, если оператор находится в помещении, где наполняется оболочка.

Наполнение оболочек должно производиться медленно, поскольку быстрое растягивание может привести к образованию слабых мест в оболочке шара. Целесообразно иметь специальный редуктор для регулирования подачи газа. Требуемую величину наполнения (свободную подъемную силу) можно определить, используя либо наконечник шланга того же веса, либо такой наконечник, который может быть одним плечом весов, на которых другим плечом будет подъемная сила оболочки. Последний способ менее удобен; исключение составляют случаи, когда требуется учитывать изменения веса оболочек, что вряд ли необходимо в повседневной работе. Полезно иметь вентиль, подогнанный к весовому наполнителю, а в некоторых службах используется дополнительное устройство с клапаном, который может быть отрегулирован таким образом, что он закрывается автоматически при достижении требуемой подъемной силы.

10.3.4 Запуск

Оболочка должна находиться в укрытии до момента запуска. Следует избегать длительного воздействия яркого солнечного света, поскольку это может привести к быстрому ухудшению качества материала оболочки и даже к разрыву, прежде чем шар оторвется от земли. Во время запусков вручную необходимо использовать защитную одежду.

Запуск радиозондовых оболочек при слабом ветре не вызывает особых затруднений. Необходимо позаботиться о том, чтобы отсутствовала опасность столкновения шара и подвешенных приборов с различными препятствиями, прежде чем шар поднимется выше окружающих станцию деревьев и сооружений. Этих трудностей при запуске в значительной степени можно избежать путем тщательного выбора места запуска. Оно должно определяться минимумом препятствий, которые могут затруднить запуск, а сооружения на станции следует проектировать и располагать с учетом преобладающего направления ветра, возможности порывов ветра на площадке для запуска и метелей в районах с холодным климатом.

При сильном ветре рекомендуется также крепить приборы по возможности ближе к оболочке, используя для подвески специальные катушки или разматывающие приспособления. Удобное устройство состоит из катушки, на которую намотан шнур, и шпинделя, который приводит в действие воздушный тормоз или механизм спуска, позволяющий шнуру с подвешенными приборами медленно разматываться в начале полета шара.

Огромное преимущество механических устройств для запуска шаров заключается в том, что их конструкция позволяет обеспечить почти полную безопасность, поскольку оператор не находится рядом с шаром во время наполнения оболочки и запуска. Механические пусковые устройства могут быть автоматизированы в различной степени и даже настолько, что для всей работы по запуску радиозонда не потребуется присутствия оператора. Они могут быть неэффективны при скорости ветра более 20 м/с. Необходимо обеспечить адекватную вентиляцию датчиков радиозонда до его запуска. Желательно иметь такую конструкцию, которая позволит избежать повреждения сооружения в случае пожара или взрыва.

10.4 ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ СНАРЯЖЕНИЕ ДЛЯ ПОДЪЕМА ШАРОВ

10.4.1 Освещение при подъеме в ночное время

Обычно в качестве источника света при подъеме шаров-пилотов в ночное время используются небольшая батарейка от электрического фонарика и лампочка. Как правило, в этом случае подходит батарейка, состоящая из двух гальванических элементов с напряжением 1,5 В или же водоналивной элемент, используемый с лампой накаливания 0,3 А и напряжением 2,5 В. Кроме того, в качестве источника света можно использовать устройство, основанное на принципе химической флуоресценции. Однако для зондирования на больших высотах необходима более мощная система (2 – 3 Вт), снабженная при необходимости простым рефлектором.

Если скорость подъема должна оставаться неизменной при использовании осветительного устройства, то теоретически требуется небольшое увеличение свободной подъемной силы, т. е. полная подъемная сила должна быть увеличена более чем на величину, соответствующую дополнительно поднимаемому весу (см. формулу (10.3). Однако на практике требуемое увеличение, вероятно, меньше рассчитанного, поскольку груз улучшает аэродинамические характеристики и устойчивость оболочки.

Раньше при подъеме в ночное время использовали небольшую свечу в фонарике из вощеной бумаги, подвешенном примерно на расстоянии 2 м от оболочки. Однако в этом случае возникает опасность воспламенения или взрыва при приближении свечи к оболочке или источнику водорода, а также опасность возникновения лесного пожара и других значительных пожаров при возвращении оболочки на землю. Поэтому использование свечей категорически не рекомендуется.

10.4.2 Парашюты

Для уменьшения опасности повреждений, наносимых зондирующей аппаратурой при падении, ее обычно снабжают простым парашютом. Основные требования сводятся к надежности его раскрытия и уменьшению скорости падения, которая не должна превышать 5 м/с у земной поверхности. Кроме того, парашют должен быть водонепроницаемым. Для приборов массой до 2 кг требуется парашют, сделанный из водонепроницаемой бумаги или пластиковой пленки с куполом диаметром около 2 м и длиной строп около 3 м. Для предотвращения скручивания строп в полете целесообразно укрепить их легким обручем диаметром около 40 см из дерева, пластмассы или металла, который размещается над точкой их соединения.

Если для определения ветра используется радиолокационный отражатель, который является частью груза, то он может быть прикреплен к парашюту и препятствовать скручиванию строп. Стропы и другие приспособления должны быть способны выдержать напряжение при раскрытии парашюта. При использовании радиозондов небольшой массы (менее 250 г) обеспечивать достаточное торможение в ходе спуска может сам радиолокационный отражатель.

10.5 ГАЗЫ ДЛЯ НАПОЛНЕНИЯ ОБОЛОЧЕК

10.5.1 Общие сведения

Наиболее подходящими для метеорологических целей газами являются гелий и водород, причем применение первого предпочтительнее из-за отсутствия опасности взрыва и воспламенения. Однако поскольку использование гелия ограничено немногими странами, имеющими богатые природные ресурсы, более широкое применение получил водород (см. ВМО, 1982). Плавучесть (общая подъемная сила) гелия составляет 1,115 кг/м^3 при давлении 1 013 гПа и температуре 15 °С. Соответствующее значение для чистого водорода составляет 1,203 кг/м^3, а для поступающего в продажу водорода эта цифра несколько ниже.

Следует отметить, что в настоящее время на борту судов больше не разрешается использовать водород в соответствии с общими требованиями техники безопасности на море. В этой ситуации дополнительные расходы на использование гелия должны быть оценены в сопоставлении с опасностью для жизни, а также с дополнительными расходами на страхование, если таковое может быть организовано.

За исключением транспортных расходов и трудностей транспортировки доставка сжатого газа в баллонах является наиболее удобным способом обеспечения газом метеорологических станций. Однако там, где расходы или трудности доставки баллонов исключительно велики, использование на станции генератора водорода (см. раздел 10.5.3) не должно вызывать больших трудностей.

10.5.2 Газовые баллоны

Вероятно, наиболее удобными для общего пользования являются стальные газовые баллоны емкостью 6 м^3 газа под давлением 18 МПа (10 МПа в тропиках). Однако при большом расходе газа, например, на радиозондовых станциях, рекомендуется использовать баллоны большей емкости или ряд стандартных баллонов, присоединенных при помощи коллектора к одному выпускному клапану. Эти меры значительно уменьшат трудоемкость работы персонала. Чтобы не путать баллоны с водородом с баллонами, содержащими другие газы, следует окрашивать их в особый цвет (во многих странах используется красный). Их выпускные вентили должны иметь левую резьбу, чтобы отличить их от баллонов с невоспламеняющимися газами. Баллоны должны быть снабжены колпаками для защиты вентилей при перевозке.

Газовые баллоны следует испытывать регулярно с интервалами от двух до пяти лет, в зависимости от действующих национальных инструкций. Для этого их необходимо подвергать воздействию внутреннего давления, по крайней мере на 50 % превышающего их нормальное рабочее давление. Баллоны с водородом не должны подвергаться

нагреванию, и в тропиках их следует защищать от прямой солнечной радиации. Желательно, чтобы они хранились в хорошо вентилируемом помещении, что позволит обеспечить удаление водорода при любой утечке наружу.

10.5.3 Генераторы водорода

Водород можно получать на месте с помощью различного типа генераторов водорода. Все генераторные установки и средства для хранения водорода должны быть отчетливо маркированы и иметь соответствующие предупредительные знаки согласно национальным правилам (например, «Этот агрегат содержит водород»; «Водород – Воспламеняющийся газ – Не курить – Открытый огонь запрещен»). Нижеследующие процессы взаимодействия оказались наиболее пригодными для производства водорода в метеорологических целях:

(a) ферросилиций и каустическая сода с водой;
(b) алюминий и каустическая сода с водой;
(c) гидрид кальция и вода;
(d) зерна железистого магния и вода;
(e) жидкий аммиак с горячим платиновым катализатором;
(f) метанол и вода с горячим катализатором;
(g) электролиз воды.

Большинство используемых в этих процессах химических веществ являются опасными, и необходимо скрупулезно соблюдать соответствующие национальные требования и инструкции по работе с такими веществами, включая правильные маркировки и предупреждения. Они требуют специального транспорта, особых условиях хранения и обращения с этими веществами, а также их удаления. Многие из этих веществ вызывают коррозию, и после их использования выпадает осадок. Если указанные реакции тщательным образом не контролируются, то они могут привести к выделению избыточного тепла или повышению давления. Метанол – ядовитая разновидность спирта; если его выпить, что возможно при использовании его лицами, злоупотребляющими спиртным, это может привести к смертельному исходу.

В частности, широко используемая каустическая сода требует чрезвычайной осторожности со стороны оператора, который должен быть соответствующим образом защищен, особенно глаза, от контакта не только с раствором, но и с мелкой пылью, которая может подняться при закладке твердого материала в генератор. При несчастном случае необходимо иметь под рукой флакон с жидкостью для промывки глаз и нейтрализующее вещество, например уксус.

Некоторые из химических реакций, использующихся при этой работе, протекают при высоком давлении, и, следовательно, велик риск несчастного случая. Генераторы высокого давления должны проверяться каждые два года под давлением, по крайне мере вдвое превышающим рабочее давление. Они должны быть обеспечены предохранителями для сбрасывания излишнего давления. Предохранители обычно представляют собой разрывной диск, и очень важно строго соблюдать инструкцию по эксплуатации в отношении материала, размера и формы дисков, а также частоты их замены. Даже при надежном предохранителе может произойти выброс горячего раствора. Генераторы высокого давления следует тщательно очищать до перезарядки, поскольку остатки предыдущей закладки могут существенно уменьшить объем генератора и, следовательно, увеличить рабочее давление до значения, превышающего проектный запас прочности.

К сожалению, гидрид кальция и железистый магний, преимуществом которых является отсутствие необходимости использования каустической соды, дороги, поэтому они могут применяться только для специальных целей. Поскольку эти два вещества вытесняют водород из воды, их необходимо хранить в водонепроницаемых контейнерах. При использовании катализаторов необходимо позаботиться о том, чтобы избежать их загрязнения.

Все системы производят газ под давлением, достаточным для наполнения оболочек. Однако скорость получения газа при некоторых процессах (особенно, при электролизе) слишком мала, и газ необходимо произвести и хранить до того, как он понадобится, либо в сжатом виде, либо в газгольдере.

Методы, основанные на электролизе воды или каталитическом крекинге метанола с добавлением воды, привлекательны вследствие их относительной безопасности и умеренных текущих расходов, а также некоррозийной природе используемых веществ. Для этих двух процессов и процесса с использованием жидкого аммиака требуется электроэнергия. Оборудование является достаточно сложным и должно тщательно обслуживаться; необходима детальная ежедневная проверка эффективности работы систем контроля безопасности. Содержание минеральных веществ в воде для электролиза должно быть низким.

10.6 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОДОРОДА И МЕРЫ ПРЕДОСТОРОЖНОСТИ

10.6.1 Общие сведения

Водород может легко воспламениться от малейшей искры; горит он почти невидимым пламенем. Смесь

воздуха с водородом может гореть в широком диапазоне концентрации по объему – от 4 до 74 % (NFPA, 1999) — и взрываться при концентрации 18 – 59 %. В любом случае находящийся поблизости оператор может получить сильные ожоги всех незащищенных участков кожи, а при взрыве отброшен к стене или на землю и получить серьезные травмы.

Можно исключить риск несчастного случая путем тщательно продуманных процедур и использования надлежащего оборудования при условии, что эти процедуры скрупулезно соблюдаются и оборудование поддерживается в исправном состоянии (Gremia, 1977; Ludtke и Saraduke, 1992; NASA, 1968). Однако вопросам обеспечения безопасности зданий, в которых получают и хранят водород, или площадок, где наполняют или запускают шары, не всегда уделяется достаточно внимания (см. следующий раздел). В частности, необходимы комплексное обучение и постоянный тщательный мониторинг и инспекция, для того чтобы обеспечить соблюдение операторами соответствующих процедур.

Большое преимущество автоматических пусковых установок для запуска шаров (см. раздел 10.3.4) заключается в том, что они обеспечивают практически защиту оператора и предотвращают получение им травм за счет того, что оператор не присутствует там, где находится водород.

Важным отправным моментом для рассмотрения мер предосторожности в обращении с водородом является соблюдение национальных стандартов и практических правил, касающихся поведения во взрывоопасной среде вообще. Дополнительная информация о мерах предосторожности, которые необходимо соблюдать, содержится в публикациях, посвященных проблеме опасности взрыва в больницах и на ряде производств, где существуют подобные проблемы. Оператор никогда не должен оставаться в закрытом помещении, где находится наполненная оболочка. Эта глава содержит и другие рекомендации по вопросам безопасности.

10.6.2 Проектирование помещения

Необходимо соблюдать меры предосторожности во Избежание накопления свободного водорода и статических зарядов, а также появления искр в любом помещении, где получают, хранят или используют водород. Необходимо избежать накопления водорода даже в случае разрыва оболочки в укрытии при ее наполнении (ВМО, 1982).

Обеспечение мер безопасности должно быть частью строительного проектирования зданий для работы с водородом (NFPA, 1999; SAA, 1985). Климатические условия и национальные нормы и правила служат ограничительными факторами, диктующими выбор тех или иных конструкций и материалов, наиболее подходящих для строительства безопасных помещений для работы с водородом. Правила носят рекомендательный характер и используются в качестве основы для эффективных практических действий. Нормы публикуются в виде технических условий на материалы, изделия и правила техники безопасности. Они включают описание противопожарной арматуры электрического освещения, электрического оборудования для взрывоопасной среды, вентиляции помещений со взрывоопасной средой и использования пластиковых окон, разрывных дисков и т. д.

Как правила, так и нормы должны содержать полезную и нужную информацию в отношении проектных решений относительно помещений для работы с водородом Кроме того, они должны соответствовать рекомендованной национальной практике. Национальная служба стандартов должна осуществлять руководство проектированием сооружений для работы с водородом и проверкой безопасности существующих сооружений, особенно в следующих аспектах:

(a) оптимальное расположение водородных систем;
(b) огнестойкость предложенных материалов и их соответствие существующим требованиям;
(c) требования к вентиляционному оборудованию, включая легкую конструкцию крыши для обеспечения удаления водорода и продуктов взрыва через самую высокую точку здания;
(d) соответствующее электрооборудование и электропроводка;
(e) противопожарная защита (огнетушители и сигнальные устройства);
(f) обеспечение возможности контроля оператором наполнения оболочки вне пределов того помещения, в котором она наполняется.

Необходимо принять меры к тому, чтобы свести к минимуму возможность образования искр в помещениях, где используется водород. Поэтому любая электрическая система (выключатели, осветительная арматура, электропроводка) должна находиться за пределами этих помещений. В противном случае необходимо иметь специальные искронепроницаемые выключатели, герметизированные во избежание доступа водорода, а также соответствующую электропроводку. Рекомендуется также освещать помещение через окна светильниками, находящимися вне этих помещений. По этим же причинам любые используемые инструменты не должны давать искру. Обувь наблюдателя также не должна давать искру при трении и следует обеспечить соответствующую молниезащиту.

При использовании систем пожаротушения в любой части здания необходимо учитывать возможную опасность в том случае, если в помещении все еще присутствует водород, после того как пожар был потушен. Системы обнаружения наличия водорода существуют и могут использоваться, например, для отключения электроэнергии от генератора водорода при его концентрации на уровне 20 % низшего предела взрывоопасной концентрации, а затем включения другого сигнального устройства при концентрации на уровне 40 % нижнего взрывоопасного предела.

Вокруг генератора, мест хранения и наполнения оболочек должна быть обозначена опасная зона, вход в которую разрешается только людям в защитной одежде (см. раздел 10.6.4).

Устройство для запуска шаров (раздел 10.3.4), как правило, не требует специального помещения для наполнения оболочек и в значительной степени упрощает конструкцию помещений для работы с водородом.

10.6.3 Статические заряды

Опасность работ, связанных с наполнением и запуском оболочек, можно значительно снизить путем защиты от статических зарядов помещений, где наполняются оболочки, одежды наблюдателя и самой оболочки. Loeb (1958) сообщает информацию о процессе статистической электризации. Хорошее заземление оборудования для получения водорода и арматуры, находящейся в помещениях, где наполняют оболочки, является успешным средством борьбы со статическими зарядами. Специальные антистатические зажимы на одежде наблюдателей могут удалять заряды, образующиеся на одежде (ВМО, 1982).

С зарядами на оболочке справиться труднее. Ткани, из которых изготавливают оболочки, в особенности чистый латекс, являются очень хорошими изоляторами. Статические заряды образуются тогда, когда два изолирующих материала, соприкасающихся друг с другом, отделяются один от другого. Однократное касание одежды наблюдателя может привести к разряду в 20 кВ, что более чем достаточно, для того чтобы поджечь смесь воздуха с водородом, если этот разряд происходит в виде эффективной искры. Могут потребоваться многие часы, для того чтобы заряды на оболочке прошли сквозь ткань в землю или, естественно, в окружающий воздух. Было также установлено, что при разрыве оболочки расслоение ткани вдоль разрыва может давать искры, энергия которых достаточна для того, чтобы поджечь смесь.

Образование электростатических зарядов следует предотвращать, а образовавшиеся заряды – удалять путем обрызгивания водой оболочки во время наполнения, погружения оболочек в раствор антистатика (с высушиванием или без высушивания перед использованием), посредством использования оболочек с антистатической добавкой в латексе или путем обдува поверхности оболочки ионизированным воздухом. Простого заземления горловины оболочки недостаточно.

Максимальный электростатический потенциал, который может образоваться на поверхности оболочки, уменьшается с увеличением влажности, однако масштабы этого эффекта пока недостаточно хорошо установлены. Некоторые эксперименты, проведенные с наполненными оболочками массой 20 г, показывают, что при относительной влажности воздуха свыше 60 % представляется маловероятным возникновение искры с такой энергией, что она сможет вызвать воспламенение смеси водорода с кислородом. Согласно другим экспериментам, соответствующий предел относительной влажности составляет от 50 до 76 %. Однако есть и такие исследования, которые показывают, что искры с достаточной энергией могут возникать даже при более высокой относительной влажности. Можно предположить, что статические разряды маловероятны при относительной влажности, превышающей 70 %, однако полагаться на это не стоит (см. Cleves, Sumner and Wyatt, 1971).

Настоятельно рекомендуется обрызгивание оболочек тонкораспыленной водой, поскольку смачивание и заземление оболочки приводит к удалению большей части статических зарядов с увлажненных частей поверхности. Обрызгиватели должны быть спроектированы таким образом, чтобы увлажнять как можно большую часть площади оболочки и обеспечивать постоянный сток воды с оболочки на пол. При закрытых дверях влажность внутри помещения для наполнения оболочек может подняться до 75 % или выше, что приводит к уменьшению вероятности возникновения искр, обладающих достаточной энергией для того, чтобы вызвать возгорание. Запуск оболочек следует проводить сразу же после прекращения обрызгивания и открытия дверей помещения, в котором осуществляется наполнение.

Другие меры по уменьшению образования статических зарядов сводятся к следующему (ВМО, 1982):

(a) помещение должно быть оснащено системой полного заземления, причем вся арматура, оборудование для получения водорода и молниеотвод должны иметь отдельное заземление, которое должно соответствовать национальным стандартам для заземляющих электродов. Необходимо предусматривать удаление электрических зарядов с пола;

(b) для наблюдателей необходимо предусмотреть места для снятия статических зарядов;
(c) окна следует регулярно протирать раствором антистатика;
(d) операторам не следует носить одежду из синтетики или изолирующую обувь. Хорошей практикой является ношение обуви, частично проводящей электричество;
(e) следует свести к минимуму контакт наблюдателя с оболочкой; это может быть достигнуто путем установки устройства наполнения на высоте не менее 1 м от пола.

10.6.4 Защитная одежда и средства оказания первой помощи

Надлежащую защитную одежду следует носить во всех случаях использования водорода, в ходе всех работ, включая процессы его получения, работу с баллонами, и при наполнении и запуске оболочек. Одежда должна включать в себя легкий огнестойкий плащ с капюшоном, изготовленного из несинтетического, антистатического материала и маску для защиты нижней части лица, защитные очки, хлопчатобумажные перчатки и любую рекомендованную на местах огнестойкую одежду (см. Hoschke and others, 1979).

Необходимо иметь средства, оказания первой помощи, соответствующие используемому оборудованию. Они должны включать средства первой помощи при ожогах и переломах. При использовании химикатов следует иметь под рукой соответствующие нейтрализующие растворы, например лимонную кислоту, на случай ожогов каустической содой. Должен быть в наличии аппарат для промывки глаз, готовый к немедленному использованию (ВМО, 1982).

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Atmospheric Environment Service (Canada), 1978: *The Use of Hydrogen for Meteorological Purposes in the Canadian Atmospheric Environment Service*, Toronto.

Cleves, A.C., J.F. Sumner and R.M.H. Wyatt, 1971: The Effect of Temperature and Relative Humidity on the Accumulation of Electrostatic Charges on Fabrics and Primary Explosives. *Proceedings of the Third Conference on Static Electrification*, (London).

Gremia, J.O., 1977: *A Safety Study of Hydrogen Balloon Inflation Operations and Facilities of the National Weather Service*. Trident Engineering Associates, Annapolis, Maryland.

Hoschke, B.N., and others, 1979: *Report to the Bureau of Meteorology on Protection Against the Burn Hazard from Exploding Hydrogen-filled Meteorological Balloons*. CSIRO Division of Textile Physics and the Department of Housing and Construction, Australia.

Loeb, L.B., 1958: *Static Electrification*, Springer-Verlag, Berlin.

Ludtke, P. and G. Saraduke, 1992: *Hydrogen Gas Safety Study Conducted at the National Weather Service Forecast Office*. Norman, Oklahoma.

National Aeronautics and Space Administration, 1968: *Hydrogen Safety Manual*. NASA Technical Memorandum TM-X-52454, NASA Lewis Research Center, United States.

National Fire Protection Association, 1999: *NFPA 50A: Standard for Gaseous Hydrogen Systems at Consumer Sites*. 1999 edition, National Fire Protection Association, Quincy, Maryland.

National Fire Protection Association, 2002: *NFPA 68: Guide for Venting of Deflagrations.* 2002 edition, National Fire Protection Association, Batterymarch Park, Quincy, Maryland.

National Fire Protection Association, 2005: *NFPA 70, National Electrical Code.* 2005 edition, National Fire Protection Association, Quincy, Maryland.

National Fire Protection Association, 2006: *NFPA 220, Standard on Types of Building Construction.* 2006 edition, National Fire Protection Association, Quincy, Maryland.

Rosen, B., V.H. Dayan and R.L. Proffit, 1970: *Hydrogen Leak and Fire Detection: A Survey*. NASA SP-5092.

Standards Association of Australia, 1970: AS C99: *Electrical equipment for explosive atmospheres – Flameproof electric lightning fittings*.

Standards Association of Australia, 1980: AS 1829: *Intrinsically safe electrical apparatus for explosive atmospheres*.

Standards Association of Australia, 1985: AS 1482: Electrical equipment for explosive atmospheres – *Protection by ventilation – Type of protection V*.

Standards Association of Australia, 1995: ASNZS 1020: *The control of undesirable static electricity.*

Standards Association of Australia, 2004: AS 1358: *Bursting discs and bursting disc devices – Application selection and installation*.

World Meteorological Organization, 1982: *Meteorological Balloons: The Use of Hydrogen for Inflation of Meteorological Balloons*. Instruments and Observing Methods Report No. 13, Geneva.

ГЛАВА 11

МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ В ГОРОДАХS

11.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Возрастает потребность в проведении метеорологических наблюдений в городских районах. Городское население продолжает увеличиваться, и к метеорологическим службам все чаще обращаются за предоставлением метеорологических данных для поддержки детальных прогнозов гражданам, а также для таких областей как городское планирование и архитектура, энергосбережение, транспорт и связь, качество воздуха и здравоохранение, ливневая нагрузка и ветроэнергетика, страхование и чрезвычайные меры. В то же время метеорологические службы сталкиваются с трудностями при проведении в городах наблюдений, которые не вызывают сомнений. Это объясняется тем, что большинство действующих метеорологических площадок не соответствуют стандартным требованиям руководящих документов относительно выбора места размещения и установки приборов, изложенных в части I настоящего Руководства, из-за искажения воздушного потока и радиационного обмена зданиями и деревьями, искусственным поверхностным покрытием, теплом отработавших газов и водяным паром, образующимися в результате деятельности человека.

В этой главе содержится информация, содержащая рекомендации по выбору площадок, установке метеорологической станции и интерпретации данных, поступающих из городского района. В частности, в ней рассматривается случай «эталонной » климатической станции. Несмотря на сложный и неоднородный характер городской окружающей среды, проведение полезных и повторяющихся наблюдений возможно. Любая площадка для наблюдений представляет собой уникальную возможность. Для обеспечения надежности данных наблюдений, необходимо внимательно следовать определенным принципам и концепциям, которые являются особенными для городских районов. Кроме того, от лица, которое устанавливает и эксплуатирует данную станцию, требуется применение этих принципов и концепций разумным и гибким образом, чтобы учитывать реальности наблюдаемой окружающей среды в конкретном месте. Жесткие «правила» дают мало пользы. Необходимость проявлять гибкость несколько противоречит общему понятию стандартизации, которая поощряется в качестве практики ВМО в области наблюдений. В городских районах приходится иногда идти на установку приборов над нестандартными поверхностями на нестандартных высотах, разбивать наблюдения между двумя или несколькими местами или быть ближе, чем обычно, к зданиям или местам выделения тепла.

Единицы измерения и приборы, используемые в городских районах, являются такими же, что и для других видов наблюдений окружающей среды. В этой связи в настоящей главе рассматриваются только те аспекты, которые являются уникальными для городских районов, или те аспекты, которые затрудняют проведение наблюдений из-за характерных особенностей городов, такие как выбор места размещения, установка приборов и документирование метаданных.

Сроки и частота проведения наблюдений, а также кодирование сводок, должны следовать соответствующим стандартам (ВМО, 1983; 1988; 1995; 2003b; 2006).

Следует соблюдать рекомендации, содержащиеся в главе 1 части II, в том, что касается автоматизированных станций и требований к кодированию и передаче сообщений, контроля качества, технического обслуживания (учитывая некоторые специальные требования для городской окружающей среды) и калибровки.

11.1.1 Определения и концепции

11.1.1.1 Обоснование необходимости станции

Четкое объяснение причины для создания городской станции наблюдений имеет существенное значение для успеха ее работы. Двумя самыми обычными причинами являются желание представить метеорологическую среду в определенном месте для общих климатологических целей и желание обеспечить потребность в данных конкретного пользователя. В обоих случаях должны быть определены соответствующие пространственные и временные масштабы, и, как описано ниже, места размещения станции и установка приборов в каждом случае могут весьма отличаться друг от друга.

11.1.1.2 Горизонтальные масштабы

Ничто не является более важным исходным фактором для успешной работы городской станции

наблюдений, как понимание масштаба. Интерес представляют собой три масштаба (Oke, 1984; рисунок 11.1):

(a) микромасштаб: каждая поверхность и объект имеют свой собственный микроклимат как на них самих, так и в их непосредственной близости. Температуры поверхности и воздуха могут отличаться на несколько градусов на очень малых расстояниях, даже миллиметровых, а значительное возмущение воздушного потока может быть вызвано даже небольшими объектами. Характерные масштабы городского микроклимата связаны с размерами отдельных зданий, деревьев, дорог, улиц, дворов, садов и т.д. Характерные масштабы лежат в пределах от менее 1 м до сотен метров. Руководящие указания, содержащиеся в части I настоящего Руководства, специально сформулированы таким образом, чтобы предотвратить микроклиматические воздействия. Рекомендации по климатическим станциям подготовлены таким образом, чтобы стандартизировать все места размещения, насколько это практически возможно. Этим объясняется использование стандартной высоты измерения, единого характера поверхностного покрова, минимальных расстояний до препятствий и минимального закрытия горизонта. Цель заключается в обеспечении климатических наблюдений, свободных от внешних микроклиматических сигналов, и соответственно получение характеристик локального (местного) климата. В случае действия более строгих стандартов станции первого порядка могут быть способны представлять данные в синоптических пространственных и временных масштабах. Эти данные могут быть использованы для оценки климатических тенденций и в более крупных масштабах. Если не ставятся весьма конкретные задачи, то городским станциям следует также избегать микроклиматических воздействий; однако добиться этого трудно;

(b) локальный (местный) масштаб: это масштаб, в котором стандартные климатические станции должны проводить мониторинг. Он включает такие ландшафтные характеристики, как топография, но исключает микромасштабные воздействия. В городских районах под этим понимается климат соседних районов, которые характеризуются аналогичными типами городского развития (поверхностное покрытие, высота и площадь застройки, вид деятельности). Сигнал представляет собой единое характерное сочетание микроклиматических воздействий, возникающих от района источника вблизи площадки наблюдений. Район источника – это часть верхней поверхности, которая определяет основные свойства потока или концентрации измеряемых метеорологических переменных (Schmid, 2002). Характерными являются масштабы от одного до нескольких километров;

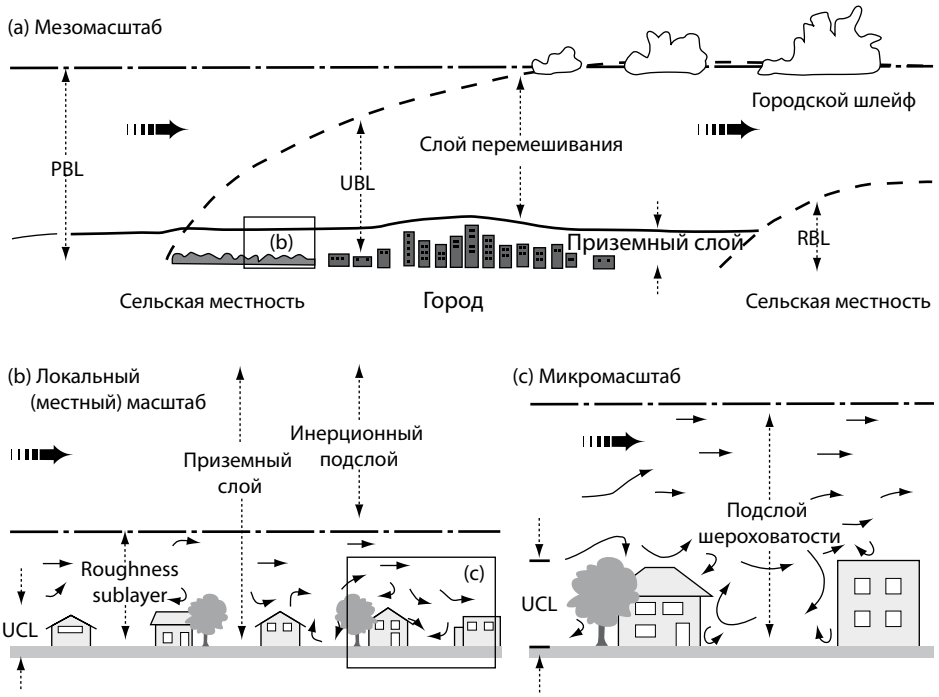


Рис. 11.1. Схема климатических масштабов и вертикальных слоев атмосферы городских районов: планетарный пограничный слой (PBL – ППС), городской пограничный слой (UBL – ГПС), городской пологовый слой (UCL – ГПС), пограничный слой сельской местности (RBL – ПСС) (Oke, 1997).

(c) мезомасштаб: город влияет на погоду и климат в масштабе всего города, как правило протяженностью в десятки километров. Одна единственная станция не способна представить этот масштаб.

11.1.1.3 Вертикальные масштабы

Существенное различие между климатом городских районов и климатом в сельской местности или в местах расположения аэропортов заключается в том, что в городах вертикальный обмен количеством движения, тепла и влажности происходит не на (почти) плоской поверхности, а в слое значительной толщины, именуемом городским пологовым слоем (urban canopy layer, UCL - ГПС) (рисунок 11.1). Высота ГПС приблизительно равна средней высоте основных элементов шероховатости (здания и деревья) – z_H (см. рисунок 11.4 с определениями параметров). Микроклиматические воздействия отдельных поверхностей и препятствий сохраняются на небольшом расстоянии от их источника, а затем они смешиваются и заглушаются в результате действия турбулентных завихрений. Расстояние, необходимое для того, чтобы данное воздействие прекратилось, зависит от силы воздействия, скорости и стабильности потока ветра (т. е. речь идет о стабильности, нейтральности или нестабильности). Это смешение происходит как в горизонтальном, так и вертикальном направлениях. Как отмечалось, горизонтальные воздействия могут сохранять свою силу на расстоянии до нескольких сотен метров. По вертикали воздействия отдельных параметров различаются в подслое шероховатости (ПСШ), который простирается от уровня земли до высоты перемешивания zr, где процесс перемешивания завершается. Эмпирические оценки и полевые измерения показывают, что zr является малой величиной и может изменяться 1,5 z_H в плотно застроенных (близко расположенных друг к друг) и однородных местах, до значений больше 4 zH в районах с низкой плотностью (Grimmond и Oke, 1999; Rotach, 1999; Christen, 2003). Прибор, размещенный ниже z_r может регистрировать микроклиматические аномалии, но если он находится выше, то он «видит» смешанный, пространственно усредненный сигнал, который является репрезентативным для локального (местного) масштаба.

Необходимо учитывать еще одно ограничение по высоте. Оно объясняется тем, что каждый тип поверхности в локальном масштабе создает внутренний пограничный слой, в котором структура потока и термодинамические характеристики адаптируются к этому типу поверхности. Высота этого слоя увеличивается по мере увеличения разгона волны (до края зоны восходящего ветра, где происходит переход к поверхности совершенно иного типа). Скорость, с которой увеличивается внутренний пограничный слой сообразно длине разгона волны, зависит от параметров шероховатости и стабильности. В сельской местности соотношение между высотой и разгоном волны могут колебаться от небольшого соотношения 1:10 в нестабильных условиях до 1:500 в стабильных, и это соотношение уменьшается по мере увеличения шероховатости (Garratt, 1992; Wieringa, 1993). Городские районы характеризуются тенденцией к нейтральности вследствие повышенной тепловой и механической турбулентности, связанной с островом тепла и значительной шероховатостью. Поэтому типичным считается отношение высоты к разгону волны, составляющее порядка 1:100. Высота внутреннего пограничного слоя берется выше высоты смешения z_d, которая является исходным уровнем для потока выше высоты слоя перемешивания. (Объяснение параметра z_d см. на рисунке 11.4 и в примечании 2 к таблице 11.2.)

Например возьмем гипотетический плотно застроенный район с z_H в 10 м. Это означает, что z_r составляет как минимум 15 м. Если эта высота выбирается в качестве уровня измерений, то требование в отношении разгона волны над аналогичной городской территорией составляет, вероятно, как минимум 0,8 км, поскольку разгон волны = 100 (z_r – z_d), а z_d составит приблизительно 7 м. Это может быть существенным ограничением в отношении места размещения, поскольку в том случае, если городская территория не является аналогичной за пределами по меньшей мере этого расстояния вокруг места размещения станции, то как следствие, данные наблюдений не будут репрезентативными для данного типа местной поверхности. В менее плотно освоенных местах, там где воздействия острова тепла и шероховатости являются менее значительными, требования в отношении разгона волны будут, вероятно, более строгими.

На высотах, превышающих высоту слоя перемешивания, но в пределах местного внутреннего пограничного слоя, измерения проводятся в границах инерционного подслоя (рисунок 11.1), для которого применяется теория стандартного пограничного слоя. Подобная теория определяет форму средних вертикальных профилей метеорологических переменных (включая температуру воздуха, влажность и скорость ветра) и поведение турбулентных потоков, спектральные и статистические характеристики. Это создает основу для:

(a) расчета района источника (или «отпечатка », см. ниже), в котором зарождается турбулентный поток или сочетание метеорологических переменных; следовательно, это определяет и

расстояние в верхнем направлении для минимального приемлемого разгона волны;

(b) экстраполяции данного потока или характеристики через инерционный слой, а также вниз в ПСШ (и, хотя это является менее надежным, в ГПС). В инерционном слое потоки являются постоянными по высоте, а среднее значение метеорологических характеристик является неизменным в горизонтальном направлении. Таким образом, наблюдения за потоками и стандартными переменными величинами приносят существенную пользу и могут характеризовать нижерасположенную окружающую среду в локальном (местном) масштабе. Экстраполяция в ПСШ рекомендуется в меньшей степени.

11.1.1.4 Районы источника («отпечатки»)

Датчик, помещенный выше поверхности земли, «видит» только часть окружающей его местности. Она именуется «районом источника» прибора и зависит от его высоты и характеристик процесса передачи информации о характеристиках поверхности датчиком. Для сигналов уходящей радиации (коротко- и длинноволновая радиация и приземная температура, воспринимаемые инфракрасным термометром) поле зрения прибора и геометрия нижерасположенной поверхности определяют просматриваемый участок. По аналогии с этим, такие датчики, как термометры, гигрометры, газоанализаторы и анемометры, «видят» такие характеристики, как температура, влажность, атмосферные газы, скорость и направление ветра, которые воздействуют на соответствующий датчик с поверхности земли в результате турбулентного переноса. Схематическое представление этих районов источника приводится на рисунке 11.2.

Районом источника направленного вниз радиометра с его сенсорным элементом, расположенным параллельно поверхности земли, является круговой участок земли, в центре которого установлен данный прибор (рисунок 11.2). Радиус (r) кругового участка земли, на котором принимается сигнал радиометра на высоте (z1), приводится в публикации Schmid и др. (1991):

$$r = z_1 \left(\frac{1}{F} - 1 \right)^{-0.5} \qquad (11.1)$$

где F – это коэффициент формы, а именно доля измеряемого датчиком потока, создаваемая этим участком. В зависимости от поля зрения радиометр может видеть только ограниченный круг или его обзор может доходить до горизонта. В последнем случае прибор обычно имеет косинусный выходной сигнал, и поэтому в направлении горизонта становится все более трудно определить реальный видимый район источника. Следствием этого является использование коэффициента формы, который определяет участок, дающий возможность получения лишь части (которая обычно устанавливается в 50, 90, 95, 99 или 99,5 %) сигнала данного прибора.

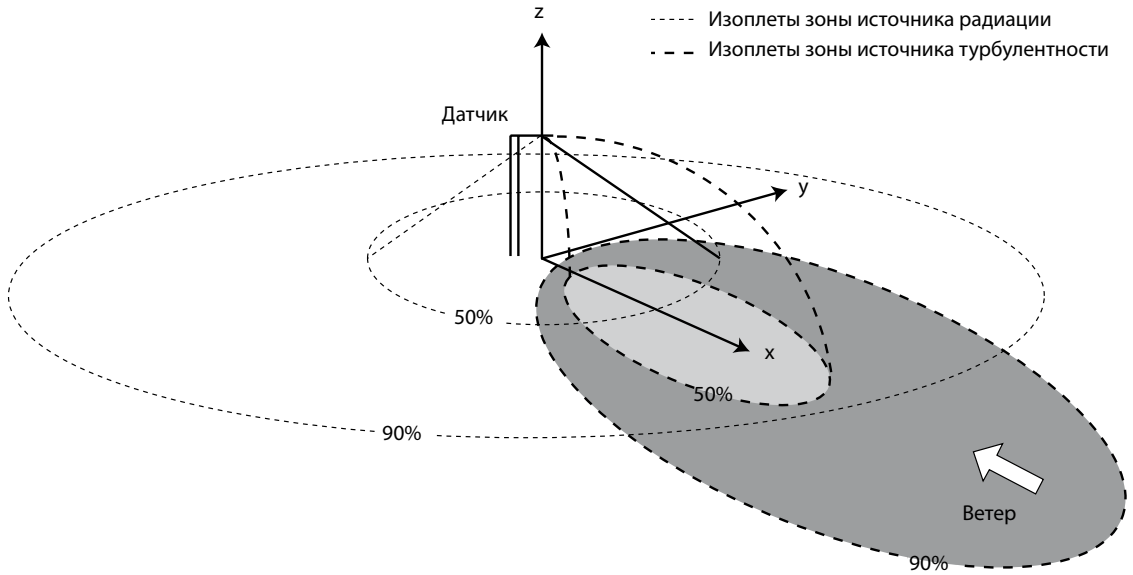


Рис. 11.2. Схематическое представление районов источника для датчиков концентраций потоков радиации и турбулентности. Если датчиком является радиометр, 50 или 90 процентов потока возникает от зоны внутри круга перспективы. Если датчик реагирует на турбулентный перенос, то 50 или 90 процентов сигнала приходит от районов источников внутри соответствующих эллипсисов. Они динамичны в известном смысле, т.к. ориентированы на ветер и следовательно перемещаются в зависимости от направления ветра и его стабильности.

Исходный район источника датчика, который выдает свой сигнал в результате турбулентного переноса, не является симметрично распределенным вокруг места расположения датчика. Он имеет форму эллипса и вытянут против ветра по направлению от мачты (рисунок 11.2). Если дует ветер, то воздействие поверхностной зоны у основания мачты фактически равно нулю, поскольку турбулентность не может транспортировать данное воздействие в верхнем направлении до уровня датчика. На определенном расстоянии в направлении против ветра данный источник начинает воздействовать на датчик; это воздействие достигает пикового значения, после чего оно ослабевает с увеличением расстояния (форму как в направлении *x*, так и в направлении *y*, см. в публикациях Kljun, Rotach и Schmid, 2002; Schmid, 2002). Со временем значительно меняется расстояние до наветренного первого наземного участка, способствующего образованию сигнала, до точки пикового воздействия, до последующей наветренной поверхности, влияющей на данное измерение, и участка так называемого «отпечатка ». Оно зависит от высоты проводимого измерения (увеличивается с увеличением высоты), шероховатости поверхности, стабильности атмосферы (увеличивается при переходе от нестабильного к стабильному состоянию), а также от того, проводится ли измерение турбулентного потока или совокупности метеорологических переменных (Kljun, Rotach и Schmid, 2002). Существуют методы расчета размеров «отпечатков » и потока концентрации (Schmid, 2002; Kljun и др., 2004).

Хотя обычной является ситуация, показанная на рисунке 11.2, она лучше всего подходит для приборов, размещенных в инерционном подслое, гораздо выше возмущений, которые могут быть вызваны ПСШ и комплексной геометрией трехмерной городской поверхности. В пределах ГПС еще не проведено достоверной оценки того, каким образом с расстоянием ослабевают воздействия участков, являющихся источниками потоков радиации и турбулентности. Можно предположить, что они зависят от тех же самых характеристик и напоминают общие формы воздействий, показанные на рисунке 11.2. Однако очевидные трудности возникают из-за сложной геометрии распространения радиации, а также блокирования направления и пропускания потока, которые являются характерными для ПСШ. Безусловно, непосредственная окружающая среда вокруг станции имеет гораздо более важное значение, и размер участка источника воздействий конвекции увеличивается благодаря стабильности ветра и высоте расположения датчика. Расстояние, влияющее на датчики, расположенные на уровне метеорологической будки (~ 1,5 м), может составлять несколько десятков метров в нейтральных условиях, быть меньшим, когда они являются нестабильными, и, вероятно, больше 100 м, когда они являются стабильными. На высоте 3 м, соответственно, расстояния достигают, порядка 300 м в случае стабильного ветра. Предполагается, что обычно круг воздействия на датчик температуры или влажности, находящийся в метеорологической будке, имеет радиус около 0,5 км, однако это может зависеть от плотности застройки.

11.1.1.5 Концепции измерений

Из предыдущего обсуждения видно, что если цель оборудованной приборами городской площадки заключается в мониторинге климата вблизи поверхности земли в локальном (местном) масштабе, то существуют следующие две концепции:

(a) размещать площадку в ГПС в месте, окруженном усредненными или «типичными» для городской местности условиями, и разместить датчики на высотах, аналогичным тем, которые используются на негородских площадках. Это предполагает, что перемешивание, вызываемое потоком, образующимся вокруг препятствий, является достаточным для смешения характеристик и формирования среднего ГПС в локальном (местном) масштабе;

(b) монтировать датчики на высокой башне выше ПСШ и получить смешанные значения, которые могут быть экстраполированы для получения значений ГПС.

В целом концепция (a) действует лучше всего для получения данных о температуре и влажности воздуха, а концепция (b) – данных о скорости и направлении ветра и осадках. В отношении радиации единственным существенным требованием является чистый горизонт. В этой связи городские станции часто оборудованы приборами, размещенными как ниже, так и выше уровня крыш; для этого требуется, чтобы оценка и описание места размещения приборов включали масштабы, соответствующие обоим контекстам.

11.1.1.6 Описание городской площадки

Величина каждого городского масштаба не соответствует точным образом тем данным, которые обычно приводятся в учебниках. Масштабы обычно диктуются размерами морфометрических характеристик, которые определяют городской ландшафт. Это подчеркивает необходимость адекватного описания характеристик городских районов, которые оказывают влияние на состояние атмосферы. Самыми важными основными характеристиками являются городская структура (размеры зданий и

пространства между ними, ширина улиц и пространство между ними); городское покрытие (застроенные, вымощенные и покрытые растительностью районы, голая почва, водоемы), городские отделочные материалы (строительные и естественные материалы) и метаболизм городской среды (тепло, вода и загрязняющие вещества, образующиеся в результате деятельности человека). Соответственно характеристика площадок для городских климатических станций должна учитывать эти условия, использовать их при отборе потенциальных площадок и включать их в метаданные, которые точно описывают место расположения станции.

Эти четыре основные характеристики городов позволяют группировать их в городские классы. Например, в большинстве центральных районов городов расположены относительно высокие здания, которые плотно прилегают друг к другу, и поэтому на данной территории находятся в основном здания или вымощенные поверхности, изготовленные из прочных материалов, таких как камень, бетон, кирпич и асфальт, и где происходят значительные выбросы из печей, кондиционеров, каминов и автомашин. Недалеко от другого края этого спектра находятся районы с низкой плотностью застройки домами в один или два этажа с относительно легкой конструкцией и большими садовыми или растительными зонами с низкими выбросами тепла, но, вероятно, со значительным потреблением воды на цели орошения.

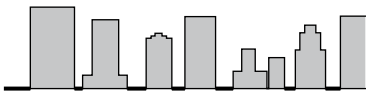
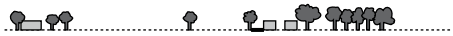
Не существует никакой общепринятой системы городской классификации для климатических целей. Эффективным подходом к понятию застроенных компонентов является концепция Эллефсена (Ellefsen, 1991), который разработал набор типов зон урбанизированных территорий (ЗУТ). Изначально он разделяет застройку на три типа (пристроенные друг к другу здания (ряд); отдельные, но близко расположенные здания; отдельные и открыто расположенные здания). Эта категория подразделяется далее на совокупность семнадцати подтипов в соответствии с функцией, расположением в городе, а также высотой, конструкцией и возрастом зданий. Для применения этой системы требуется лишь аэрофотосъемка, которая обычно является доступной, и она применялась в нескольких городах мира и имеет, по-видимому, универсальный характер.

Система Эллефсена может использоваться для описания таких характеристик городской структуры, как шероховатость, воздушный поток, подверженность радиации и защита от нее. Можно утверждать, что она включает косвенным образом такие аспекты, как городское покрытие поверхности, отделочные материалы и обменные процессы, поскольку каждая структура характеризуется данным типом покрытия, материалов и деятельности человека. В то же время система Эллефсена является менее полезной, когда строительные объекты являются немногочисленными и имеются обширные территории растительности (городской лес, низкий растительный покров, луга, кустарники, сельскохозяйственные культуры), голая земля (почва или камень) и вода (озера, болота, реки). Упрощенная топология городских климатических зон (ГКЗ) показана в таблице 11.1. Она включает группы зон Эллефсена, показатель данной структуры z_H/W (см. таблицу 11.1, примечание (c), который тесно связан как с потоками, солнечным затенением, так и островом тепла а также показатель покрытия поверхности (% застройки) по отношению к степени проницаемости поверхности.

Важное значение ГКЗ заключается не в их абсолютной точности в описании места расположения, а в их способности классифицировать территории населенного места по районам, которые являются аналогичными по своей способности изменять местный климат, а также идентифицировать потенциальные переходы к другим ГКЗ. Подобная классификация является исключительно важной при планировании открытия городской станции, с тем чтобы критерии пространственной однородности приблизительно соблюдались для станции в ГПС или выше уровня ПСШ. Исходя из этого, предполагается, что морфометрия городской территории или ее части оценивалась с использованием подробных карт и/или аэрофотоснимков, спутниковых изображений (в видимой и/или инфракрасной области спектра), документов планирования или, по меньше мере, визуального обследования, проведенного из автомашины и/или пешком. Хотя полезными могут оказаться карты землепользования, следует понимать, что они изображают функцию и не обязательно физическую форму населенного пункта. Задача описания городской территории должна заключаться в создании карты с разграничением территорий ГКЗ.

В данном документе используются ГКЗ, приведенные в таблице 11.1. Возможно, необходимо будет адаптировать эти категории с целью учета особенно характерных городских форм некоторых древних городов или незапланированного городского развития, которое имеет место в некоторых менее развитых странах. Например, многие малые и большие города в Африке и Азии не имеют столь большой доли поверхности, покрытой водоупорными материалами, а дороги в них могут быть незаасфальтированными.

Таблица 11.1. Упрощенная классификация определенных городских форм, ранжированных в порядке снижения их способности воздействия на локальный климат (Oke, 2004 - не опубликована).

Городская климатическая зона[a]	*Изображение*	*Класс шероховатости*[b]	*Коэффициент вида*[c]	*% застройки (непроницаемость)*[d]
1, Развитые города с одиночными плотно стоящими высотными зданиями, т.е.деловая часть города		8	> 2	> 90%
2, Развитый город с 2 – 5-этажной очень плотной застройкой часто из кирпича или камня, т.е. центр старого города		7	1,0–2,5	> 85
3, Развитый город со средней плотностью ярусной и частной застройки вдоль дорог, т.е. городское хозяйство		7	0,5–1,5	70–85
4, Развитый город с низкой и средней плотностью застройки невысокими зданиями и паркингами, т.е. торговая зона		5	0,05–0,2	70–95
5, Среднеразвитый пригород, с 1 – 2-х этажной застройкой, т.е. пригородное хозяйство		6	0,2–0,6, р до > 1 с деревьями	35–65
6, Смешанная застройка большими зданиями в открытом ландшафте, т.е. учреждения – больницы, университеты, аэропорты		5	0,1–0,5, в зависимости от деревьев	< 40
7, Развитое сельское хозяйство, включающее строения в природных и агрокультурных зонах, т.е. фермы, склады имущества		4	> 0,05, в зависимости от деревьев	< 10

Здания; Растительность
Здания и территория между зданиями; Открытый грунт

a Выделенный набор классов включает аспекты схемы Auer (1978) и Ellesfen (1990/91) плюс физические измерения для контроля ветра, тепла и влаги (колонка справа). Приблизительное соответствие между ГКЗ и группами зон Эллефсена: 1 (Dc1, Dc8), 2 (A1–A4, Dc2), 3 (A5, Dc3–5, Do2), 4 (Do1, Do4, Do5), 5 (Do3), 6 (Do6), 7 (ни один).

b Эффективная шероховатость ландшафта согласно классификации Дейвенпорта (Дейвенпорт и другие, 2000); см. таблицу 11.2.

c Коэффициент вида = Z_h/W является средней высотой главных элементов шероховатости (здания, деревья) отделенных средними дистанциями; в центре города это высота/ширина уличных каньонов. Эти величины известны как относящиеся к типам режимов потоков (Oke, 1987) и контроля тепла (солнечное сияние и длинноволновый отбор (screening)) Oke 1981. Высокие деревья значительно увеличивают это соотношение.

d Средняя пропорция территории поверхности под застройкой (зданиями, дорогами и мостовыми и другими водонепроницаемыми зонами); остаток зоны занятый покровом (зелеными насаждениям, водой и другими естественными поверхностями). Проницаемость почвы влияет на увлажнение земли и, следовательно, потенциал влажности и охлаждения за счет испарения.

11.2 ВЫБОР МЕСТА И ПЛОЩАДКИ ДЛЯ РАЗМЕЩЕНИЯ ГОРОДСКОЙ СТАНЦИИ

11.2.1 Место размещения

Во-первых, необходимо четко определить стоящую перед станцией задачу. Если в пределах городской территории будет находиться только одна станция, должно быть принято решение о том, является ли целью мониторинг самого большого климатического воздействия города или же более репрезентативного или типичного района, или же она заключается в характеристике конкретного места (в котором может предполагаться наличие климатических проблем или в котором планируется будущее градостроительство). Территории, на которых с наибольшей вероятностью будут выявлены максимальные воздействия, могут быть оценены на первоначальном этапе путем сравнения с классификационным списком типов ГКЗ, содержащемся в таблице 11.1. Подобным образом, вероятность того, что станция будет типичной, может быть оценена на основе идей, которые подразумеваются таблице 11.1, а также выбора обширных территорий аналогичного городского развития с целью более тщательного изучения.

Данное исследование может быть с пользой усовершенствовано в том случае, если речь идет о температуре и влажности воздуха, посредством проведения территориальных обследований, во время которых датчик несут на себе или устанавливают на велосипед или автомобиль, и перемещают его по всем представляющим интерес территориям. После нескольких повторов делаются карты с поперечным сечением или карты с изолиниями (см. рисунок 11.3), на которых показаны представляющие интерес зоны аномалий тепла или влажности. Обычно наилучшим временем для этой работы являются несколько часов после захода солнца или до его восхода в те ночи, когда поток воздуха бывает относительно спокойным, а небо безоблачным. Это максимально увеличивает возможности для дифференциации различий между микроклиматом и местным климатом. Не рекомендуется проводить эти обследования незадолго до восхода или захода солнца, поскольку метеорологические переменные меняются так быстро в это время, что затрудняет пространственные сравнения.

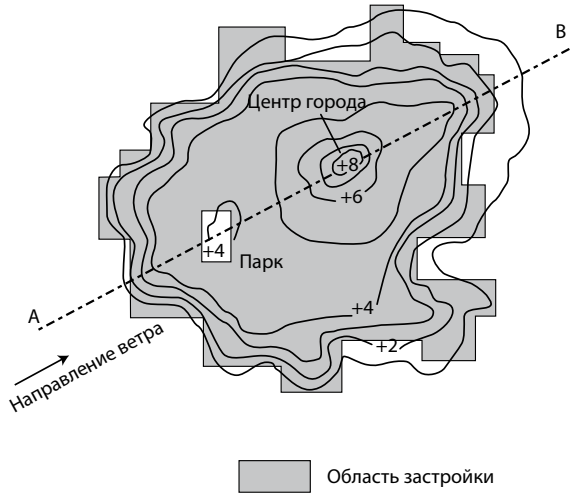


Рис. 11.3. Типичная пространственная картина изотерм в большом городе ночью при штилевой, ясной погоде, иллюстрирующая влияние острова тепла (Oke, 1982).

Если станция является частью сети, предназначенной для описания пространственных характеристик городского климата, то требуется более широкий подход. Этот фактор должен быть сформулирован с учетом типичной пространственной формы климатических распределений в городской среде. Например, изолинии городских островов тепла и влажности действительно выглядят подобно контурам их одноименных топографических названий (рисунок 11.3). Они имеют относительно крутые «обрывы», часто с «плато» на значительной части городской территорией, в которые вкрапливаются локализованные «холмы» и «бассейны» тепла/прохлады и влажности/сухости. Эти параметры соответствуют более или менее урбанизированным участкам земли, таким как жилые зоны, магазины, фабрики или парки, открытые территории или водные поверхности. Поэтому должно быть принято решение: является ли целью подготовка репрезентативного образца разнообразия ГКЗ, или же она заключается в достоверном отображении пространственной структуры.

В большинстве случаев последняя цель является слишком амбициозной для стационарной сети станций, расположенных в ГКЗ. Это объясняется тем, что потребуется много станций для описания градиентов поблизости от периферии, района плоскогорья, а также вершин и низин пунктов градостроительства, которое ведется более низкими или более высокими, по сравнению со средними, темпами. Если измерения должны производиться с башни, когда датчики находятся выше ПСШ, результатом процесса смешения являются более завуалированные пространственные конфигурации, и актуальным становится вопрос о расстоянии разгона волны до самой близкой границы с другой ГКЗ и до границы между городской и сельской местностью. В то время как расстояние для изменения в ГКЗ в 0,5 – 1 км может быть приемлемым в пределах ГПС, для установленного на башне датчика потребуется, вероятно, расстояние разгона волны в несколько километров.

Поскольку цель заключается в мониторинге местного климата, характерного для городской территории, необходимо избегать внешних микроклиматических воздействий или других местных или мезомасштабных климатических явлений, которые будут усложнять регистрацию данных о городском климате. В этой связи, если только не присутствует конкретный интерес к климатическим режимам, определяемым топографическим характером местности, таким как воздействия потока холодного воздуха из низин долин и вдоль склонов в направлении территории города, повышение скорости ветров или защита от них благодаря холмам и впадинам, или туман в речных долинах и прилегающих к ним водоемах, или географически замкнутые системы облачности и т.д., целесообразно избегать мест, подвергаемых таким местным и мезомасштабным воздействиям. С другой стороны, если в результате подобных явлений можно извлечь выгоду или столкнуться с опасностью, целесообразным может оказаться разработка сети, специально предназначенной для смягчения этих воздействий на городской климат, таких как улучшение слишком теплого климата города благодаря морскому или озерному бризу.

11.2.2 Место размещения

После того, как сделан выбор типа ГКЗ и его общего местоположения внутри городской территории, следующий шаг заключается в изучении карты, изображений и фотографических доказательств, с тем чтобы сузить рамки выбора возможных мест в пределах ГКЗ. Изыскиваются зоны разумно однородного градостроительства без обширных участков аномальной структуры, покрова или материала. В то же время, невозможно точно определить понятие «разумно»; почти каждый реальный городской район обладает своими собственными специфическими особенностями, которые уменьшают, в определенной степени, его однородность. Хотя полный перечень является поэтому невозможным, ниже приводятся примеры того, чего следует избегать: необычно увлажненные участки земли в сухом в иной ситуации месте; отдельные здания, которые выступают более чем на половину выше средней высоты строений квартала; обширная асфальтированная автостоянка в месте орошаемых садов; крупный источник концентрированного тепла, такой как теплоцентраль или вытяжной вентилятор туннеля. Следует избегать близости к сопряженным зонам между разными типами ГКЗ, равно как и тех мест, в отношении которых имеются планы или вероятность широкомасштабной реконструкции городских районов. Степень озабоченности по поводу аномальных параметров снижается по мере увеличения расстояния от выбранного места размещения, как это обсуждалось в связи с районами источников.

На практике для каждого потенциального места размещения следует проводить оценку «отпечатка», связанного с радиацией (например, по уравнению 11.1), и характеристик турбулентности. После этого следует документально оформить в рамках этих отпечатков ключевые характеристики поверхности, такие как средняя высота и плотность препятствий, параметры наземного покрытия и материалы. Затем следует проанализировать показатели однородности и сделать это либо визуально, либо при помощи статистических методов. После того, как сделан выбор целевых участков с приемлемой однородностью для станции на уровне метеорологической будки или станции, установленной на высоком уровне (выше ПСШ), полезно выявить потенциальных «дружественных» владельцев данного места, которые могли бы разместить станцию. Если поиск места размещения ведется государственным учреждением, то оно уже может быть владельцем земли в том районе, который используется для других целей, или иметь хорошие отношения с другими ведомствами или деловыми предприятиями (имеющими офисы, рабочие площадки, свободные земли, права прохода и проезда), включая школы, университеты, инженерные сети (электричество, телефон, трубопроводы) и транспортные артерии (автодороги, железные дороги). Это хорошие места размещения, поскольку может быть обеспечен доступ к ним, они часто защищены от вандализма и могут быть подсоединены к электроснабжению.

Крыши зданий часто используются в качестве места для проведения метеорологических наблюдений. Это часто основывалось, вероятно, на ошибочном мнении о том, что на такой высоте приборная будка свободна от осложнений, связанных с ГПС. На самом деле поверхности крыш обладают своим собственным, совершенно отчетливо анормальным микроклиматом, что ведет к получению ошибочных результатов. Воздушный поток над зданием создает сильные возмущения в плане скорости, направления и порывистости ветра, которые полностью отличаются от воздушного потока на той же самой высоте в стороне от данного здания или у земли (рисунок 11.5). Здания с плоскими крышами могут фактически создавать потоки на своих крышах, которые направлены против основного внешнего потока, а скорости меняются от мощных воздушных струй до почти полного спокойствия. Крыши также строятся из материалов, которые имеют довольно экстремальные температурные характеристики. При слабом ветре и безоблачном небе они могут становиться очень горячими днем и холодными ночью. Таким образом, вблизи крыши часто существует резкий градиент температуры воздуха. Кроме того, крыши предназначены для того, чтобы защищать от воды и быстро ее удалять. Это, наряду с их открытостью для

солнечной радиации и ветра, делает их анормально сухими. В целом поэтому крыши являются весьма неподходящими местами для проведения наблюдений за температурой воздуха, влажностью, ветром и осадками, если только приборы не размещаются на очень высоких мачтах. В то же время они могут хорошо подходить для наблюдений за компонентами приходящей радиации.

После того, как место размещения выбрано, важно, чтобы подобное описание характеристик этого места (метаданных) было полностью документировано (см. раздел 11.4).

11.3 УСТАНОВКА ПРИБОРОВ

11.3.1 Изменения в стандартной практике

Во многих отношениях общепринятые стандарты для установки метеорологических приборов, изложенные в части I настоящего Руководства, применяются и к городским площадкам. В то же время, есть много случаев, когда невозможно или бессмысленно соблюдать эти стандарты. В этом разделе рекомендуются некоторые принципы, которые окажут помощь в подобных обстоятельствах; однако невозможно предусмотреть все случайности. Изложенные в этом разделе рекомендации по-прежнему согласуются с общими целями, изложенными в главе 1 части I.

Многие городские станции размещались над низкой травой в открытых местах (парки, игровые поля), и в результате этого они фактически осуществляют мониторинг измененных условий сельского типа, которые не являются репрезентативными городскими условиями. Это ведет к удивительному выводу о том, что некоторые городские станции, спаренные с сельскими станциями, не показывают никакого воздействия городской среды на температуру (Peterson, 2003).

Руководящий принцип установки датчиков в ГПС заключается в том, что их следует располагать таким образом, чтобы они могли осуществлять мониторинг репрезентативных условий окружающей среды выбранной ГКЗ. В больших и малых городах нецелесообразно пользоваться площадками, аналогичными тем, которые являются стандартом в открытой сельской местности. Вместо этого рекомендуется размещать городские станции над поверхностями, которые в пределах микромасштабного радиуса являются репрезентативными для городской окружающей среды локального (местного) масштаба. Приблизительным ориентиром для рекомендуемой поверхности является категория процента застройки (таблица 11.1).

Требованием, которое с наибольшей очевидностью невозможно удовлетворить на многих городских площадках, является расстояние до препятствий – данная площадка должна находиться достаточно далеко от деревьев, зданий, стен и других препятствий (глава 1, часть I). Поэтому рекомендуется помещать городскую станцию в центре открытого пространства, где коэффициент (z_H/W) формы окружающей территории является приблизительно репрезентативным для данной местности.

При монтаже приборов на городских площадках особенно важно пользоваться экранированными кабелями из-за повсеместной прокладки силовых линий и наличия других источников электрических помех в таких местах.

11.3.2 Температура

11.3.2.1 Температура воздуха

Датчики, обычно применяемые для измерения температуры воздуха (включая их точность и характеристики чувствительности), являются пригодными для городских районов. Особенно рекомендуется уделять тщательное внимание защите от радиации и обеспечению вентиляции. В ГПС комплект датчиков может находиться в относительной близости к теплым поверхностям, таким как освещенная солнцем стена, дорога или автомашины с горячим двигателем, или на него может попадать тепло, отраженное от застекленных поверхностей. Поэтому используемые защитные экраны должны эффективно блокировать радиацию. Кроме того, поскольку датчики, размещенные в ГПС на более низком уровне, могут быть слишком хорошо защищены, рекомендуется применение принудительной вентиляции датчика. Если сеть включает сочетание комплектов датчиков с защитными экранами и вентиляцией или без них, это может способствовать различиям в показаниях на разных площадках. В этой связи следует обеспечить единообразную практику.

Поверхность, над которой производится измерение температуры воздуха, а также установка комплекта датчиков, должны соответствовать рекомендациям, изложенным в предыдущем разделе, а именно данная поверхность должна быть характерной ГКЗ, а экран или навес термометра должен помещаться в центре пространства с приблизительным коэффициентом формы z_H/W. В случае очень плотной застройки ГКЗ это может означать размещение датчиков на расстоянии

только 5 – 10 м от зданий высотой 20 – 30 м. Если местом размещения приборов является улица типа «каньон», то величина z_H/W применяется только к поперечному сечению, перпендикулярному оси улицы. Ориентация уличной оси может также иметь значение из-за наличия систематических конфигураций солнце-тень. Если планируется проведение постоянного мониторинга, то предпочтение отдается улицам, ориентированным на север-юг, а не улицами, ориентированными на восток-запад, поскольку фазовое искажение является меньшим, даже если значения температуры в течение дня могут достигать максимума.

На негородских станциях рекомендуемая высота экрана составляет 1,25 – 2 м над уровнем земли. Хотя эта рекомендация является также приемлемой для городских приборных площадок, лучше, вероятно, ослабить это требование, с тем чтобы разрешить большие высоты. Это не должно приводить к существенной ошибке в большинстве случаев, особенно в плотно застроенных районах, поскольку данные наблюдений в напоминающих каньоны улицах свидетельствуют о весьма незначительных градиентах температуры воздуха в большей части ГПС при том условии, что данное место находится на расстоянии более 1 м от поверхности (Nakamura и Oke, 1988). Измерения на высотах 3 или 5 м не отличаются весьма существенным образом от измерений на стандартной высоте, охватывают несколько более обширные районы источника, а датчик находится вне пределов досягаемости, благодаря чему предотвращается причинение ему ущерба и он находится далеко от пути следования автомашин. Эти высоты также обеспечивают большее рассеивание тепла выхлопных газов автомобилей и снижают загрязнение пылью.

Измерения температуры воздуха, выполняемые выше ГПС с использованием смонтированных на башне датчиков, испытывают воздействие потоков воздуха в результате их обмена с ГПС плюс воздействия крыш. Крыши характеризуются гораздо большей тепловой изменчивостью по сравнению с большинством поверхностей внутри ГПС. Большинство крыш предназначено для обеспечения изоляции и, соответственно, минимизации теплообмена с внутренней частью здания. В результате этого значения температуры крыши-поверхности часто становятся очень высокими днем, в то время как частично затененные и имеющие бóльшую проводимость стены зданий на улицах типа «каньон» и их поверхность являются более холодными. Ночью ситуация меняется в обратную сторону, и при этом крыши остаются относительно прохладными, а поверхности «каньона» более теплыми, поскольку они выбрасывают тепло, накопленное в течение дневного времени. Могут быть также осложнения, вызванные выбросом тепла из вытяжных вентиляционных отверстий крыш. Поэтому, несмотря на незначительное колебание температуры в зависимости от высоты в ГПС, поблизости от крыши наблюдается нарушение однородности, как на горизонтальном, так и вертикальном уровнях. Таким образом, для получения средней значимой пространственной величины датчики должны находиться гораздо выше среднего уровня крыши, если возможно > 1,5 z_H, с тем чтобы происходило смешение воздуха между крышей и «каньоном». На основе данных о температуре воздуха, полученных находящимся на возвышении датчиком, трудно экстраполировать зарегистрированные значения до уровня экрана, поскольку в настоящее время отсутствуют какие-либо стандартные методы. Кроме того, нет ни одного простого общего механизма для экстраполирования температуры воздуха горизонтально внутри ГПС. Статистические модели дают хорошие результаты, однако они требуют большого объема архивных данных наблюдений, осуществленных плотной сетью датчиков, но эти данные не всегда имеются.

11.3.2.2 Приземная температура

На городских станциях температура подстилающей поверхности обычно не измеряется, однако она может быть весьма полезной переменной величиной для ее использования в качестве исходных данных в моделях, предназначенных для расчета потоков. Получение такой репрезентативной температуры требует усреднения адекватных данных измерений многих поверхностей – вертикальных, а также горизонтальных, которые образуют городскую территорию. Это возможно только благодаря использованию дистанционного зондирования в инфракрасной области излучения либо со сканера, установленного на воздушном судне или спутнике, либо направленного вниз пиргеометра, или одного или нескольких радиационных термометров, общее поле зрения которых охватывает репрезентативную площадку городского района. Таким образом, для получения точных результатов площадка должна быть правильно выбрана и должна быть известна ее средняя излучательная способность.

11.3.2.3 Температура почвы и автодороги

В городских районах желательно проводить измерения температуры почвы. Эффект острова тепла распространяется в нижнюю подповерхностную часть города, и это может иметь значение для инженерного проектирования водопроводов или дорожного строительства. На практике измерение этой переменной может оказаться трудным на

участках города с более плотной инфраструктурой. Земля, лишенная растительности, может отсутствовать, структура почвы часто сильно разрушена, а на глубине могут находиться препятствия или аномально теплые или прохладные объекты (например пустые, полные или дающие протечку трубы водопровода, канализационные трубы, трубы теплоснабжения). В городских районах измерение минимальной температуры в травостое не имеет почти никакой практической пользы.

Датчики температуры часто вставляются в дорожное покрытие, особенно в местах, подверженных замерзанию. Они являются обычно частью станции мониторинга погоды на автомагистралях. Часто полезно иметь датчики, расположенные как в том месте, где проходят колеса машин, так и в центре автодороги.

11.3.3 Атмосферное давление

В масштабе городских районов не будет, вероятно, необходимости в мониторинге атмосферного давления, если в данном регионе уже имеется синоптическая станция. Если в комплект приборов входят датчики давления, применяются рекомендации, изложенные в главе 3 части I. В помещениях и в других местах поблизости от зданий имеется вероятность «нагнетания» давления, вызванного порывами ветра. Кроме того могут существовать различия между внутренним и внешним давлением, если датчик находится в помещении с кондиционированием воздуха. Обе эти трудности могут быть частично устранены в том случае, если устанавливается приемник статического давления (см. часть I, глава 3, раздел 3.8).

11.3.4 Влажность

Для городских районов подходят приборы, которые обычно используются для измерения влажности (часть I, глава 4). В равной мере к датчикам влажности применяются руководящие указания, изложенные в разделе 11.3.2.1 относительно места размещения и установки датчиков температуры в ГПС и выше ПСШ.

Общеизвестно, что городская окружающая среда является грязной (пыль, масла, загрязняющие вещества). Несколько видов гигрометров подвержены деградации или требуют более тщательного технического обслуживания в условиях городской окружающей среды. Таким образом, в случае использования психрометрических методов замену обвязки из ткани для смоченного термометра необходимо проводить чаще, чем обычно, и особое внимание следует уделять тому, чтобы дистиллированная вода оставалась незагрязненной. Загрязненные городской воздух может разрушить влагочувствительный элемент волосного гигрометра; следовательно, их не рекомендуется использовать в течение длительных периодов времени. Необходимо часто чистить зеркальце гигрометров точки росы и окна гигрометров ультрафиолетового и инфракрасного излучения. Некоторые приборы деградируют в такой степени, что приходится весьма регулярно проводить полную замену датчиков. Из-за наличия в ГПС укрытия от ветра важное значение имеет принудительная вентиляция со скоростью, рекомендованной в части I, глава 4, раздел 4.2, равно как и обеспечение экранирования от внешних источников солнечной и длинноволновой радиации.

11.3.5 Скорость и направление ветра

Результаты измерений скорости и направления ветра очень чувствительно реагируют на отклонения потока препятствиями. Препятствия являются причиной изменений в среднем потоке ветра и турбулентности. Подобные воздействия касаются всех масштабов, включая воздействия местного рельефа, холмов, долин и отвесных скал, резкие изменения шероховатости или фактической высоты поверхности шероховатости (z_d, см. ниже), возмущение потока вокруг групп деревьев или зданий, отдельных деревьев и зданий и даже нарушение потока, вызванной физической массой башни или несущим кронштейном, на котором крепятся приборы.

11.3.5.1 Средний профиль ветра

В то же время если площадка находится на относительно ровной поверхности земли, имеется достаточный разгон волны в нижнем направлении основных изменений шероховатости поверхности и находится в единой ГКЗ без анормально высоких зданий, то должен существовать средний профиль ветра подобный тому, который показан на рисунке 11.4. Средняя величина является как пространственной, так и временной. В ГПС ни от одной площадки невозможно ожидать наличия подобного профиля. Отдельные места размещения подвержены воздействию весьма резких изменений скорости и направления ветра, поскольку воздушный поток взаимодействует с отдельными элементами компановок зданий, улиц, дворов и деревьев. На улицах типа «каньон» форма профиля является иной для потока вдоль «каньона» по сравнению с потоком поперек «каньона» (Christen и др., 2002) и зависит от позиции поперек и вдоль данной улицы (DePaul и Shieh, 1986). Градиенты скорости ветра в ГПС являются малыми практически до самой поверхности. В первой аппроксимации профиль в ГПС может быть описан при помощи экспоненциальной формы (Britter и Hanna, 2003), сливающейся с логарифмическим профилем вблизи крыши (рисунок 11.4).

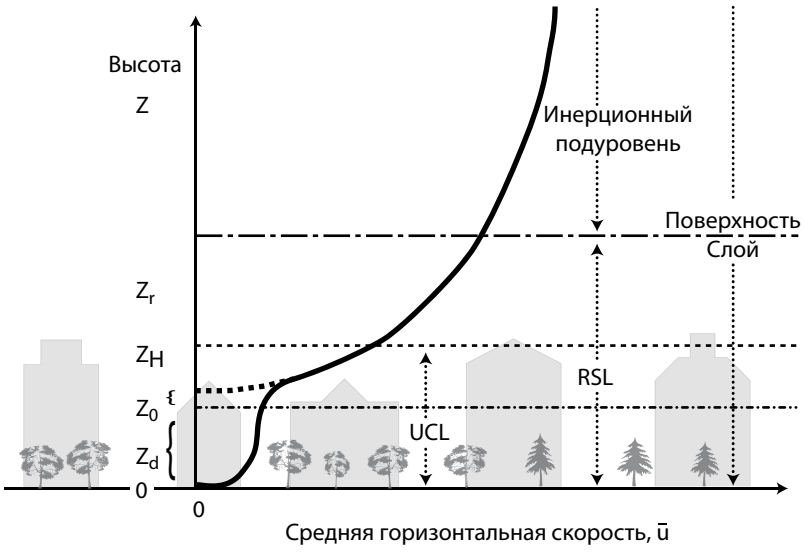


Рис. 11.4. Осредненный (по пространству и времени) вертикальный профиль скорости ветра (*u*) в городском районе, включая положение подслоев приземного слоя. Значениями по оси высот являются средняя высота элементов шероховатости (z_H) подслоя шероховатости (z_r или высота перемешивания), высота шероховатости подстилающей поверхности (z_0), высота смещения нулевой плоскости (z_d). Пунктирная кривая представляет экстраполяцию профиля из инерционного подслоя, сплошная линия представляет фактический профиль; *z* – высота, *u* – средняя горизонтальная скорость ветра.

В инерционном подслое применяется теория подобия Монина-Обухова, включая логарифмический закон:

$$\bar{u}_z = (u_* / k)\{\ln[(z - z_d) / z_0] + \Psi_M\left(\frac{z}{L}\right)\} \qquad (11.2)$$

где u_* – это скорость трения; k – константа фон Кармана (0,40); z_0 – высота шероховатости подстилающей поверхности; z_d – высота смещения нулевой плоскости (рисунок 11.4); L – длина стабильности Обухова (= $-u_*^3/[k(g/\theta_v)Q_H]$), где g – это ускорение свободного падения, θ_v – виртуальная потенциальная температура, и Q_H – чувствительный к турбулентности поток тепла); и Ψ_M – безразмерная функция, которая учитывает отклонение в кривой профиля ветра от нейтрального профиля при увеличении стабильности или нестабильности[1]. В нейтральном случае (обычно при сильных ветрах и облачности), когда Ψ_M является единицей, уравнение 11.2 сводится к следующему:

$$\bar{u}_z = (u_* / k)\ln[(z - z_d) / z_0] \qquad (11.3)$$

Параметры профиля ветра могут измеряться при помощи вертикального ряда анемометров или могут проводиться измерения потока импульса или порывистости ветра посредством малоинерционной анемометрии в инерционном слое, однако оценки меняются в зависимости от направления ветра и чувствительны к ошибкам (Wieringa, 1996; Verkaik, 2000). Имеются также методы параметризации профилей ветра z_0 и z_d для городской территории (обзоры данного вопроса см. в публикациях Grimmond и Oke, 1999; Britter и Hanna, 2003). Самые простые методы связаны с использованием общих описаний землепользования и препятствий (см. таблицы 11.1 и 11.2; а также Davenport и др., 2000; Grimmond и Oke, 1999), или подробного описания высот различных элементов шероховатости и их пространственного распределения, основанных либо на географической информационной системе с данными о размерах зданий и улиц, либо на картах и перспективных аэрофотоснимках, или изображениях с воздушных судов/спутников, а также применений одной из нескольких эмпирических формул (рекомендации см. в Grimmond и Oke, 1999).

В зависимости от плотности застройки и деревьев, это могло бы определить основу профиля на высоте 0,5 – 0,8 z_H (Grimmond и Oke, 1999). Таким образом, невключение этого параметра в расчеты порождает серьезные ошибки. Первые оценки могут быть сделаны путем использования долей z_H, приведенных в таблице 11.2 (примечание b).

11.3.5.2 Высота измерения и установка

Проблематичным является выбор высоты, на которой следует проводить измерения параметров ветра в

[1] Более подробную информацию о L и форме функции ψ_M см. стандартное пособие по микрометеорологии, например, Stull, 1988; Garratt, 1992; или Arya, 2001. Отметим, что u_* и Q_H следует оценивать в инерционном слое над ПСШ.

Таблица 11.2. Классификация Дейвенпорта эффективной земной шероховатости[a]

Класс	z_0 *(m)*	*Описание ландшафта*
4 Почти открытый	0,10	Умеренно открытая местность со случайными препятствиями (например, изолированные низкие здания или деревья) в относительном горизонтальном удалении по крайней мере на 20 высот препятствия
5 Шероховатый	0,25	Рассеянные препятствия (здания) на относительных расстояниях 8 – 12 высот препятствия для низких капитальных объектов (например, здания) (анализ возможно потребует z_d)[b]
6 Очень шероховатый	0,5	Область, умеренно покрытая низкими зданиями в относительном удалении на 3 – 7 высот препятствия и отсутствие высоких деревьев (анализ требует z_d)[b]
7 Скользящий	1,0	Плотная зона застройки без большого изменения высоты застройки (анализ требует z_d)[b]
8 Хаотический	2,0	Центры городов с наличием низких и высотных зданий (рекомендуется анализ в аэродинамической трубе)

[a] Сокращенная версия (редакция, 2000, только для городской шероховатости) Дейвенпорта и других (2000); для классов 1 – 3 и для сельских классов 4 – 8, см. Первую часть, Главу 5, приложение этому Руководству и WMO (2003*a*).

[b] Первые расчетные значения z_d даны как доли средней высоты препятствия, то есть: 0,5 z_H, 0,6 z_H и 0,7 z_H для классов 5, 6 и 7 Давенпорта, соответственно. Важно включать в оценки городского профиля ветра высоту смещения zd. Фактически это эквивалентно созданию основы для логарифмического профиля ветра, который учитывает физическую массу растительного покрова города. Это напоминает создание новой «наземной поверхности» на высоте, где происходит поглощение среднего импульса потока (рисунок 11.4).

городских районах. В то же время, если применяются определенные базовые принципы, то могут быть получены значимые результаты. Неправильное размещение датчиков ветра в крупных городах является причиной бесполезной затраты значительных ресурсов и усилий и приводит к потенциально ошибочным расчетам рассеивания загрязняющих веществ. Разумеется, это является причиной затруднений и на открытой территории вследствие наличия препятствий и топографических воздействий. По этой причине эталонная высота для наблюдений за ветром в сельской местности устанавливается в 10 м над поверхностью земли, а не на уровне метеорологической будки, и анемометр должен находиться на горизонтальном расстоянии от препятствий, равном не менее чем десяти размерам высоты препятствия (часть I, глава 5, раздел 5.9.2). В типичных городских районах невозможно найти подобные места, например в ГКЗ со зданиями и деревьями высотой в 10 м потребуется участок территории с радиусом как минимум 100 м. Если подобная площадка существует, то почти наверняка она не является репрезентативной для данной зоны. Уже отмечалось, что подуровень шероховатости, в котором сохраняются воздействия отдельных элементов шереоховатости, простирается до высоты порядка 1,5 z_H на плотно застроенной территории и, возможно, еще выше на площадях с меньшей плотностью застройки. Таким образом, в рассматриваемом районе минимальная допустимая высота анемометра составляет как минимум 15 м, а не предписанные 10 м. В случае гораздо более высоких зданий анемометр, расположенный на эталонной высоте в 10 м, будет находиться гораздо ниже ГПС, и учитывая однородность городской структуры и соответственно структуры ветра, небольшую пользу принесет размещение датчика ветра ниже уровня крыш или даже приблизительно на этом уровне.

Из наблюдений в аэродинамической трубе и в полевых условиях хорошо известно, что поток над отдельным твердым препятствием, таким как высотное здание, подвергается значительному возмущению как непосредственно над данным зданием, так и вокруг него. Эти возмущения включают изменения в направлении воздушного течения, появление зон рециркуляции на крыше и в так называемом «пузыре» или впадине за зданием, а также эффекты следа струи, которые сохраняются в нижнем течении на расстоянии, в десятки раз превышающем высоту здания, и которые затрагивают значительную часть смежного пространства (рисунок 11.5).

Имеется множество примеров неправильно установленных в городах систем анемометр-флюгер. Регистрируемые такими приборами данные являются ошибочными, вводящими в заблуждение, потенциально вредными в том случае, если они используются с целью получения исходных данных о ветре для применений, связанных с ветровой нагрузкой или дисперсией, и на них напрасно расходуются имеющиеся ресурсы. Невозможно переоценить бессмысленность размещения анемометров и флюгеров на коротких мачтах наверху зданий.

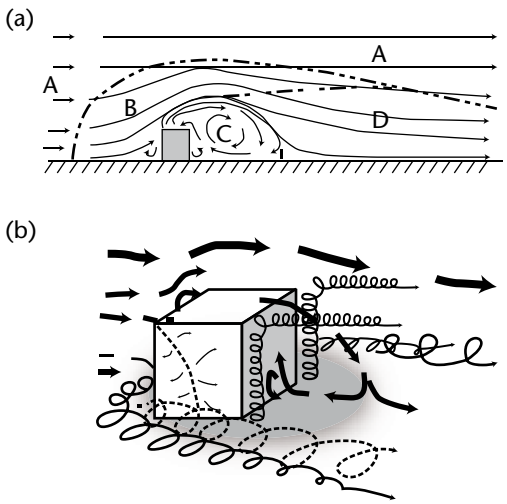


Рис. 11.5. Типичный двумерный поток огибающий здание, стоящее против набегающего потока (a): направления потока и зоны потока; A представляет невозмущенный, B – возмущенный поток, C – впадину, D — след возмущенного потока (по Halitsky, 1963), и (b): поток и структуры вихрей (упрощение по Ханта и др., 1978).

Скорость и направление ветра резко меняются на коротких дистанциях, как горизонтально, так и вертикально. Результаты, полученные от размещенных подобным образом приборов, мало похожи на общий поток воздуха и полностью зависят от конкретных характеристик самого здания, местоположения мачты на данной структуре и угла атаки потока по отношению к зданию. Циркулирующие и вихревые потоки, показанные на рисунке 11.5, означают, что если мачта ставится перед областью кавитации, наверху ее или в самой этой области позади здания, то результаты измерения направления могут быть совершенно противоположными тем, которые доминируют в потоке за пределами зоны воздействия непосредственного режима ветра вокруг данного здания (а именно в зоне A рисунка 11.5a), а скорости колеблются в значительных пределах. Для того, чтобы выйти за пределы зоны возмущения, приборы для измерения параметров ветра должны монтироваться на значительной высоте. Например, предлагалось размещать такие датчики на высоте, превышающей максимальный горизонтальный размер основной крыши (Wieringa, 1996). Это предполагает наличие дорогостоящей мачтовой системы, возможно с оттяжками, которые занимают обширную площадку и, вероятно, трудности с получением разрешения на установку. Тем не менее, это единственный приемлемый подход, если необходимо получить значимые данные.

При столкновении с подобными реальностями следует монтировать датчики таким образом, чтобы их набегающий поток не слишком перекрывался их опорной структурой. Предлагаются следующие рекомендации:

(a) в городских районах с незначительной высотой и плотностью элементов (ГКЗ 6 и 7) возможно использование площадки, на которой могут соблюдаться рекомендации в отношении эталонной установки в «открытом поле». При использовании высоты в 10 м самые близкие препятствия должны находиться на расстоянии от анемометра, по меньшей мере в 10 раз превышающем их высоту, а их средняя высота должна быть не более 6 м;

(b) в более плотно застроенных районах с относительно единообразной высотой и плотностью разных элементов (здания и деревья), измерения скорости и направления ветра следует проводить при помощи анемометра, установленного на мачте сквозной конструкции с минимальной высотой, которая в 1,5 раза превышает среднюю высоту указанных элементов;

(c) в городских районах с разбросанными высотными зданиями рекомендации такие же, как и в пункте (b), однако особое внимание необходимо уделять тому, чтобы не попасть в зону турбулентности, создаваемую высотными сооружениями;

(d) не рекомендуется проводить измерения скорости или направления ветра на плотно застроенных территориях с большим количеством высотных сооружений, если только не используется очень высокая башня.

Анемометры на башнях с открытой конструкцией должны монтироваться на стрелах (поперечных балках), которые являются достаточно длинными для того, чтобы обеспечивать нахождение этих датчиков на расстоянии от боковой стороны мачты, равном по меньше мере двум (желательно трем) диаметрам башни (Gill и др., 1967). Датчики следует монтировать таким образом, чтобы как можно реже направление потока проходило через башню. Если это невозможно или если решетка башни является очень плотной, необходимо будет, вероятно, смонтировать две или три стрелы с дублирующими датчиками, с тем чтобы предотвратить воздействия турбулентности и угасания встречного ветра, вызванного самой башней.

Если мачты анемометров приходится монтировать на высоких или изолированных зданиях, необходимо учитывать воздействия размеров этой структуры на воздушный поток (см. часть II, глава 5, раздел 5.3.3). Это потребует, вероятно, проведения анализа с использованием аэродинамической трубы, гидрологического лотка или расчетных гидродинамических моделей, специально разработанных применительно

к представляющему интерес зданию, включая также окружающую его территорию и структуры.

Цель состоит в том, чтобы обеспечить проведение всех измерений параметров ветра на высотах, где они являются репрезентативными для потоков над поверхностью с шероховатостью , характерной в местном масштабе, и чтобы эти измерения были свободны от возможных вводящих в заблуждение воздействий в результате поверхностных аномалий в микромасштабе или локальном (местном) масштабе. Соответственно, особое внимание уделяется проведению точных измерений на любой высоте, которая необходима для уменьшения погрешности, вместо того, чтобы проводить измерения на стандартной высоте. Для этого может потребоваться отделение площадки для измерения параметров ветра от места размещения других измерительных систем. Это может также привести к проведению наблюдений за ветром на нескольких различных высотах в одном и том же населенном пункте. Для этого необходимо будет экстраполировать измеряемые величины на общую высоту, если необходимо получить пространственное распределение или если эти данные должны стать исходными для мезомасштабной модели. Подобная экстраполяция легко достигается путем применения логарифмического профиля (уравнение 11.2) для двух высот:

$$\overline{u}_1 / \overline{u}_{ref} = \ln(z_1 / z_0) / \ln(z_{ref} / z_0) \quad (11.4)$$

где z_{ref} – это выбранная «эталонная» высота; z_1 – высота установки анемометра; и z_0 – высота шероховатости ГКЗ. На городской территории правильным является определение «эталонной» высоты для включения высоты смещения нулевой плоскости, а именно z_1 и z_{ref} имеют вид $(z_x - z_d)$, где нижний индекс x означает «1» или «ref». Подходящей «эталонной» высотой может быть 50 м над высотой смещения.

Другие поправки при установке приборов, связанные с отклонением потока, топографией и воздействиями шероховатости, могут быть внесены в соответствии с рекомендациями, содержащимися в части I, глава 5 (см. раздел 5.9.4: Поправка с учетом установки приборов). Вполне может оказаться, что для данной городской площадки невозможно организовать проведение подходящих наблюдений за ветром. В таком случае возможно все же проводить расчеты параметров ветра для «эталонной» высоты на основе данных наблюдений за ветром на другой городской станции или в аэропорту, применяя для этого модель «логарифмического преобразования» Wieringa (1986):

$$\overline{u}_{zA} = \overline{u}_{zB} \left[\frac{\ln(z_r / z_{0B}) \cdot \ln(z_A / z_{0A})}{\ln(z_B / z_{0B}) \cdot \ln(z_r / z_{0A})} \right] \quad (11.5)$$

где нижние индексы A и B относятся к представляющей интерес площадке, где необходимо получение параметров ветра, и площадки, где имеются данные о стандартных измерениях параметров ветра, соответственно. Высота перемешивания zr должна либо быть равной 4 z_H (раздел 11.1.1.3), либо принимать стандартное значение в 60 м; данный метод не очень зависит от этого показателя. Кроме того, если на любой из этих площадок имеются высокие тесно расположенные элементы, шероховатости, то соответствующая шкала высоты должна учитывать z_d.

11.3.5.3 Соображения, касающиеся датчика ветра

Для городских территорий применимы приборы, используемые для измерения скорости и направления ветра, порывистости и других характеристик потока в негородской окружающей среде. В крупных городах следует всегда измерять направление ветра, а также его скорость, с тем чтобы можно было вносить зависящие от азимута поправки на влияние башни. В случае использования механических чашечных анемометров техническое обслуживание должно проводиться более часто из-за загрязнения атмосферы, и большое внимание следует уделять состоянию подшипников и коррозии. Если измерения проводятся в ГПС, то порывистость ветра может усугубить проблему чрезмерной скорости вращения чашек, а слишком большое укрытие может стать причиной того, что анемометры функционируют со скоростью, которая близка или ниже их предельной минимальной скорости. Эту проблему надо решать посредством более эффективного технического обслуживания и, возможно, использования быстродействующих анемометров, анемометров пропеллерного типа или акустических анемометров. Пропеллерные анемометры в меньшей степени склонны к превышению скорости, а акустические анемометры, не имеющие никаких подвижных частей, практически не нуждаются в техническом обслуживании. В то же время, они являются дорогостоящими и требуют сложной электронной схемы регистрации и обработки данных, и не все их модели работают во время дождя.

11.3.6 Осадки

Приборы и методы измерения осадков, описанные в главе 6 части I, также адаптированы к городской среде. Измерение осадков, таких как дождь или снег, всегда подвержено ошибкам, связанным с установкой измерительного прибора, особенно из-за искажения поля ветра вокруг него. Учитывая городские условия и весьма изменчивый характер поля ветра в ГПС и ПСШ, озабоченность вызывают следующие четыре основных источника ошибок:

(a) перехват осадков на их траектории к поверхности земли находящимися рядом собирающими поверхностями, такими как деревья и здания;
(b) твердые поверхности вблизи измерительного прибора, которые также могут вызвать попадание брызг в измерительный прибор и наличие нависающих объектов, с которых может попадать вода в измерительный прибор;
(c) пространственная сложность поля ветра вокруг препятствий в ГПС вызывает весьма локализированную концентрацию или отсутствие воздушного потока, несущего дождь или снег;
(d) порывистость ветра в сочетании с физическим присутствием самого измерительного прибора, что вызывает аномальную турбулентность вокруг него, которая приводит к переоценке или недооценке количества осадков.

На открытой местности стандартная установка требует, чтобы окружающие препятствия находились от осадкомера на расстоянии, не меньшем, чем их двукратная высота. В определенном смысле это менее строгое требование по сравнению с требованиями, предъявляемыми к измерениям температуры, влажности или ветра. В то же время, в ГПС турбулентная активность, создаваемая потоком воздуха вокруг зданий с острыми выступами, является более значительной по сравнению с турбулентностью вокруг естественных препятствий, и она может проявляться на большей протяженности их турбулентного следа. Кроме того, следует избегать площадок на крыше здания из-за большой изменчивости скорости и направления ветра там.

С другой стороны, в отличие от измерений температуры, влажности и ветра, цель измерения осадков часто заключается не в проведении анализа локальных воздействий, за исключением, возможно, интенсивности выпадения дождевых осадков. Некоторые воздействия городской среды на осадки могут быть инициированы в локальном (местном) масштабе (например, крупным промышленным предприятием), однако они могут проявляться на значительном расстоянии в подветренной стороне города. Различия, наблюдаемые в пределах городской зоны, с большей степенью вероятности объясняются воздействиями или топографическими эффектами.

Приемлемым может оказаться выбор обширной открытой площадки в городе, где могут быть соблюдены стандарты нормальной установки, однако с почти полной очевидностью это будет означать, что измерительный прибор не будет размещаться совместно с датчиками температуры воздуха, влажности и ветра. В то время как последние упомянутые датчики должны быть репрезентативными для городской структуры местного масштаба, покрытия, структуры и обменных процессов конкретной ГКЗ, в отношении измерения осадков это требование не действует.

Однако местная окружающая среда измерительного прибора имеет важное значение, если станция должна использоваться для изучения межгородских изменений типа осадков. Например, городской остров тепла оказывает влияние на срок существования различных видов осадков, например снег или мокрый снег в основании облака может таять в более теплой атмосфере города и выпадать на землю в виде дождя. Результатом этого может быть снег в сельских и пригородных районах, в то время как в центре города регистрируется дождь.

В отношении осадкомеров в городских районах рекомендуется следующее:
(a) осадкомеры следует размещать на открытых площадках в пределах города, где могут быть соблюдены критерии стандартной установки (например, игровые поля, открытые парковые территории с незначительной плотностью деревьев, городские аэропорты);
(b) осадкомеры следует размещать совместно с приборами для измерения ветра, если для них найдена репрезентативная площадка. В других местах, которые не характеризуются низкой плотностью застройки, это, вероятно, повлечет за собой монтаж осадкомера на мачте выше уровня крыш. Это означает, что осадкомер будет подвергаться воздействию ветра, скорость которого больше репрезентативной, и соответственно ошибка в оценке будет больше, чем ошибка вблизи поверхности, и необходимо будет вносить поправку в выходные данные осадкомера. Подобная поправка является практически возможной, если ветер измеряется на той же самой мачте. Это также означает, что предпочтение отдается автоматической регистрации, а осадкомер должен проходить регулярную проверку для обеспечения того, чтобы он был установлен горизонтально, а его отверстие было свободно от мусора;
(c) осадкомеры не следует размещать на крышах зданий, если только их не устанавливают на достаточной высоте, с тем чтобы предотвратить воздействие ветровой зоны здания;
(d) измерение глубины выпавшего снега следует проводить на открытой площадке, или, если это делается на застроенных участках, следует провести измерения на обширном пространстве, с тем чтобы было учтено неизбежное накопление снега вокруг препятствий. Подобные измерения должны охватывать улицы, ориентированные в разных направлениях.

Гидрологи городов интересуются показателями интенсивности жидких осадков, особенно во время сильных ливней. Соответственно полезными являются дождемеры с опрокидывающимся ковшом (челночные) или весовые плювиографы. Измерение жидких и твердых осадков в городских районах выигрывает от разработки новых технических средств, таких как оптические и микрорадарные дождемеры.

Осадки в виде росы, инея и тумана также имеют место в городах и могут иметь значение для водохозяйственного баланса, особенно для некоторых поверхностей, и могут быть связаны с такими применениями, как учет влияния на болезни растений, активность насекомых, безопасность на дорогах и выявление дополнительного источника водных ресурсов. Методы, описанные в главе 6 части I, подходят для городских площадок.

11.3.7 Радиация

В настоящее время в городских районах осуществляется малое количество измерений радиационного баланса и его составляющих. Например, почти ни об одной составляющей его не упоминается в Архиве мирового энергетического баланса Всемирной климатической программы и в Программе измерений атмосферной радиации Министерства энергетики США. Площадки для измерения радиации специально размещаются в сельской местности или отдаленных местах с тем, чтобы избежать воздействия аэрозольных и газообразных загрязняющих веществ городов, влияющих на результаты измерений. Даже в тех случаях, когда станция носит название города, метаданные обычно показывают, что они фактически расположены далеко за пределами городской черты. Если станции размещены в застроенном районе, то измерению подлежит, вероятно, только приходящая солнечная (суммарная) радиация; не ведется мониторинг ни приходящей длинноволновой радиации, ни каких-либо потоков с исходящими компонентами. В большинстве своем краткосрочные экспериментальные проекты, ориентированные в первую очередь на городских воздействиях, предусматривают измерения радиационного баланса в городах. Все коротко- и длинноволновые потоки испытывают воздействие особых характеристик атмосферы и подстилающей поверхности в городах, и это же относится к полному радиационному балансу, который фактически определяет энергетический баланс в условиях города (Oke, 1988*a*).

На городских территориях могут применяться все приборы с имеющимися для них калибровками и поправками, а также большинство полевых методов, изложенных в главе 7 части I, в измерения радиации в полевых условиях. В данном документе речь идет только о различиях, конкретных городских потребностях или трудностях.

11.3.7.1 Приходящая радиация

Приходящая солнечная радиация является фундаментальной переменной величиной, влияющей на городской климат, и поэтому ее измерению следует уделять приоритетное внимание, особенно после того, как станция организована или модернизирована. Знание этого параметра наряду с данными стандартных наблюдений за температурой и влажностью воздуха, скоростью ветра, а также простые измерения структуры и покрова площадки, дают возможность использовать метеорологическую предпроцессорную схему (а именно: методы и алгоритмы, применяемые для преобразования стандартных полей наблюдений в переменные величины, необходимые в качестве исходных, но не измеряемых элементов для моделей, например радиация, стабильность, высота перемешивания, коэффициенты рассеяния и т.д.), подобную Гибридной модели дисперсии факела загрязнения (Hanna и Chang, 1992) или Схеме параметризации городских метеорологических процессов в местном масштабе (Grimmond и Oke, 2002), для расчета характеристик на базе данных гораздо более сложных измерений, таких как атмосферная стабильность, статистика турбулентности, потоки импульса, тепла и водяного пара. В свою очередь это делает возможным предсказание высоты перемешивания и дисперсии загрязняющих веществ (COST 710, 1998; COST 715, 2001). Кроме того, в дневное время солнечная радиация может быть использована в качестве параметра, отражающего наличие облаков, и это является важным при оценке условий, связанных с солнечной энергетикой, уровнями дневного освещения в зданиях, комфортом пешеходов, определенными в законе правами на солнечное освещение и многими другими областями. В то же время измерение солнечной радиации автоматическими станциями является простым и относительно недорогостоящим.

В городских условиях соблюдать требования по установке пиранометров и датчиков других видов приходящей радиации довольно просто. Главным образом необходимо обеспечить, чтобы чувствительный элемент датчика располагался горизонтально, не подвергался вибрации и не экранировался горизонт окружающими объектами, включая как стационарные объекты (здания, мачты, деревья и холмы), так и эпизодически возникающие (облака, образовавшиеся от вытяжных вентиляторов или шлейфа загрязняющих веществ). Поэтому часто идеальным вариантом является высоко

расположенная, стабильная и доступная платформа, например, крыша высотного здания. Однако бывает невозможным предотвратить краткосрочное экранирование прямой солнечной радиации мачтами, антеннами, флагштоками и аналогичными структурами. В таких случаях следует полностью документировать местонахождение препятствия и продолжительность его воздействия на чувствительный элемент датчика (см. раздел 11.4). Методы корректировки для подобных помех изложены в главе 7 части I. Важно также исключить попадание на датчик радиации, отраженной от светлоокрашенных стен, находящихся выше линии местного горизонта. Важно регулярно очищать открытые входные окна датчиков (плоские или полусферические) В случае сильно загрязненной окружающей среды чистку следует выполнять ежедневно.

Желательно также учитывать другие виды приходящей радиации, однако это зависит от типа города, потребностей и стоимости датчиков. Этими видами радиации (и приборами для их измерения) являются: прямая солнечная (пиргелиометр), рассеянная небом (пиранометр с затеняющим диском либо с теневым кольцом), ультрафиолетовая (широкополосные либо узкополосные датчики и спектрометры), и длинноволновая (пиргеометр). Результаты измерений этих видов радиации имеют широкое применение: прямая солнечная радиация (характеристики прозрачности атмосферы в целях принятия мер по удалению загрязнения); рассеянная радиация (дневное освещение внутри помещений, солнечные панели); ультрафиолетовая радиация (общее содержание озона и предотвращение вредного воздействия на людей, растения, материалы); длинноволновая (мониторинг ночных облаков, усиление потока в результате воздействия загрязняющих веществ и острова тепла).

11.3.7.2 Уходящие виды радиации радиационный баланс

В настоящее время на городских станциях редко осуществляется мониторинг отраженной солнечной радиации, излучаемой и отражаемой длинноволновой радиации, а также радиационного баланса полного, коротковолнового и длинноволнового.. Это означает, что важные характеристики городской климатической системы остаются неисследованными. Неизвестным остается альбедо подстилающих поверхностей в городах, от которого зависит, будет ли солнечная радиация поглощаться данной структурой или вернется обратно в атмосферу и космос. Утрачивается возможность применения закона Стефана-Больцмана для определения температуры излучаемой поверхности. Теряется значение критической чистой радиации, которая определяет нагрев/охлаждение городской структуры, а также обмен водой и теплом между поверхностью и городским пограничным слоем. Из этих данных больше всего не хватает данных о радиационном балансе. Итоговые данные от хорошо обслуживаемого чистого радиометра являются бесценными для введения в предпроцессорную схему, а также замены измерений облачности.

Главной трудностью для точного измерения параметров уходящей радиации является установка направленного вниз радиометра таким образом, чтобы обеспечить обзор репрезентативной зоны, расположенной ниже городских строений. Приемник радиации (уравнение 11.1 и рисунок 11.2) должен идеально «видеть» репрезентативную выборку основных поверхностей, способствующих образованию данного вида радиации. В случаях эталонной установки, определенных в соответствующих разделах главы 7 части, надлежащей считается высота датчика в 2 м над поверхностью скошенного газона. На этой высоте 90 % исследуемого потока поступает от участка поверхности диаметром 12 м. Очевидно, что требуется гораздо большая высота размещения датчика над территорией, которая содержит достаточную совокупность поверхностных характеристик для того, чтобы быть репрезентативной для данной ГКЗ. В случае установки радиометра на высоте 20 м (на верху 10-метровой мачты, смонтированной на здании высотой 10 м) в районе с плотной инфраструктурой 90 % исследуемого потока поступает от участка поверхности диаметром 120 м. Это может показаться достаточным для того, чтобы «видеть» несколько зданий и дорог, однако необходимо также учитывать, что данная система является трехмерной, а не почти такой же плоской, как трава. В этом примере на уровне крыши зона обзора охватывает только 60 м в диаметре, и в нее может попасть относительно небольшое число зданий.

Возникает вопрос о том, может ли этот датчик «видеть» соответствующий спектр климатически активных поверхностей. Это означает, что этот датчик должен не только видеть необходимый набор типов поверхности в горизонтальной проекции, но также и делать выборку соответствующих частей крыши, стены и наземных поверхностей, включая правильные части каждого из этих элементов, которые находятся на солнце или в тени. Это не является тривиальной задачей, решение которой зависит от структуры поверхности и позиций как датчика, так и солнца, в пространстве над местом размещения группы датчиков. Soux, Voogt и Oke, 2004, разработали модель для расчета этих разных частей для относительно простых, схожих с городскими, геометрических групп. Однако необходимо

проделать больший объем работы перед тем как будут получены руководящие указания, конкретно касающиеся отдельных типов ГКЗ. Как представляется, высота датчика должна быть больше высоты проведения измерений турбулентности. Нелинейный характер воздействий, связанных с зоной радиационного источника, четко вытекает из уравнения 11.1 (см. рисунок 11.2). Увеличение весового коэффициента поверхностей, находящихся ближе к мачте, означает, что наибольшее значение имеет непосредственное окружение. В предыдущем примере радиометра, находящегося на высоте 20 м здания высотой 10 м, 50 % сигнала на уровне крыши поступает из круга диаметром всего лишь в 20 м (возможно, только единственное здание). Если крыша этого здания или любая другая поверхность, на которой смонтирована мачта, имеет не типичные радиационные характеристики (альбедо, излучательная способность или температура), то это диспропорционально воздействует на поток, который предположительно является репрезентативным для более обширной территории. Вследствие этого следует избегать крыш с большими участками из стекла или металла или крыш необычно темного или светлого цвета, или крыш, предназначенных для того, чтобы не пропускать стоячую воду.

Проблемы, связанные с направленными вниз и находящимися на больших высотах радиометрами, включают: (a) трудность обеспечения горизонтального расположения плоскости чувствительного элемента; (b) обеспечение условий отсутствия попадания на чувствительный элемент датчика прямой солнечной радиации при больших зенитных углах Солнца или приходящую длинноволновую радиацию атмосферы; (c) рассмотрение вопроса о необходимости корректировать результатов измерений с учетом ослабления радиации воздушным слоем между прибором и изучаемой поверхностью. Для исключения помех, создаваемых солнечным или длинноволновым излучением вблизи горизонта может использоваться узкополосный круглый экран, ограничивающий поле зрения у горизонта на несколько градусов. Это вызовет необходимость ввода незначительной поправки к показаниям прибора, учитывающей недостающий вклад рассеянной солнечной радиации (см. часть I, глава 7, приложение 7.E, для случая применения круглого экрана) и дополнительного длинноволнового излучения ободка.

Обращенные вниз датчики могут иметь дополнительную погрешность, обусловленную нагревом солнцем задней открытой части их. Этого следует избегать посредством использования определенного вида укрытия или изоляции. Также более трудным может оказаться поддержание чистоты входных окон прибора и удаления попавших на них воды или льда. Отсутствие возможности следить за скоростью и эффективностью вентиляции прибора на определенной высоте означает, что предпочтение следует отдавать приборам, которые не нуждаются в вентиляции. Преимуществом является возможность опускания мачты для проведения чистки, замены осушителя и полиэтиленовых куполов, а также корректировки горизонтальности.

Рекомендуется следующее:

(a) размещать направленные вниз радиометры на высоте по меньшей мере равной высоте датчика турбулентности (а именно, рекомендуется высота, равная как минимум 2 z_H), а предпочтительно – еще выше;

(b) радиационные характеристики непосредственного окружения радиационной мачты должны быть репрезентативными для изучаемого городского района.

11.3.8 Продолжительность солнечного сияния

Загрязненная атмосфера городских районов является причиной уменьшения продолжительности солнечного сияния по сравнению с окружающей их местностью или величинами её в период, предшествующий урбанизации (Landsberg, 1981). К городской станции применимы рекомендации в отношении приборов, методов и установки приборов, изложенные в главе 8 части I.

11.3.9 Видимость и метеорологическая оптическая дальность

Воздействия городских районов на показатели видимости и метеорологической оптической дальности (МОД) имеют сложный характер, поскольку с одной стороны загрязняющие вещества, как правило, снижают видимость и МОД в результате того, что они уменьшают освещенность и способствуют образованию определенных видов тумана, с другой, воздействия, вызванные городским островом тепла и влажности, часто способствуют уменьшению частоты и плотности тумана и низкой облачности. Получение информации о видимости и МОД в пределах города имеет большую практическую ценность для таких областей, как авиация, перевозки по дорогам и рекам, оптическая связь, что объясняет необходимость включения подобных наблюдений в программу наблюдений городских станций.

Оптическая видимость снижается в городах. Хотя имеются многочисленные объекты и огни, которые могут служить в качестве ориентиров дальности до цели, трудным может оказаться получение

достаточно непрерывной линии видимости на рекомендованной высоте в 1,5 м. Использование поднятой платформы или верхнего уровня зданий считается нестандартным и не рекомендуется. На наблюдения, проводимые вблизи от уровня крыш, могут также повлиять «мерцание» нагретых крыш или «испускание пара» водой с мокрых крыш во время их высыхания, или загрязняющие вещества и водные облака, выбрасываемые из каминов и других вентиляционных отверстий.

Приборы для измерения МОД, такие как трансмиссометры и измерители рассеяния (нифелометры), обычно хорошо работают в городских районах. Они требуют относительно коротких расстояний и будут давать хорошие результаты, если оптика поддерживается в чистом состоянии. Естественно, прибор должен быть установлен в месте, которое является репрезентативным для окружающей атмосферы, однако требования не являются более строгими по сравнению с теми, которые предъявляются к другим приборам, размещенным в ГПС. Может оказаться, что для определенных применений знание колебания высоты МОД имеет ценное значение, например положение верхней части тумана или основания облаков.

11.3.10 Испарение и другие потоки

Градостроительство обычно ведет к уменьшению испарения главным образом вследствие того факта, что застроенные объекты делают поверхность водонепроницаемой, а растительность уничтожается. Тем не менее в некоторых естественных засушливых регионах испарение может усилиться, если водоснабжение осуществляется из других мест и используется для полива городской растительности.

В городских районах существует очень мало станций для измерения испарения. Это объяснимо, поскольку почти невозможно толковать данные измерений испарения, осуществленных в ГПС с использованием различных видов испарометров – атмометров, испарительных бассейнов или лизиметров. Как об этом подробно говорится в главе 10 части I, подобные измерения должны проводиться в месте, которое является репрезентативным для данной территории; на расстоянии от препятствий не менее пятикратного размера их высоты или десятикратного размера в случае группы препятствий; приборы не должны находиться на бетоне или асфальте; они не должны быть в тени; и рядом с приборами не должно быть твердых поверхностей, которые могут вызвать попадание в них воды. Помимо этих проблем, предполагается, что поверхности приборов действуют в качестве заменителей растительности или открытых водных систем. Такие поверхности не являются, вероятно, репрезентативными для расположенной вокруг городской территории. Следовательно, на них действует микроадвекция, которая, вероятно, вызывает испарение с аномальной высокой скоростью.

Рассмотрим случай испарометра, функционирующего в течение длительного периода, первоначально в полузасушливом месте, которое отводится затем для сельскохозяйственных целей с использованием орошения, после чего это место отводится для строительства пригородных районов, а позднее оказывается в центре плотно застроенного городского района. Первые регистрируемые этим прибором данные об испарении характеризуются весьма высокими показателями, поскольку это место было с открытым водным пространством, окруженное территорией с горячим сухим климатом. Поэтому, хотя фактическое испарение в этом районе находится на весьма низком уровне, адвекция обусловила значительные потери воды из испарометра. Поскольку, благодаря введению орошения, климатические условия стали более прохладными и более влажными, показания его резко снизились, однако фактическое испарение является значительным. Поскольку городское развитие в значительной мере приводит к обратным экологическим изменениям и уменьшает скорость ветра у земли, потери воды из испарометра увеличиваются, однако фактическое испарение, вероятно, резко уменьшается. Таким образом, в рамках всей этой последовательности испарение, регистрируемое прибором, и фактическое испарение находятся, вероятно, в противофазе. Во время сельскохозяйственного периода коэффициент испарения мог бы, вероятно, применяться для приведения показаний испарометра к показаниям, характерным для короткой травы или культур. Не существует ни одного подобного коэффициента для пересчета показаний приора в показатели испарения в городе, даже в том случае, если эти показания не искажаются сложным характером окружающей среды в ГПС. Короче говоря, использование стандартных приборов для измерения испарения в ГПС не рекомендуется.

Размеры и неоднородность городских районов делают нецелесообразным использование полномасштабных лизиметров (например, требование о том, чтобы прибор находился на расстоянии не менее 100 – 150 м от места изменения окружающей территории). Микролизиметры могут измерять испарение с отдельных поверхностей, однако они все же чувствительны к их окружению. Подобные лизиметры требуют большого внимания, включая обновление почвенного монолита для предотвращения высыхания, и не подходят для регулярных долгосрочных наблюдений.

Информация о пространственно усредненном испарении и других турбулентных потоках (импульс, теплосодержание, двуокись углерода) может быть получена посредством проведения наблюдений над ПСШ. Некоторые из этих потоков вызывают больший практический интерес в городских районах по сравнению с многими районами в сельской местности. Например, для определения ветровой нагрузки на структуры и дисперсию факелов от загрязнителей воздуха необходимы данные о вертикальном потоке горизонтального импульса и суммарные статистические данные и характеристики ветра. Поток сухого тепла является существенным исходным элементом для расчета атмосферной стабильности (например, число Ричардсона для потока и масштаб Обухова) и толщины городского слоя перемешивания. Вместо методов градиента по профилю рекомендуются быстродействующие методы турбулентной ковариации или стандартного отклонения. К числу соответствующих приборов относятся акустические анемометры, инфракрасные гигрометры, газовые анализаторы и сцинтиллометры. Датчики должны быть установлены точно так же, что и датчики ветра: выше ПСШ, но ниже внутреннего пограничного слоя изучаемой ГКЗ. Кроме того, подобные измерения основаны на том, что «отпечаток» потока является достаточно крупным для того, чтобы быть репрезентативным для изучаемого местного района.

Если подобные измерения потока являются невозможными с точки зрения имеющихся финансовых и технических ресурсов, то приемлемым методом получения представительных в отношении воздуха величин испарения и потока тепла в городе является метеорологическая предпроцессорная схема, такая как Метод ограничения озона, Гибридная модель дисперсии шлейфа загрязняющих веществ или Схема параметризации городских метеорологических процессов (см. раздел 11.3.7). Подобные схемы требуют только пространственно репрезентативных наблюдений за приходящей солнечной радиацией, температурой воздуха, влажностью, скоростью ветра и общих оценок усредненных характеристик подстилающей поверхности, таких как альбедо, излучательная способность, высота шероховатости и части городского района, которые озеленены, застроены или орошаются. Очевидно, что наблюдения за скоростью ветра должны соответствовать рекомендациям, содержащимся в разделе 11.3.1. В идеальном варианте должны также проводиться наблюдения температуры воздуха и влажности над ПСШ; однако если имеются только значения по ГПС, это обычно является приемлемым, поскольку подобные схемы не являются очень чувствительными к указанным переменным.

11.3.11 Влажность почвы

Информация о влажности городской почвы может быть полезной, например, для садовников или при расчетах испарения. О ее тепловом значении в городских ландшафтах свидетельствуют совершенно отчетливо видимые очертания на изображениях в инфракрасном диапазоне частот, полученные посредством дистанционного зондирования. В дневное время любой участок земли с активной растительностью или орошением является заметно более холодным по сравнению с застроенным, асфальтированным или голым участком земли. Однако задача по проведению выборочных измерений для получения репрезентативных данных о влажности почвы является весьма сложной.

Одна из упомянутых проблем объясняется тем фактом, что значительные части городских поверхностей являются полностью герметичными из-за вымощенных или строительных объектов; структура значительной части открытой почвы была грубо нарушена в прошлом при проведении строительных работ или когда эти территории были покинуты после их использования в целях урбанизации; «почва» может быть фактически сформирована в значительной степени из каменных обломков старых зданий или материалов для мощения улиц или могла быть привезена для замены существующей почвы или наполнительного материала из дальних мест; влажность почвы может также испытывать воздействие в результате утечки воды из локализованных источников, таких как сломанные трубы водопровода или канализации или в результате орошения. Следствием воздействия всех этих элементов является весьма пятнистая картина влажности почвы в городах, которая может включать совершенно сухие участки, расположенные в непосредственной близости от залитых водой лужаек. Таким образом, хотя можно получить определенное представление о влажности почвы в местном масштабе, в районах с весьма низким уровнем урбанизации или в тех местах, где был сохранен полудикий ландшафт, почти невозможно характеризовать состояние влаги почвы в большинстве городских районов. Кроме того, в этом случае лучшим вариантом может быть использование значений, характерных для сельской местности, которые дают общее региональное значение, вместо того чтобы вообще не иметь никаких оценочных данных о почвенной влаге.

11.3.12 Текущая погода

При наличии наблюдателей и обычного приборного обеспечения станции значительную ценность представляют наблюдения за текущей погодой и

атмосферными явлениями, такими как изморозь, поверхностный лед, туман, пыльные и песчаные бури, воронкообразные облака и ливни, грозы с молнией, особенно те из них, которые представляют угрозу для эффективности или безопасности городской деятельности. Если имеются архивные возможности, то веб-камеры могут предоставить очень полезные сведения о состоянии облаков, краткосрочных изменениях в облачности, связанных с фронтами, полосах тумана, которые убывают и перемещаются, низкой облачности, которая поднимается и снижается, а также появлении фронтов пыльных и песчаных бурь.

11.3.13 Облачность

Хотя в крупных городах редко проводятся наблюдения за облачным покровом, эта информация является весьма полезной. Все методы и приборы, описанные в главе 15 части I, применимы и для условий городов. Визуальное наблюдение затрудняется из-за большого количества и интенсивности источников света в городах, сочетающихся с подернутой дымкой и иногда загрязненной атмосферой. По мере возможности, при размещении наблюдательной площадки следует избегать мест с особенно ярким освещением.

11.3.14 Состав атмосферы

Все более важное значение приобретает мониторинг атмосферного загрязнения городской окружающей среды. Однако это другая специальная дисциплина, и она не будет рассматриваться в этой главе. Глава 17 части I касается данной темы в более широком контексте Глобальной службы атмосферы.

11.3.15 Методы зондирования городского пограничного слоя

Поскольку вызываемые городами воздействия простираются по всему планетарному пограничному слою (рисунок 11.1), необходимо использовать башни и мачты для получения данных наблюдений над ПСШ. Особый интерес вызывают воздействия на поле ветра и вертикальную структуру температуры, включая высоту слоя перемешивания и их общую роль в оказании влияния на распространение загрязняющих веществ.

Для городских районов приемлемы все специальные методы зондирования, изложенные в главе 5 части II. Потенциально весьма полезными являются акустические зонды (содары); тем не менее необходимо признать, что они страдают двумя недостатками: во-первых, их сигналам часто мешают различные городские источники шума (дорожное движение, воздушные суда, строительные работы и даже газонокосилки); и во-вторых, их работа может быть запрещена, если они вызывают раздражение жителей. Радиолокаторы для получения профилей ветра, радиоакустические системы зондирования, микроволновые радиометры, микроволновые профилометры температуры, лазерные радары (лидары) и модифицированные облакомеры – все они являются подходящими системами для мониторинга городской атмосферы, если можно избежать помех в результате отражения от наземных предметов. Кроме того, шары-зонды для отслеживания траектории ветра, радиозонды пограничного слоя (минизонды) и оснащенные приборами привязные аэростаты – все они могут использоваться весьма успешно, если органы управления воздушным движением дают разрешение на их использование. Оснащенные приборами башни и мачты могут стать великолепным средством для размещения датчиков над уровнем крыши и в инерционном подслое, а очень высокие строения и конструкции могут обеспечить проведение измерений выше слоя перемешивания. Однако необходимо уделять особое внимание предосторожностям, изложенным в части II, глава 5, раздел 5.3.3, которые касаются потенциального воздействия опорной структуры на характеристики атмосферы. Хотя высотные здания могут, по-видимому, явиться средством для проникновения выше в городской пограничный слой, развертывание датчиков может быть бесполезным и, возможно, вводящим в заблуждение до тех пор, пока не будет дана полная оценка воздействий создающих помехи препятствий и не будут приняты меры для их предотвращения.

11.3.16 Спутниковые наблюдения

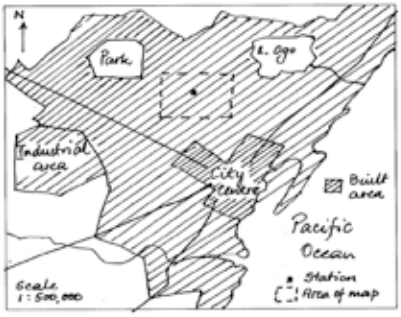
Дистанционное зондирование со спутника с адекватным разрешением в инфракрасном диапазоне может оказаться полезным для обследования обширных городских районов; однако описание этого метода выходит за рамки данной главы. Определенная информация имеется в главе 8 части II, и обзор по данной теме содержится в публикации Voogt и Oke, 2003.

11.4 МЕТАДАННЫЕ

Полная и точная документация по метаданным станции (часть I, глава 1) является абсолютно необходимой для любой станции; она должна «обеспечить, чтобы у конечного пользователя данных не было никаких сомнений относительно тех условий, в которых данные были зарегистрированы, собраны и переданы, для того чтобы сделать точные выводы из их анализа» (ВМО, 2003*a*). Можно утверждать, что

(a)

(b)



(c)

Рис. 11.6. Минимальная информация необходимая для описания локального (местного) масштаба окружающей среды городской станции, содержит (a) шаблон для документирования местных условий; (b) схематическая карта расположения станции в более крупной городской зоне; и (c) фотоснимок с воздуха.

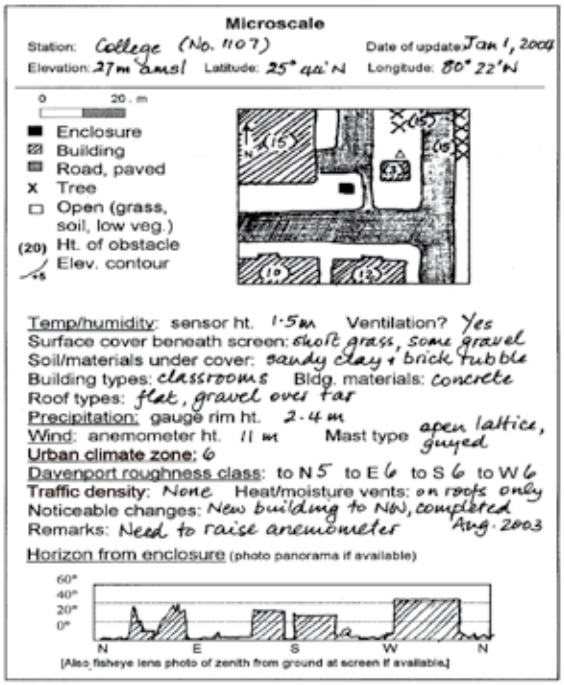
это является даже еще более существенным в отношении городской станции, поскольку городские участки характеризуются как необычайно высокой степенью сложности, так и большей склонностью к переменам. Эта сложность делает каждый участок действительно уникальным, в то время как большие открытые участки в сельской местности соответствуют относительно стандартному образцу. Перемены означают, что контрольные мероприятия по данному участку являются весьма динамичными, в связи с чем документация должна часто обновляться. На рисунке 11.6 отражено, что минимальные требования к метаданным станции, установленные ВМО (2003*a*), полностью выполняются и что есть надежда на то, что некоторые или все из рекомендованных в этих требованиях видов эффективной практики осуществляются. В данном случае особое внимание уделяется специальным городским характеристикам, которые необходимо включать в метаданные, в частности в категориях «местная окружающая среда» и «исторические события».

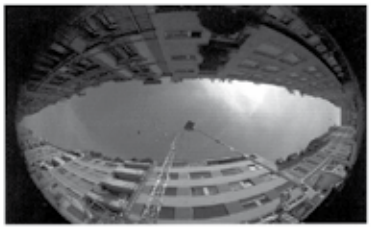
11.4.1 Местная окружающая среда

Как отмечается в разделе 11.1.1, в случае городских станций приборы устанавливаются как внутри городского полога (ГПС), так и над ним. Следовательно, описание окружающей местности должно быть сделано как в микромасштабе, так и в местном масштабе. Как следует из публикации ВМО (2003*a*), для адаптации с целью характеристики городской окружающей среды рекомендуется регистрировать на станции следующую описательную информацию:

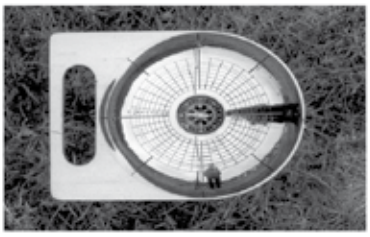
(a) карта в местном масштабе – мезомасштабе (~1:50 000), как показано на рисунке 11.6 (a), которая обновляется, в случае необходимости, для описания крупномасштабных изменений в городском развитии (например, передача незастроенных участков земли под жилищное строительство, сооружение торгового центра или аэропорта, строительство новых высотных зданий, вырубка лесного массива, осушение озера, создание водохранилища). В идеальном варианте следует также предоставить аэрофотоснимок данного района, а также простую схематическую карту (в масштабе 1:500 000 или 1:1 000 000) для указания местоположения станции по отношению к остальному урбанизированному району (рисунки 11.6 (b) и (c)), и любые основные географические характеристики, такие как водоемы, горы и долины или изменение типа экосистемы (пустыня, болото, лес). Особенно показательным может быть перспективный аэрофотоснимок, поскольку на нем также видна высота зданий и деревьев. Важное значение в том, что касается воздействий на микроклимат, имеют, при

(a)





(b)



(c)

Рис. 11.7. Информация требуемая для описания микромасштаба окружения городской климатической станции; (a) шаблон для файла метаданных; (b) пример фотоснимка объективом типа “рыбий глаз” уличного каньона иллюстрирует закрытость горизонта; и (c) UK Met Office полусферичекий рефлектор, расположенный на дождемере.

их наличии, аэрофотоснимки или спутниковые изображения в инфракрасном диапазоне частот. Например, относительное прохладные днем поверхности свидетельствуют о наличии влаги или материалов с анормальной излучательной способностью поверхности. Районы, более теплые по сравнению с обычными, могут быть очень сухими или иметь низкое альбедо или очень хорошую изоляцию. В ночное время относительная прохлада свидетельствует о хорошей изоляции, а относительное тепло говорит об обратном, или показывает наличие материала с высокой теплопроводимостью, который отдает накопленное в дневное время тепло, или же анормального источника тепла антропогенного происхождения. ГКЗ и классы шероховатости Дейвенпорта (Davenport) могут оцениваться при помощи таблиц 11.1 или 11.2;

(b) микромасштабная схематическая карта (~1:5 000), составленная на основе метаданных и обновляемая каждый год (рисунок 11.7 (a));

(c) картирование горизонта с использованием данных обследования с помощью клинометра и компаса вокруг метеорологической будки (как показано на диаграмме в нижней части модели, рисунок 11.7 (a), и фотография аппаратом с линзами типа «рыбий глаз», сделанная вертикально по отношению к зениту, когда задняя часть фотоаппарата находится на поверхности земли поблизости от метеорологической будки, но таким образом, чтобы она не закрывала какую-либо часть неба (рисунок 11.7 (b)). При отсутствии фотоаппарата с линзами типа «рыбий глаз» более простым подходом является снятие фотографии полусферического рефлектора (рисунок 11.7 (c)). Эти материалы следует обновлять ежегодно или еще чаще, если наблюдаются явные изменения в закрытии горизонта, такие как сооружение или снос находящегося рядом здания или удаление деревьев;

(d) фотографии, сделанные с основных направлений по отношению к приборному укрытию или другим местам нахождения приборов и башен;

(e) микромасштабная зарисовка приборного укрытия, которая обновляется, когда приборы перемещаются или происходят другие серьезные изменения;

(f) если некоторые из проводимых на станции измерений (ветер, радиация) проводится в стороне от укрытия (на мачтах, крышах, в более открытых местах), повторить пункты (b) – (d) выше для каждой площадки.

11.4.2 Исторические события

Городские районы подвержены воздействию многочисленных факторов перемен, включая новое муниципальное законодательство, которое может

изменить виды землепользования, разрешенные в данной местности, или высоту зданий, или допустимые материалы и строительную технологию, а также законы и нормативы, касающиеся окружающей среды, орошения или дорожного движения. Весьма кардинальные изменения в определенном районе могут быть вызваны инициативами в области центрального планирования, связанными с возобновлением градостроительства. Многие главные изменения в природной среде района могут быть также следствием миграций групп людей в этот район или из него или когда район становится или перестает быть удобным или модным для жизни или работы. Городская территория может быть центром конфликта и разрушения. Подобные события следует оформлять документально, с тем, чтобы последующие пользователи данных понимали определенный контекст изменений, которые могут, вероятно, появиться в городском климате.

11.4.3 Соблюдение других рекомендаций ВМО

На городских станциях следует соблюдать все другие рекомендации ВМО, касающиеся документального оформления метаданных, включая идентификаторы станции, географические данные, установку приборов, типы приборов, монтаж и укрытие приборов, регистрацию и передачу данных, практические методы наблюдений, хранение метаданных и доступ к ним, а также обработку данных.

11.5 ОЦЕНКА ОКАЗЫВАЕМЫХ ГОРОДОМ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Исследование городской погоды и климата характеризуется почти уникальной перспективой. Люди интересуются ролью человека в изменении городской атмосферы. Поэтому, в отличие от других представляющих интерес видов окружающей среды, для которых достаточным является изучение атмосферы как таковой, в городских районах существует интерес к изучению оказываемых городом воздействий. Это означает оценку возможных изменений в метеорологических переменных, поскольку городская территория со временем развивается, и сравнение этих переменных с тем, что случилось бы, если бы данный населенный пункт не был построен. Это вопрос, на который по существу невозможно найти ответ, когда населенный пункт уже построен или даже если он не был построен, поскольку ландшафт вполне может перейти в иное состояние по сравнению с тем, которое существовало раньше (например вследствие других видов деятельности человека, таких как сельское хозяйство или лесное хозяйство). Оценка воздействий города чревата поэтому трудностями методологического характера, и невозможна никакая «истина», а лишь заменяющие истину аппроксимации. Если городская станция создана в качестве самостоятельной или является частью сети, для оценки воздействий города на погоду и климат рекомендуется внимательно учитывать анализ, содержащийся в работах Lowry (1977) и Lowry и Lowry (2001).

11.6 РЕЗЮМЕ КЛЮЧЕВЫХ ПУНКТОВ ДЛЯ ГОРОДСКИХ СТАНЦИЙ

11.6.1 Принципы работы

При создании городской станции часто неприемлемыми являются строгие руководящие указания, касающиеся климатических станций. Необходимо применять руководящие принципы, а не правила, и придерживаться гибкого подхода. Часто это означает иные решения для отдельных атмосферных характеристик и может означать, что не все наблюдения на «площадке» проводятся в одном и том же месте.

Поскольку окружающая среда городских станций часто меняется по мере развития города, часто обновляемые метаданные имеют такое же важное значение, как и собранные метеорологические данные. Без четких описаний станций невозможно увязывать результаты измерений с характеристиками окружающей территории.

11.6.2 Выбор места размещения

Первым существенным шагом при выборе мест размещения городских станций является оценка физической природы городской территории, используя для этого классификацию климатических зон. Благодаря этому будут определены однородные территории.

Городская территория состоит из нескольких видов городских территорий. Для того, чтобы создать картину климата населенного пункта, необходимо иметь множество станций. Следует выбирать места их размещения, где можно проводить измерения параметров воздуха, поток которого проходит через относительно однородную городскую территорию, и которые являются, таким образом, репрезентативными для единой климатической зоны. Необходимо позаботиться об обеспечении того, чтобы микроклиматические воздействия не создавали помех для измерений параметров климата в местном масштабе.

11.6.3 **Измерения**

В отношении измерений следует учитывать следующие ключевые пункты:

(a) измерения температуры и влажности воздуха, проведенные в ГПС, могут быть репрезентативными в местном масштабе при условии внимательного выбора места размещения станций. Если наблюдения за этими переменными проводятся на уровне выше крыши, в том числе выше ПСШ, то нет никакой установленной связи между последними и измерениями в ГПС;

(b) измерения параметров ветра и потока турбулентности следует проводить над ПСШ, но в пределах внутреннего пограничного слоя выбранной ГКЗ. Подобные измерения должны свидетельствовать о том, что «отпечаток» поверхности, используемый для измерений, является репрезентативным для климатической зоны. Что касается ветра, то можно увязывать данные о потоке на этом уровне с данными потока, зарегистрированными в пределах растительного покрова;

(c) наблюдения за осадками можно проводить либо вблизи поверхности земли на незакрытой препятствиями площадке, либо над ПСШ, с внесением поправок в соответствии с данными параллельных измерений параметров ветра;

(d) за исключением измерений приходящей солнечной радиации следует избегать размещения приборов на верху крыш, если только они не устанавливаются на высокой мачте;

(e) измерения нетто-потоков и восходящих радиационных потоков должны проводиться на высотах, которые обеспечивают возможность адекватных измерений разных типов поверхности и их ориентации, характерной для изучаемой зоны.

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Arya, P.S., 2001: *Introduction to Micrometeorology*. Academic Press, New York.

Auer, A.H. Jr., 1978: Correlation of land use and cover with meteorological anomalies. *Journal of Applied Meteorology*, Volume 17, Issue 5 pp. 636–643.

Britter, R.E. and S.R. Hanna, 2003: Flow and dispersion in urban areas. *Annual Review of Fluid Mechanics*, Volume 35, pp. 469–496.

Christen, A., 2003: (personal communication). Institute of Meteorology, Climatology and Remote Sensing, University of Basel.

Christen, A., R. Vogt, M.W. Rotach and E. Parlow, 2002: *First results from BUBBLE I: Profiles of fluxes in the urban roughness sublayer*. *Proceedings of the Fourth Symposium on Urban Environment*, (Norfolk, Virginia), American Meteorological Society, Boston, pp. 105-106.

COST-710, 1998: *Final Report*: *Harmonisation of the Pre-processing of Meteorological Data for Atmospheric Dispersion Models*. European Commission. EUR 18195 EN.

COST-715, 2001: *Preparation of Meteorological Input Data for Urban Site Studies*. European Commission, EUR 19446 EN.

Davenport, A.G., C.S.B. Grimmond, T.R. Oke and J. Wieringa, 2000: *Estimating the roughness of cities and sheltered country*. *Proceedings of the Twelfth Conference on Applied Climatology* (Asheville, North Carolina), American Meteorological Society, Boston, pp. 96–99.

DePaul, F.T. and C.M. Shieh, 1986: Measurements of wind velocity in a street canyon. *Atmospheric Environment*, Volume 20, pp. 455–459.

Ellefsen, R., 1991: Mapping and measuring buildings in the canopy boundary layer in ten US cities. *Energy and Buildings*, Volume 16, pp. 1025–1049.

Garratt, J.R., 1992: *The Atmospheric Boundary Layer*. Cambridge University Press, Cambridge.

Gill, G.C., L.E. Olsson, J. Sela and M. Suda, 1967: Accuracy of wind measurements on towers or stacks. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Volume 48, pp. 665–674.

Grimmond, C.S.B. and T.R. Oke, 1999: Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form. *Journal of Applied Meteorology*, Volume 38, Issue 9, pp. 1262–1292.

Grimmond, C.S.B. and T.R. Oke, 2002: Turbulent heat fluxes in urban areas: Observations and a local-scale urban meteorological parameterization scheme (LUMPS). *Journal of Applied Meteorology*, Volume 41, Issue 7, pp. 792–810.

Halitsky, J., 1963: Gas diffusion near buildings. *Transactions of the American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers*, Volume 69, pp. 464–485.

Hanna, S.R. and J. C. Chang, 1992: Boundary-layer parameterizations for applied dispersion modeling over urban areas. *Boundary-Layer Meteorology*, Volume 58, pp. 229–259.

Hunt, J.C.R., C.J. Abell, J.A. Peterka and H.Woo, 1978: Kinematical studies of the flow around free or surface-mounted obstacles: Applying topology to flow visualization. *Journal of Fluid Mechanics,* Volume, 86, pp. 179–200.

Kljun, N., M. Rotach, and H.P. Schmid, 2002: A three-dimensional backward Lagrangian footprint model for a wide range of boundary-layer stratifications. *Boundary-Layer Meteorology*, Volume 103, Issue 2, pp. 205–226.

Kljun, N., P. Calanca, M.W. Rotach, H.P. Schmid, 2004: A simple parameterization for flux footprint predictions. *Boundary-Layer Meteorology,* Volume 112, pp. 503–523.

Landsberg, H.E., 1981: *The Urban Climate*. Academic Press, New York.

Lowry, W.P., 1977: Empirical estimation of urban effects on climate: A problem analysis. *Journal of Applied Meteorology*, Volume 16, Issue 2, pp. 129–135.

Lowry, W.P. and P.P. Lowry, 2001: *Fundamentals of Biometeorology: Volume 2 – The Biological Environment*. Chapter 17, Peavine Publications, St Louis, Missouri, pp. 496–575.

Nakamura, Y. and T.R. Oke, 1988: Wind, temperature and stability conditions in an east-west oriented urban canyon. *Atmospheric Environment*, 22, pp. 2691–2700.

Oke, T.R. 1981: Canyon geometry and the nocturnal heat island: Comparison of scale model and field observations. *Journal of Climatology*, Volume 1, Issue 3, pp. 237–254.

Oke, T.R., 1982: The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Volume 108, Issue 455, pp. 1–24.

Oke, T.R., 1984: Methods in urban climatology. In: *Applied Climatology* (W. Kirchofer, A. Ohmura and W. Wanner, eds). Zürcher Geographische Schriften, Volume 14, pp. 19–29.

Oke, T.R., 1988*a*: The urban energy balance. *Progress in Physical Geography*, Volume 12, pp. 471–508.

Oke, T.R., 1988*b*: Street design and urban canopy layer climate. *Energy and Buildings*, Volume 11, pp. 103–113.

Oke, T.R., 1997: Urban environments. In: *The Surface Climates of Canada* (W.G. Bailey, T.R. Oke and W.R. Rouse, eds). McGill-Queen's University Press, Montreal, pp. 303–327.

Peterson, T.C., 2003: Assessment of urban versus rural in situ surface temperatures in the contiguous United States: No difference found. *Journal of Climate*, Volume 16, pp. 2941–2959.

Rotach, M.W., 1999: On the influence of the urban roughness sublayer on turbulence and dispersion. *Atmospheric Environment*, Volume 33, pp. 4001–4008.

Schmid, H.P., 2002: Footprint modeling for vegetation atmosphere exchange studies: A review and perspective. *Agricultural and Forest Meteorology*, Volume 113, Number 1, pp. 159–183.

Schmid, H.P., H.A. Cleugh, C.S.B. Grimmond and T.R. Oke, 1991: Spatial variability of energy fluxes in suburban terrain. *Boundary-Layer Meteorology*, Volume 54, Issue 3, pp. 249–276.

Soux A., J.A. Voogt and T.R. Oke, 2004: A model to calculate what a remote sensor 'sees' of an urban surface. *Boundary-Layer Meteorology*, Volume 111, pp. 109–132.

Stull, R.B., 1988: *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

Verkaik, J.W., 2000: Evaluation of two gustiness models for exposure correction calculations. *Journal of Applied Meteorology*, Volume 39, Issue 9, pp. 1613–1626.

Voogt, J.A. and T.R. Oke, 2003: Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, Volume 86, Number 3, pp. 370–384.

Wieringa, J., 1986: Roughness-dependent geographical interpolation of surface wind speed averages. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,* Volume 112, Issue 473, pp. 867–889.

Wieringa, J., 1993: Representative roughness parameters for homogeneous terrain. *Boundary-Layer Meteorology*, Volume 63, Number 4, pp. 323–363.

Wieringa, J., 1996: Does representative wind information exist? *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Volume 65, Number 1, pp. 1–12.

World Meteorological Organization, 1983: *Guide to Climatological Practices*. Second edition, WMO-No. 100, Geneva.

World Meteorological Organization, 1988: *Technical Regulations*. Volume I, WMO-No. 49, Geneva.

World Meteorological Organization, 1995: *Manual on Codes.* WMO-No. 306, Geneva.

World Meteorological Organization, 2003*a: Guidelines on Climate Metadata and Homogenization* (E. Aguilar, I. Auer, M. Brunet, T.C. Peterson and J. Wieringa). World Climate Data and Monitoring Programme
No. 53, WMO/TD-No. 1186, Geneva.

World Meteorological Organization, 2003*b: Manual on the Global Observing System.* WMO-No. 544, Geneva.

World Meteorological Organization, 2006: *Initial Guidance to Obtain Representative Meteorological Observations at Urban Sites* (T.R. Oke). Instruments and Observing Methods Report No. 81, WMO/TD-No. 1250, Geneva.

ГЛАВА 12

МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ НА ДОРОГАХ

12.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

12.1.1 Определение

Метеорологические измерения на дорогах имеют особую ценность в странах, где возможность эксплуатации транспортной инфраструктуры в зимнее время оказывает большое влияние на национальную экономику. В некоторых странах на дорогах существуют и такие опасности как пыльные бури или извержения вулкана. Безопасность и эффективность дорожного транспорта испытывает негативное воздействие следующих условий, которые влияют на скорость, пройденный путь, сцепление покрышки колеса с дорогой и эффективность торможения: плохая видимость (обильные осадки, туман, дым, песчаная буря), сильные ветры, затопление поверхности, просадка земли, снег, переохлажденные осадки и лед.

12.1.2 Цель

Роль оператора дорожной сетью заключается в обеспечении оптимального, безопасного и свободного дорожного движения на магистральных дорогах. Принятие оперативных решений относительно выдачи информации о погоде на дорогах и начале действий по удалению льда и расчистки снега зависит от метеорологических наблюдений на дорогах, которые во все большей мере осуществляются целевыми автоматическими метеорологическими станциями (АМС). Пока эти станции должны соответствовать, насколько это практически возможно, стандартам обычных АМС, касающимся установки и параметров измерений (см. часть II, глава 1), они будут иметь характеристики, конкретно определяющие их функцию, место расположения и требования к проведению измерений.

Решающее значение имеет надежность станций для метеорологических измерений на дорогах, которые предоставляют данные транспортной системе, отвечающей за принятие решений. Каждая станция будет представлять набор параметров непосредственно той окружающей среды которая примыкает к магистралям с высокой плотностью движения и может быть ответственной за предоставление данных для регулярного прогнозирования метеорологических условий на дорогах и подачи автоматических сигналов тревоги. Таким образом, важными элементами при выборе, внедрении и управлении сетью наблюдений метеорологических измерений являются надежность и техническое обслуживание оборудования, энергоснабжение, непрерывность связи и целостность данных. Для решения этих задач необходимо воспользоваться преимуществами, которые дает эффективное сотрудничество между дорожными эксплуатационными службами и национальной метеорологической и гидрологической службой (НМГС).

12.1.3 Требования к метеорологическим наблюдениям на дорогах

Эта глава может помочь в стандартизации метеорологических измерений на дорогах на основе метода, который соответствует общим стандартам ВМО. Однако, те пользователи, которые захотят использовать данные дорожных наблюдений в других метеорологических целях, им будут рекомендованы важные отступления, например, с местоположением сенсора.

Потребности оператора дорожной сетью сосредоточены в четырех основных областях (ВМО 1997; 2003*a*):

(a) *наблюдение метеорологических условий на дорогах в режиме реального времени*: практической задачей, с одной стороны, является информирование участников дорожного движения о тех рисках (прогнозируемых или наблюдаемых), с которыми они, вероятно, столкнутся на указанных магистралях; и, с другой стороны, начало осуществления ряда действий, направленных на усиление безопасности на дорогах, таких как очищение от снега или разбрызгивание химических веществ, понижающих температуру замерзания;

(b) *повышение точности прогнозирования температуры дорожного покрытия*: данные измерений дорожных АМС являются важной исходной информацией для программ прогнозирования температуры и состояния дорожного покрытия, которые могут использоваться НМГС. Такая структура имеет возможности для обеспечения постоянных и круглосуточных наблюдений и прогностического обслуживания. На практике в распоряжении прогнозистов имеются два инструмента. Первый инструмент – это компьютерная модель для преобразования метеорологического прогноза атмосферных условий в прогноз температуры дорожной

поверхности, учитывая при этом физические характеристики каждой станции. Вторым инструментом является применение алгоритма, основанного на конкретном климатологическом исследовании дорожной поверхности;

(c) *база данных дорожных климатических условий*: создание базы данных дорожных климатических условий имеет важное значение, поскольку во многих ситуациях оценка текущих событий вместе с хорошим приборным обеспечением дает возможность опытным операторам дорожной сети преобразовывать эти данные, пользуясь климатической моделью применительно к другим, хорошо им известным местам. В некоторых случаях для моделирования этого пространственного соотношения могут быть взяты «термальные отпечатки». Регистрация дорожных метеорологических данных будет полезной для анализа предыдущих зимних метеорологических возмущений и осуществления целевых климатологических исследований на дорогах. Национальные метеорологические и гидрологические службы могут восполнить пробелы в данных, а также сравнить и обеспечить качество данных измерений, поступающих из различных источников;

(d) *достоверные данные*: лицам, ответственным за состояние дорог, не нужны слишком точные измерения (за исключением температуры дорожного покрытия). Скорее они хотят получить максимально достоверные данные. Иными словами, эти данные должны соответственно отражать реальную ситуацию, а измерительные устройства должны быть функциональными. Часто первостепенное значение имеет непрерывность связи и энергоснабжения.

12.2 СОЗДАНИЕ ДОРОЖНОЙ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

12.2.1 Стандартизированные репрезентативные измерения

Общие требования к метеорологическим станциям, их размещению, а также типу и частоте измерений, определены в публикации ВМО (1988; 2003*a*). Рекомендуется точно следовать этим стандартам и другому соответствующему материалу, содержащемуся в этом Руководстве, при создании дорожных метеорологических станций, для того, чтобы проводить стандартизированные репрезентативные измерения, которые могут быть соотнесены с данными измерений на других дорожных станций в данной сети, а также с данными эталонных синоптических или климатологических станций, за исключением тех случаев, когда уникальные измерения метеорологических условий на дорогах требуют других стандартов, например в отношении местоположения датчиков. Рекомендации по оптимальному размещению и плотности станций могут быть получены из местного отделения НМГС, которое может иметь доступ к климатологическим данным по конкретному региону.

Место размещения метеорологической станции выбирается таким образом, чтобы оно должным образом представляло конкретный географический регион. Дорожная метеорологическая станция будет размещаться так, чтобы наилучшим образом отражать ситуацию на дорожной сети или конкретном участке важной магистрали, которые, как известно, подвергается воздействию метеорологических и других опасных явлений. Станция должна прилегать поэтому к определенному участку дороги, для того, чтобы можно было установить датчики состояния дорожного покрытия, и в этой связи может иметь место определенный компромисс между «идеальным» метеорологическим размещением и установкой датчиков. Датчики монтируются таким образом, чтобы их установка обеспечивала самую оптимальную репрезентативность в пространстве и во времени измеряемых переменных величин без ненужных помех со стороны вторичных воздействий. В целом место размещения, непосредственно прилегающее к дороге, должно быть ровным, покрытым короткой травой и не затеняться зданиями или деревьями.

12.2.2 Метаданные станции

В любом случае, важно полностью документировать характеристики места размещения станции, а также спецификацию оборудования и датчиков, включая планы и фотографии места размещения. Эти метаданные (часть I, глава 1, и часть III, глава 1) являются бесценными для управления работой станции и для сравнения качества измерений с измерениями, проводимыми в других местах.

12.3 НАБЛЮДАЕМЫЕ ПЕРЕМЕННЫЕ

12.3.1 Метеорологические измерения на дорогах

Важные измерения на дорожных метеорологических станциях, необходимые для прогнозирования условий на дорогах, включают температуру и влажность

воздуха, скорость и направление ветра, объем и тип осадков, видимость, суммарную и длинноволновую радиацию, температуру дорожной поверхности и состояние дорожной поверхности. Данные некоторых измерений, например температура и влажность, будут использованы для прогнозирования условий, вызывающих повышенное внимание участников дорожного движения, в то время как другие данные (о ветре и видимости) могут быть предвестниками предстоящих опасных явлений или наблюдаемых в режиме реального времени; в то же время, другие данные (метеорологическая радиация, температура и условия дорожной поверхности) имеют конкретное значение для прогнозирования эксплуатационных характеристик дорожной поверхности.

Выбор датчиков производится в соответствии с их точностью, стабильностью, легкостью в техническом обслуживании и калибровки, а также наличием электрических выходов, необходимых для подсоединения к системе автоматического сбора данных. Выбор датчиков и их установка должны соответствовать стандартной практике и рекомендациям ВМО (см. соответствующие главы в части I настоящего Руководства), за исключением случаев их несовместимости с конкретными требованиями дорожной метеорологии. Точность измерений должна, как правило, соответствовать техническим характеристикам, изложенным в части I, глава 1, приложение 1B. Отметим также рекомендации по измерениям на АМС, содержащиеся в главе 1 части II.

12.3.1.1 Температура воздуха

Датчиком может быть термометр сопротивления (платиновый или стабильный термистор). Датчик температуры воздуха, его защита от радиации или метеорологическая будка и установка должны соответствовать руководящим указаниям, содержащимся в главе 2 части I, при этом защита должна монтироваться на высоте 1,25 – 2 м над короткой стриженной травой или естественной почвой.

Проблемы измерений: датчик и метеорологическая будка не должны монтироваться над бетонными или асфальтовыми поверхностями, которые могут завышать измеряемую температуру. Экран должен устанавливаться таким образом, чтобы закрывать датчик от забрызгивания водой от колес проходящих мимо транспортных средств; оно может вызывать существенные ошибки измерений.

12.3.1.2 Относительная влажность

Гигрометрическим датчиком может быть датчик с элементом в виде тонкой электропроводимой пленки или датчик емкостного типа (часть I, глава 4). Не рекомендуется психрометр со смоченным термометром из-за постоянного загрязнения увлажнителя углеводородами. Этот датчик может сочетаться или располагаться вместе с датчиком температуры воздуха в его радиационном экране, поскольку тепловая выходная мощность датчика (самонагрев) является весьма низкой для того, чтобы влиять на измерение температуры.

Проблемы измерений: отметим, что как и в случае датчика температуры, опасностью является забрызгивание водой. Эксплуатационные характеристики датчика влажности зависят от последствий загрязнения, вызываемого воздействием атмосферы и транспортных средств. Регулярно должен проводиться функциональный контроль в рамках контроля качества сбора данных, а калибровка должна проверяться по меньшей мере каждые шесть месяцев, особенно перед зимним сезоном. Неправильно реагирующий датчик должен быть немедленно заменен.

12.3.1.3 Скорость и направление ветра

Эти переменные обычно измеряются при помощи либо пары датчиков чашечного и флюгерного типа, либо посредством лопастного анемометра (часть I, глава 5) с импульсным или частотным выходом. Датчики должны монтироваться на стандартной высоте в 10 м над поверхностью земли и на репрезентативной открытой территории, с тем чтобы осуществлять измерения, которым не мешают возмущения потока воздушной массы, вызванные дорожным движением или местными препятствиями.

Проблемы измерений: потенциальными опасностями являются замерзание движущихся частей, попадание воды и коррозия, а также удар молнии.

12.3.1.4 Осадки

(a) Суммарные осадки: на автоматических станциях обычно используется прибор-самописец с опрокидывающимся ведром (часть I, глава 6), в котором суммируется увеличение осадков, составляющее обычно 0,2 мм. Для измерения осадков в виде снега и других твердых осадков могут применяться обогреваемые осадкомеры. Скорость выпадения осадков может оцениваться посредством регистрации числа отсчетов в установленный интервал времени.
Проблемы измерений: осадкомер должен постоянно находиться в ровном положении, а его воронка и контейнеры должны оставаться чистыми и открытыми. Дождемер с опрокидывающимся ведром не подходит для указания начала очень слабого дождя или в течение длительных

периодов морозной погоды. Суммарные показания будут ниже истинных значений из-за воздействий ветра вокруг приемного отверстия, испарения из контейнеров в периоды между ливнями и потерями между краями контейнеров при сильном дожде;

(b) *выпадение и тип осадков*: имеются датчики, в которых используются электронные средства (включая подогреваемые решетки, измерения с использованием элемента проводимости и емкости) для оценки характера выпадающих на них осадков (изморозь, дождь или снег). Более четкое различие при гораздо большей стоимости обеспечивается оптическими датчиками, которые определяют характеристику осадков (размер, плотность и движение частиц) посредством рассеяния луча полупроводникового лазера.

Проблемы измерений: эти наблюдения являются весьма желательными на всех станциях, однако существующим типам датчиков не хватает дискриминационной способности и стабильной воспроизводимости результатов. Должны приниматься меры (циклы обогрева) для удаления накопившегося на поверхности снега. Необходима регулярная чистка чувствительных элементов и оптических поверхностей.

Следует устанавливать только датчики, имеющие сертификаты и возможность калибровки по надлежащему эталону. Если в какой-либо системе используется алгоритм для косвенного выведения переменной величины, этот алгоритм следует также документировать.

12.3.1.5 Метеорологические радиационные параметры

(a) *Суммарная радиация*: солнечная радиация (прямая и рассеянная), попадающая под телесным углом 2 π *sr* на горизонтальную поверхность, должна измеряться при помощи пиранометра, оборудованного термоэлектрическими или фотоэлектрическими сенсорными элементами (часть I, глава 7). Датчик должен быть размещен таким образом, чтобы над плоскостью прибора не было никаких расположенных рядом значительных препятствий и чтобы на датчик не падало никаких теней или световых отражений. Несмотря на то, что датчик должен быть размещен таким образом, чтобы предотвратить причинение ему случайного повреждения, он должен быть еще и доступен для проверки и чистки. Особое значение для оператора дорожной сети имеет суммарная радиация, измеряемая «в точке». Она характеризует количество энергии, которую получает данный участок дороги в течение дня. Отношение поступающей радиации к температуре дороги и инерции дороги будет зависеть от составных материалов и размеров дорожной массы.

Проблемы измерений: закрытие горизонта датчика; неровная установка датчика; грязная поверхность; снег или иней, закрывающий стеклянный купол или сенсорную поверхность; и конденсация воды внутри стеклянного купола;

(b) *длинноволновая радиация*: может быть использован пиргеометр, который измеряет радиацию в инфракрасном диапазоне при помощи термопреобразователя, фильтрующего видимый спектр. Будучи смонтированным вместе с датчиком, направленным вниз и на достаточно открытый горизонт, он определяет длинноволновую радиацию, поступающую из атмосферы, в частности ночью, и дает сведения об облачности и, соответственно, о радиационном охлаждении на дорогах. Достаточным для целей прогнозирования погодных условий на дорогах является датчик чувствительный к спектру 5 – 50 μm, максимальной чувствительностью 15 μV/Wm^2 и временем реакции менее 5 с.

Проблемы измерений: см. проблемы, связанные с суммарной радиацией.

12.3.1.6 Видимость

Могут применяться трансмиссометры и измерители прямого рассеяния (часть. I, глава 9).

Проблемы измерения: операторы дорожными сетями заинтересованы в данных о видимости менее 200 м (порог опасности). Важное значение имеет чистота окон и линз датчиков. Некоторые системы будут компенсировать в определенной степени загрязнение окон. Во время планового технического обслуживания следует осуществлять соответствующую процедуру калибровки.

12.3.1.7 Температура дорожного покрытия

Имеются активные датчики на основе 100 Ом платинового резистора и обеспечивающие цифровую последовательную передачу данных, которые могут быть установлены в поверхность дороги. Следует выполнять инструкции производителя, касающиеся установки датчика, его кабельного подключения и прикрепления к дорожной поверхности. Датчик должен размещаться за полосой движения автомобильных колес, поскольку в противном случае поверхность датчика будет загрязнена, а данные измерений искажены из-за тепла, образуемого

трением. Датчик должен быть вмонтирован в ровной поверхности дороги без каких-либо углублений, в которых вода может собираться и влиять на измерение. Правильность расположения датчика должна проверяться на регулярное основе.

Проблемы измерений: время нагрева (постоянная времени) датчика и того материала, в который он вмонтирован, должны соответствовать составу дорожного покрытия. Датчик должен иметь поверхность с низким показателем поглощения инфракрасного излучения, с тем чтобы минимизировать вызываемую радиацией ошибку. Для длинных соединительных кабелей (более 20 м) рекомендуется компенсация кабельного сопротивления.

12.3.1.8 Температура грунта

Температура грунта на глубине 5, 10 и 20 см ниже поверхности дороги может определяться посредством установки должным образом защищенных электрических датчиков сопротивления на соответствующие глубины и использования подходящего связывающего материала.

Проблемы измерения: см. проблемы, связанные с температурой дорожного покрытия.

12.3.1.9 Состояние дорожного покрытия и температура замерзания

Этот датчик оценивает состояние дорожного покрытия (сухое, влажное, иней, лед) и температуру замерзания оставшейся на поверхности воды. Контрольная цепь датчика нагревает его, не допуская охлаждения, используя для этого эффект Пельтье. Скорость охлаждения является функцией состояния поверхности и температуры замерзания. См. также главу 6 части I относительно льда на дорожном покрытии. Выходные данные датчика должны обеспечить операторовдорожных сетей сведениями о наличии химического противообледенительного вещества в конкретном месте и дать им возможность оптимизировать действия по разбрызгиванию химического вещества.

Проблемы измерений: датчик не должен быть закрыт чужеродным материалом или при нанесении нового дорожного покрытия. Датчик требует регулярной чистки. Трудно обеспечить реагирование датчика, которое является репрезентативным для подлинного состояния дорожного покрытия из-за малой площади выборочных измерений, места дорожного покрытия и отклонений при практической установки. Измерение зависит от плотности дорожного движения и, в противном случае, со временем не является стабильным. Может возникнуть трудность с применением датчика, у которого мало альтернативных моделей. Дистанционное зондирование температуры дорожной поверхности при помощи тепловых инфракрасных датчиков обычно является практически невозможным из-за помех, создаваемых забрызгиванием водой, летящей от колес автомобилей. Оценка риска гололеда на поверхности дороги может быть улучшена благодаря более точному измерению температуры, влажности и температуры воздуха вблизи дорожного покрытия, а именно благодаря более точной установке датчика и уменьшению систематических и случайных ошибок.

12.3.1.10 Видионаблюдение

Видеонаблюдение – это компонент того, что стало называться умными транспортными системами. Они используются главным образом для обнаружения дорожных аварий, а также для предоставления полезных сведений о текущей погоде для управления транспортным движением. Алгоритмы обработки изображений будут способствовать распознаванию разных погодных условий.

12.4 ВЫБОР ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ДОРОЖНОЙ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

В главе 1 части II приводится информация, которая может быть использована для применений, связанных с метеорологическими измерениями на дорогах. В последующих разделах внимание обращается на конкретные вопросы и проблемы, вытекающие из опыта управления дорожными сетями, в частности необходимости высокой эффективности работы в тех случаях, когда безопасность населения является первоочередной задачей.

12.4.1 Экологические условия на дорогах

Дорожная метеорологическая станция подвергается значительному стрессу из-за близости к дороге: вибрация, помехи от систем зажигания автомашин, выброс загрязняющих веществ, коррозия из-за разбрызгивания соляного раствора и негативное влияние населения. В некотором отношении можно считать, что станция действует в условиях промышленной окружающей среды, и все это предполагает прочность конструкции и озабоченность по поводу целостности данных. Часто встречающиеся проблемы включают: отсутствие защиты от перенапряжения в цепях сопряжения датчика; недостаточная электроизоляция между датчиками, кабелями датчиков и блоком сбора данных; переменное сопротивление соединительного контакта, вызывающее дрейф

калибровки; сбой измерения; и необходимость дополнительного технического обслуживания.

12.4.2 Обрабатывающая способность удаленной станции

Конструкция АМС модифицирована, для того чтобы: расширить возможности по обработке и хранению данных в удаленном блоке для сбора данных, с тем чтобы применять алгоритмы обработки, которые действуют для нескольких сигналов датчиков, и получать комплексные выходные данные; гарантировать определенный уровень качества данных; обеспечивать двустороннюю связь между контрольным центром и удаленными блоками для диагностики эффективности работы как датчика, так и блоков; и обеспечивать загрузку новых алгоритмов и обновление программного обеспечения в удаленных блоках. С другой стороны, более надежную и менее дорогостоящую комплексную систему представляет собой сеть удаленных станций, которые являются не более сложными, чем это необходимо, для надежного сбора данных, а также центральный компьютер для контроля и сбора данных, в котором осуществляется обработка более сложных алгоритмов, обеспечение качества и преобразование кода, а также более высокий уровень обработки данных для решений, связанных с управлением дорожной сетью. От лиц, связанных с осуществлением сети метеорологических измерений на дорогах, требуется рассмотрение вопроса о гибких и более оперативных решениях в отношении оборудования с вариантами мощного программного обеспечения для обработки данных датчиков и контроля системы.

Процесс обработки данных станцией может включать: контроль цикла измерений (начало, частота, сроки и дата); комплексное управление датчиком (включение/выключение энергоснабжения, режим выборочных измерений); обработку сигнала датчика (фильтрация, преобразование в научные единицы, алгоритмы); проверки качества данных; формирование сигнала опасности (переменные величины вне установленных пределах, частичный сбой системы, нарушение пригодности станции к эксплуатации); хранение данных (краткосрочное хранение и архивирование); формирование исходящего сообщения (кодовая форма, протокол связи); управление связью; и обслуживание станции (энергоснабжение, проверки датчиков, связь).

12.4.3 Конфигурация сети и варианты оборудования

При выборе оборудования для станции, системы связи и контроля сети (сетевая инфраструктура) необходимо учитывать конкретные запросы дорожной метеорологии и процесс принятия решений лицами, отвечающими за управление дорожной сетью. На этот выбор существенно повлияют отношения между организацией, эксплуатирующей сеть дорог, и местной НМГС. Например, орган, отвечающий за эксплуатацию дорожной сети, может заключить договор с НМГС о предоставлении услуг по прогнозированию метеорологических условий на дорогах и конкретных данных о дорогах, к которым операторы дорожной сети применяют свои физические (метеорологические) условия для принятия оперативных решений. В подобном случае будет логично, если станции дорожной сети будут представлять собой продолжение сети АМС НМГС, используя общее аппаратное обеспечение станций, службу связи и технического обслуживания с уделением при этом особого внимания надежности данной сети, и располагать специальными датчиками, алгоритмами и программным обеспечением для решения задачи, связанной с метеорологическими измерениями на дорогах. В то же время, если подобная тесная интеграция является практически невозможной, орган, отвечающий за эксплуатацию дорог, может, тем не менее, пожелать обеспечить определенную унификацию с системами НМГС, с тем чтобы воспользоваться ее оперативным опытом и возможностью снабжения аппаратным обеспечением и запасными частями.

В том случае, если требуется абсолютно новая или отдельная сеть, рекомендуются следующие руководящие указания в отношении выбора оборудования для сбора данных и обеспечения связи. Вместо того, чтобы разрабатывать новое аппаратное и программное обеспечение для метеорологических измерений на дорогах, разумно использовать существующие и зарекомендовавшие себя системы, изготавливаемые пользующимися хорошей репутацией производителями и источниками, с единственной необходимой адаптацией применительно к дорожной сети, а также воспользоваться опытом и рекомендациями других операторов дорожной сети. Оборудование и его программное обеспечение должны быть модульными для того, чтобы позволить добавление в будущем датчиков и внесение изменений в их спецификации. В целях содействия расширению сети через несколько лет будет весьма полезно, если аппаратное обеспечение будет сконструировано на основе стандартизированных моделей на базе стабильного промышленного производства, когда последующие модели являются технически совместимыми с моделями предыдущих поколений.

12.4.4 Конструирование для обеспечения надежности

Модули для обработки данных должны иметь промышленную стандартную архитектуру с надежными стандартными операционными системами,

которые характеризуются хорошо управляемой процедурой обновления. Прикладное программное обеспечение должно быть написано на стандартном языке и хорошо документировано. Для достижения желаемой надежности могут быть отобраны специальные промышленные компоненты и модули. Более дешевой альтернативой может быть использование стандартных коммерческих моделей с дублирующими параллельными или резервными системами для обеспечения надежности системы. Особое внимание необходимо уделять дистанционному устройству для энергоснабжения. Может быть рекомендовано непрерывное энергоснабжение, однако следует признать, что системы связи будут также зависеть от функционирования местного источника энергоснабжения.

Какой бы ни была конструкция системы, ее надежность значительно повысится благодаря размещению электронных компонентов в прочной, коррозионно-устойчивой, защищенной от перепадов температуры оболочке, в которую не проникает пыль и влага. Соединительные элементы, по которым проходят сигналы датчика, должны быть высококачественными в соответствии с промышленной или военной классификацией и хорошо защищенными от деформации кабеля, проникновения воды и коррозии. Кабельные соединения датчика должны иметь заземленный экран и прочную водонепроницаемую изолирующую оболочку и закладываться в кабельный канал.

Особое внимание следует уделять снижению воздействия электрического шума или помех, проникающих в систему сбора данных через кабели датчика, линии электроснабжения или связи. Эти нежелательные электрические сигналы могут явиться причиной ошибок в сигналах датчика и искажения данных, а также вызывать сбой в работе электронного оборудования, особенно в чувствительных цепях сопряжения. Большое внимание необходимо уделять: конструкции датчика и изоляции линии связи, а также защите от перенапряжения, включая надлежащий уровень защиты от атмосферного электричества; должному заземлению датчиков, систем электроснабжения, коммуникационных модемов и электрошкафов; и защите при помощи заземленного экрана всех частей цепи измерений, избегая при этом контурных токов заземления, которые могут вызывать ошибки в измерениях.

Надежности системы будет в значительной мере способствовать оптимальная стандартизированная практика установки и технического обслуживания. Надежность системы также связана со «средним временем ремонта», которое включает время на обработку вызова и поездку работников технического обслуживания для замены оборудования, используя для этого запасные цельные блоки и модули.

12.5 КОДИРОВАНИЕ СООБЩЕНИЙ

12.5.1 Функции кодирования

Сообщение, переданное с удаленной дорожной метеорологической станции, будет содержать идентификатор станции, время и дату сообщения, данные каналов датчика, включая идентификатор каналов, и некоторые данные о «состоянии» станции, которые могут включать информацию о безопасности, энергоснабжении и калибровке станции и о других проверках качества данных. Это сообщение будет содержаться в кодовом пакете, соответствующим каналу связи, с заголовком, содержащим адрес, а также символы, относящиеся к управляющей информации и проверке избыточности для обеспечения выявления ошибки. Часть сообщения с данными о дорожных метеорологических условиях может быть закодирована любым эффективным, недвусмысленным способом, который позволяет центральному компьютеру управления и сбора данных декодировать и обработать сообщение перед тем как передавать доступную для понимания инструктивную информацию операторам дорожной сети для принятия ими решения.

12.5.2 Руководство по кодированию ВМО

Разработчикам сетей метеорологических измерений на дорогах следует также принимать во внимание руководство по кодированию сообщений ВМО (см. ВМО, 1995), которое дает возможность другим пользователям, таким как НМГС, получать данные в определенной форме и использовать их в других метеорологических применениях. Подобное кодирование сообщений может осуществляться на удаленной АМС, что определенные требования в отношении программного обеспечения станции и обработки данных или, что более вероятно, к центральному компьютеру управления и сбора данных после завершения любых операций по обеспечению качества этих данных.

12.6 ЦЕНТРАЛЬНЫЙ КОМПЬЮТЕР УПРАВЛЕНИЯ И СБОРА ДАННЫХ

О функциях центрального компьютера (или компьютеров) уже упоминалось. К этим функциям относится управление сетью посредством контролирования сообщений (см. ниже), получение сводок (сообщения

о метеорологических условиях на дорогах, сообщения о состоянии АМС и информация о качестве) и обработка данных дорожных измерений для предоставления операторам дорожных сетей оперативной информации и тех возможностей для принятия решений, в которых они нуждаются. Архитектура сети может быть разработана таким образом, чтобы центральный компьютер мог действовать в качестве сервера интрасети или веб-сервера для обеспечения простого доступа к этой информации для региональных руководителей и других пользователей метеорологических данных.

Отдельный компьютер будет, возможно, выделен для управления базой климатических данных дорожной сети и подготовки и распространения аналитической информации и статистических резюме. В сложной сети центральный компьютер будет управлять определенными операциями по техническому обслуживанию и калибровке, менять рабочие режимы АМС и обновлять программное обеспечение АМС.

12.7 К ВОПРОСУ О СВЯЗИ

Исключительно важное значение имеет надежное телекоммуникационное обслуживание, которое обеспечивает эффективное управление сетью станций и своевременное предоставление ею требуемых данных. Поскольку затраты на связь составят большую часть стоимости эксплуатации, важное значение имеет анализ вариантов связи, с тем чтобы можно было оптимизировать издержки в расчете на одно сообщение сообразно уровню требуемого обслуживания. Подробный обзор вариантов телесвязи для сбора данных и управления дорожной АМС выходит за рамки этой главы (см. часть 2, глава I, где речь идет о руководящих указаниях относительно передачи данных). Сделанное в отношении связи решение будет зависеть от управленческих задач сети метеорологических наблюдений на дорогах и от обслуживания, предлагаемого поставщиками телекоммуникационных услуг данной страны и сопутствующих им тарифов.

12.8 ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ ДАТЧИКА И ФОРМИРОВАНИЕ ТРЕВОЖНЫХ СООБЩЕНИЙ

12.8.1 Алгоритмы обработки сигналов

Исходные данные сигналов от датчиков должны быть обработаны или отфильтрованы для получения репрезентативных средних значений. Это делается либо в некоторых активных датчиках, в интерфейсе датчика в блоке сбора данных, либо на более высоком уровне обработки данных – на станции. С техническими требованиями к усреднению выходных данных датчика можно ознакомиться в части I, глава 1, приложение 1B.

Алгоритмы, которые применяются к выходным данным датчика (или группам выходных данных), либо на удаленной станции, либо в центральном компьютере, должны быть заданы авторитетными источниками, пройти тщательную проверку и желательно быть опубликованными в открытой литературе. Любые алгоритмы для внутреннего пользования, принятые руководством дорожной сети, должны быть четко определены и зарегистрированы в метаданных станции или в наставлениях по работе сети.

12.8.2 Формирование тревожных сообщений

Тревожные сообщения могут формироваться на основе выходных данных датчика, когда величины превосходят заранее установленные пределы, в результаты чего АМС направляет тревожные сообщения. Выбор тревожных сообщений и испытания для определения предела нормы будут зависеть от национальной или региональной практики. Ниже приводятся некоторые примеры тревожных сообщений от дорожной АМС. Отметим использование в алгоритмах логических комбинаций «И» и «ИЛИ».

Примеры тревожных сообщений:

Тревожное сообщение 1:	T (воздух) ИЛИ T (дорожное покрытие) 3 °C И T (экстраполированное дорожное покрытие)[a] ≤ 1 °C
Тревожное сообщение 2:	T (воздух) ≤ 0 °C
Тревожное сообщение 3:	Первое условие T (дорожное покрытие) ≤ 1 °C ИЛИ T (экстраполированное дорожное покрытие) ≤ 0 °C ИЛИ T (покрытие на глубине –5 см) ≤ 0 °C ИЛИ T (покрытие на глубине –10 см) ≤– 1 °C ИЛИ T(покрытие на глубине –20 см) ≤ – 2 °C И Второе условие Проезжая часть дороги не сухая ИЛИ по меньшей мере одно выпадение осадков за прошедший час ИЛИ относительная влажность ≥ 95 % ИЛИ T (дорожное покрытие) – T (точка росы ИЛИ) ≤ 1 °C

Тревожное сообщение 4:	T (дорожное покрытие) ≤ 0 °C И зарегистрированное состояние: изморозь или «черный лед»
Тревожное сообщение 5:	Первое условие Зарегистрированные осадки = снег или град И Второе условие T (воздух) ≤ 2 °C ИЛИ T (дорожное покрытие) ≤ 0 °C
Тревожное сообщение 6:	Средняя скорость ветра ≥ 11 м/с И Направление ветра относительно азимута дороги, от 45° до 135° ИЛИ 225° – 315°
Тревожное сообщение 7:	Видимость ≤ 200 м

a Экстраполированная температура дорожного покрытия рассчитывается при помощи алгоритма, учитывающего последние измерения и формулирующего квадратичное уравнение. Это может быть использовано для расчета оценочных значений температуры в последующие 3 часа.

Могут быть определены другие тревожные сообщения, если обнаруживаются дефекты в датчиках, форматах сообщений, электроснабжении или связи.

12.9 КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

Принятие правильных решений дорожным руководством зависит от достоверных данных измерений, и поэтому когда у датчиков, их кабельного соединения или интерфейсов в АМС появляется дефект, то дефективный блок выявляется и ремонтируется без лишней задержки. Оператору дорожной сетью очень трудно выявлять ошибочные измерения. Следует сделать ссылку на руководство по контролю качества, изложенное в главе 1 части II и в главе 1 части III. Крупные дефекты датчика могут выявляться системным программным обеспечением АМС, которое должно сообщить после этого о появлении тревожной ситуации.

12.9.1 Проверка сомнительных значений

Данные измерений, которые выходят за пределы предполагаемого оперативного диапазона датчика, например 0 – 359° для ветряного флюгера, и точка росы не больше температуры воздуха, могут не приниматься благодаря установлению пределов для каждой переменной. Если имели место нулевой сигнал на выходе, быстрый дрейф или скачкообразное изменение в реакции датчика, недействительные данные измерений могут не приниматься программным обеспечением, которое осуществляется статистический анализ данных измерений во времени либо на АМС, если она имеет достаточную мощность для обработки данных, либо в центральном компьютере для сбора данных. В некоторых нижеследующих примерах стандартное отклонение последних величин n сравнивается с параметризованным пороговым значением.

Примеры проверочных алгоритмов (только для метеорологических измерений на дорогах) включают следующее:

(a) *тест для всех температур*: данные принимаются только если стандартное отклонение последних 30 значений ≥ 0,2 °C;

(b) *тест для скорости ветра*: данные принимаются только если стандартное отклонение последних 20 значений ≥ 1 км/ч;

(c) *тест для направления ветра*: данные принимаются только если стандартное отклонение последних 30 значений ≥ 10°;

(d) *тест для жидких осадков*: сверить совместимость количества с отчетом за предыдущий день;

(e) *тест для осадков в виде снега*: проверить данные, если T (воздух) > 4 °C;

(f) *тест для атмосферной длинноволновой радиации (AR) (относительно облачного покрова)*: данные не принимаются, если AR > 130 Вт/м^2, если относительная влажность > 97 % и AR > 10 Вт/м^2, и если относительная влажность ≥ 90 % и AR > 10Вт/м^2 в течение четырех последовательных часов.

12.10 ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ ДОРОЖНОЙ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

12.10.1 Дорожная окружающая среда

В отношении разделов, касающихся инспекции, технического обслуживания и калибровки, следует сделать ссылку на главу 1 части I и главу 1 части II. Главы части I содержат рекомендации по техническому обслуживанию и калибровке конкретных датчиков. Отметим, однако, что дорожная АМС существует в окружающей среде с особыми проблемами: уязвимость АМС и ее датчиков для случайного или умышленного вреда; подверженность сильному загрязнению выхлопными газами автомашин; электрические помехи от системы зажигания автомашин и близлежащих линий электропередачи высокого напряжения; коррозия от разбрызгивания соли; и вибрация (затрагивающая соединения между датчиками и кабелями).

12.10.2 Планы и документация технического обслуживания

Поскольку оперативные решения, касающиеся безопасности на дорогах, могут в значительной мере зависеть от достоверных данных АМС, существуют строгие требования в отношении технического обслуживания конкретных станций в определенное время года. Эти соображения изложены в плане управления техническим обслуживанием для данной сети, который должен включать регулярное плановое профилактическое и техническое обслуживание, а также эффективное реагирование на сообщение о неисправном состоянии.

Администрация дорожной сети должна иметь свое собственное наставление по техническому обслуживанию ее дорожных метеорологических станций, основу которого составляют рекомендации производителя оборудования, информация, почерпнутая из настоящего Руководства и своего собственного опыта. Хорошее наставление содержит контрольные списки в целях оказания содействия проведению инспекции и выполнению задач, связанных с техническим обслуживанием. Администрация может решить заключить договор об инспекции и техническом обслуживании с местной НМГС, которая должна обладать опытом работы с этим видом приборного обеспечения.

12.10.3 Инспекции и программы работы

На каждой станции два раза в год должна осуществляться программа полного технического обслуживания, в которую входят техническое обслуживание места размещения станции (стрижка травы и растительности, которые могут повлиять на установку датчика); проверка ограждений на предмет проникания воды и замена поглотителей влаги; ремонт и покраска ограждений, которые подверглись воздействию атмосферы и коррозии, а также экранов и опор; проверка целостности кабелей и соединений; чистка и выравнивание датчиков (отметим проблемы измерения, упомянутые ранее); и калибровка или замена датчиков и сети измерений АМС.

Руководители дорожной сети должны осуществлять программу инспекции для проверки целостности и надлежащего функционирования своих станций один раз в месяц зимой и раз в два месяца летом. При проведении любых работ на дорожном покрытии должны выставляться регулирующие предупредительные знаки, а работники должны носить одежду, предусмотренную техникой безопасности.

12.11 ПОДГОТОВКА КАДРОВ

Управление сетью дорожных метеорологических станций, ее эксплуатация и техническое обслуживание в целях получения непрерывного потока достоверных данных, а также интерпретация этих данных для предоставления значимой информации – все это требует наличия персонала со специальной профессиональной подготовкой по необходимым дисциплинам. К числу некоторых из этих областей профессиональной компетенции относятся: экологические условия на дорогах и оперативное принятие решений для обеспечения безопасного и эффективного движения транспорта; дистанционный сбор данных, телекоммуникации и компьютерные расчеты; выбор, применение и техническое обслуживание метеорологических датчиков и обработка их сигналов; и интерпритация метеорологических и других данных в оперативном контексте. Администрации, отвечающей за дорожную сеть, следует сотрудничать, по мере необходимости, с другими учреждениями для поддержания требуемого уровня знаний и профессиональной подготовки в целях успешного функционирования сети метеорологических измерений на дорогах..

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

World Road Association (PIARC), 2002: *Proceedings of the Eleventh PIARC International Winter Road Congress* (Sapporo, Japan).

Всемирная Метеорологическая Организация, 1988: *Технический регламент*. ВМО-№ 49, Женева.

Всемирная Метеорологическая Организация, 1995: *Наставление по кодам*. Тома I.1 и I.2. ВМО-№ 306, Женева.

World Meteorological Organization, 1997: *Road Meteorological Observations* (R.E.W. Pettifer and J. Terpstra). Instruments and Observing Methods Report No. 61, WMO/TD-No. 842, Geneva.

World Meteorological Organization, 2003*a*: *Road Managers and Meteorologists over Road Meteorological Observations: The Result of Questionnaires* (J.M. Terpstra and T. Ledent). Instruments and Observing Methods Report No. 77, WMO/TD-No. 1159, Geneva.

Всемирная Метеорологическая Организация, 2003*b*: *Руководство по Глобальной системе наблюдений*. ВМО-№ 544, Женева.

ЧАСТЬ III

МЕНЕДЖМЕНТ КАЧЕСТВА И СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЙ

ЧАСТЬ III. МЕНЕДЖМЕНТ КАЧЕСТВА И СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЙ

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

ГЛАВА 1. МЕНЕДЖМЕНТ КАЧЕСТВА III.1–1

1.1 Общие сведения III.1–1
1.2 Стандарты группы ИСО 9000, ИСО/МЭК 17025, ИСО/МЭК 20000 и система менеджмента качества ВМО III.1–3
1.3 Внедрение менеджмента качества III.1–7
1.4 Аккредитация лабораторий III.1–8
1.5 Инструментарий менеджмента качества III.1–9
1.6 Факторы, влияющие на качество данных III.1–10
1.7 Обеспечение качества (контроль качества) III.1–12
1.8 Мониторинг функционирования III.1–15
1.9 Однородность данных и метаданные III.1–15
1.10 Управление сетью III.1–17

Справочная и дополнительная литература III.1–19

ГЛАВА 2. ДИСКРЕТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕННЫХ III.2–1

2.1 Общие сведения III.2–1
2.2 Временные ряды, спектры мощности и фильтры III.2–3
2.3 Определение характеристик системы III.2–9
2.4 Дискретные измерения III.2–10

Справочная и дополнительная литература III.2–16

ГЛАВА 3. ОБРАБОТКА ДАННЫХ III.3–1

3.1 Общие сведения III.3–1
3.2 Дискретизация измерений III.3–2
3.3 Применение калибровки III.3–3
3.4 Линеаризация III.3–3
3.5 Осреднение III.3–4
3.6 Взаимосвязанные величины и статистические характеристики III.3–4
3.7 Поправки III.3–5
3.8 Контроль качества III.3–5
3.9 Составление метаданных III.3–5

Справочная и дополнительная литература III.3–6

ГЛАВА 4. ИСПЫТАНИЕ, КАЛИБРОВКА И ВЗАИМНОЕ СРАВНЕНИЕ ПРИБОРОВ III.4–1

4.1 Общие сведения III.4–1
4.2 Проведение испытаний III.4–2
4.3 Калибровка (поверка) III.4–5
4.4 Взаимные сравнения III.4–7

Приложение 4.A. Процедуры проведения глобальных и региональных сравнений приборов ВМО III.4–9

Приложение 4.B. Рекомендации по организации взаимных сравнений приборов ВМО III.4–10

Приложение 4.C. Отчеты о международных сравнениях, проведенных под эгидой комиссии по приборам и методам наблюдений III.4–21

Справочная и дополнительная литература III.4–23

Стр.

ГЛАВА 5. ПРОФЕССИОНАЛЬНАЯ ПОДГОТОВКА СПЕЦИАЛИСТОВ ПО ПРИБОРАМ III.5–1

5.1 Введение III.5–1
5.2 Надлежащая подготовка кадров для обеспечения оперативных потребностей III.5–2
5.3 Некоторые общие принципы профессиональной подготовки III.5–3
5.4 Процесс профессионального обучения III.5–7
5.5 Ресурсы для профессионального обучения III.5–15

Приложение III.5–20

Справочная и дополнительная литература III.5–21

ГЛАВА 1

МЕНЕДЖМЕНТ КАЧЕСТВА

1.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Настоящая глава содержит общие сведения и охватывает оперативные метеорологические системы наблюдений любого размера или характера. Хотя руководящие указания, которые даются в ней относительно менеджмента качества, выражены в терминах, которые применяются к крупным сетям наблюдательных станций, их можно применять даже к отдельной станции.

Менеджмент качества

Менеджмент качества предусматривает принципы и методологическую основу для операций и координирует деятельность по управлению организацией и контролю за нею в отношении качества. Обеспечение и контроль качества являются частями успешной системы менеджмента качества. Обеспечение качества базируется на уверенности в том, что требования в отношении качества будут выполнены, и включает все виды плановой и систематической деятельности, осуществляемой в рамках системы менеджмента качества, для реализации требований в отношении качества для определенного продукта или услуги. Контроль качества связан с теми компонентами, которые используются для обеспечения выполнения требований к качеству, и включает все оперативные методы и виды деятельности, используемые для выполнения требований в отношении качества. Настоящая глава посвящена вопросам менеджмента качества, связанным с контролем и обеспечением качества и официальной аккредитации деятельности лабораторий, особенно с точки зрения метеорологических наблюдений за переменными величинами погоды и атмосферы.

Рассматривается группа стандартов ИСО 9000 с целью понимания действий, осуществляемых при внедрении системы менеджмента качества в Национальной Метеорологической и Гидрологической Службе (НМГС); это набор стандартов, содержащий минимум процедур, которые должны быть внедрены в систему менеджмента качества для выполнения требований стандарта ИСО 9001. Затем рассматривается общая концепция менеджмента качества в соответствии с руководящими принципами ИСО 9004, при этом излагаются мнения пользователей и заинтересованных сторон. Представляется стандарт ИСО/МЭК 17025. Дается описание эффективности аккредитации на основе ИСО/МЭК 17025 для НМГС и Региональных Центров по Приборам (РЦП), наряду с требованиями, касающимися процедуры аккредитации.

В обсуждение включен стандарт ИСО/МЭК 20000 для менеджмента услуг в области информационной технологии (ИТ), учитывая, что в каждую наблюдательную систему инкорпорированы компоненты ИТ.

Обеспечение качества и контроль качества

Данные характеризуются хорошим качеством, когда они удовлетворяют заявленным и предполагаемым потребностям. В других разделах настоящего Руководства приводятся четкие или предлагаемые формулировки требуемой точности, неопределенности, разрешения и репрезентативности, главным образом для синоптических применений метеорологических данных, однако аналогичные требования могут быть заявлены для других применений. Необходимо предполагать, что для любого применения также подразумевается минимальная общая стоимость или четко обозначенное требование. Цель менеджмента качества заключается в обеспечении соответствия данных требованиям (в отношении неопределенности, разрешения, непрерывности, однородности, репрезентативности, своевременности, формата и т.д.) к планируемому применению при минимальной, практически возможной стоимости. Все данные измерений являются несовершенными, однако если их качество известно и может быть продемонстрировано, они могут быть использованы надлежащим образом.

Предоставление метеорологических данных хорошего качества является непростым делом и невозможно без системы менеджмента качества. Самые лучшие системы менеджмента качества действуют беспрерывно во всех точках всей наблюдательной системы – от планирования сети и подготовки кадров, установки станции и ее функционирования до передачи и архивирования данных, и предусматривают наличие обратной связи и последующее представление данных во временных масштабах от близкого к реальному времени до ежегодных анализов и как комплексного процесса. Объем ресурсов, необходимых для эффективной системы менеджмента качества, является частью стоимости эксплуатации наблюдательной системы или сети и составляет, как правило, несколько процентов от общей стоимости. Без этих расходов данные необходимо считать данными неизвестного качества, а их полезность – неясной.

Эффективная система менеджмента качества – это система, которая управляет связями на этапах подготовки к сбору данных, сбора данных, обеспечения достоверности данных и их распространения пользователям, с тем чтобы пользователи получали требуемое количество измерительной информации. Для многих метеорологических величин существует ряд циклов подготовки, сбора и обеспечения качества, начиная от полевых измерений, до конечного распределения пользователям. Важно, чтобы все эти циклы были идентифицированы и была сведена к минимуму возможность отхода от требуемого количества. Многие из этих циклов будут настолько тесно связаны, что они могут восприниматься как единый цикл. Большинство проблем возникает, когда имеются разные циклы, и когда их считают независимыми друг от друга.

После получения данных в результате процесса измерений они остаются данными этого процесса. Другие последующие процессы могут проверять соответствие их значения требуемому количественному параметру, использовать эти данные в процессе корректировки для получения требуемого качества или не принимать эти данные. В то же время, ни один из этих последующих процессов не вносит изменений в данные, полученные в процессе измерений. Контроль качества – это процесс, в рамках которого предпринимается усилие, направленное на обеспечение того, чтобы процессы, ведущие к распределению данных, были правильными, а также чтобы свести к минимуму возможность непринятия или корректировки итоговых данных.

Обеспечение качества включает четкий контроль за факторами, которые непосредственно влияют на собранные и обработанные данные, перед их распределением пользователям. В том, что касается наблюдений или измерений, это оборудование, установка, процедуры измерений, техническое обслуживание, инспекция, калибровка, разработка алгоритма, избыточность измерений, прикладное исследование и подготовка кадров. С точки зрения передачи данных контроль качества – это процесс, разработанный для обеспечения того, чтобы для данных направляемых в базу данных пользователей, были созданы протоколы для гарантии того, что пользователи получают только удовлетворительные данные.

Контроль качества является наиболее хорошо известным компонентом систем менеджмента качества и неизменной минимальной составляющей любой системы. Он включает все процедуры, которые осуществляются для обеспечения достоверности данных, и для того, чтобы полученные данные имели требуемое качество, а также включает изучение данных на станциях и в центрах данных для проверки того, что эти данные соответствуют целям системы управления качеством, и для обнаружения ошибок, с тем чтобы подобные данные могли быть либо помечены в качестве недостоверных, исправленных, либо исключены в случае наличия серьезных ошибок. Система менеджмента качества должна включать процедуры обратной связи с процессом измерения и контроля его качества для предотвращения повторения ошибок. Обеспечение качества может применяться в режиме реального времени к данным измерений и может быть составным элементом процедуры контроля для системы менеджмента качества, однако, по большей части, оно характеризуется тенденцией осуществления не в реальном времени.

Контроль качества в режиме реального времени обычно осуществляется на станции и в центрах метеорологического анализа. Последующий контроль качества может продолжаться в центрах сбора баз профильтрованных данных, а также в климатических центрах или банках данных с целью архивации. Во всех случаях результаты контроля должны сообщаться администрациям сетей наблюдений для принятия последующих мер.

Обычным компонентом контроля качества является мониторинг качества или мониторинг функционирования – деятельность не в реальном времени, в ходе которой проводится изучение функционирования сети или системы наблюдений с целью выявления тенденций и систематических недостатков. Как правило, он осуществляется службой, которая управляет сетью или системой и несет за нее ответственность и которая может предписывать изменения в оборудовании или процедурах. Обычно за это отвечает администратор сети, действующий совместно, в случае необходимости, с другими специалистами.

Современные подходы к контролю качества подчеркивают преимущества комплексной системы обеспечения качества, в которой предусмотрены процедуры непрерывного взаимодействия между всеми сторонами системы наблюдений, включая высшее руководство и других лиц, таких как разработчики приборов и преподаватели, которые могут рассматриваться как второстепенные относительно оперативных проблем качества сбора данных. Официальные процедуры, предписанные Международной организацией по стандартизации (ИСО) в отношении менеджмента и обеспечения качества, и другие подробные процедуры, используемые в сфере производства и коммерции, также применимы к метеорологическим данным.

1.2 СТАНДАРТЫ ГРУППЫ ИСО 9000, ИСО/МЭК 17025, ИСО/МЭК 20000 И СИСТЕМА МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА ВМО

В настоящей главе дается объяснение соответствующих стандартов ИСО и того, каким образом они взаимосвязаны.

Системами контроля качества ИСО можно воспользоваться путем сертификации или аккредитации, для чего обычно требуется внешний аудит внедренной системы менеджмента качества. Сертификация подразумевает, что система и процедуры, используемые в организации, внедрены и используются, как об этом было заявлено. Аккредитация подразумевает, что система и процедуры, используемые в данной организации, внедрены, используются, как об этом было заявлено, и технически способны достигнуть требуемого результата. Оценка технической компетенции является обязательным требованием аккредитации, но не сертификации. ИСО 9001 – это стандарт, на основе которого организация может пройти сертификацию, в то время как аккредитация, в соответствии со стандартом ИСО/МЭК 17025, обычно требуется для лабораторий и регулярных наблюдений.

Стандарт ИСО 9000 был разработан для оказания помощи организациям всех типов и размеров при введении в действие и использовании при эксплуатации систем менеджмента качества. Стандарт ИСО 9000 описывает основные характеристики систем менеджмента качества и дает определение соответствующих терминов (например, требование, удовлетворенность потребителя). Иллюстрация основной концепции дается на рисунке 1.1. Стандарт ИСО 9001 определяет требования к системе менеджмента качества, которая может быть сертифицирована в соответствии с этим стандартом. Стандарт ИСО 9004 дает руководящие указания относительно постоянного совершенствования системы менеджмента качества с целью достижения полноценной системы менеджмента качества. Стандарт ИСО 19011 предусматривает руководящие принципы аудита системы менеджмента качества. Все эти стандарты более подробно описаны в соответствующих документах Системы менеджмента качества ВМО.

1.2.1 ИСО 9000: Системы менеджмента качества – Основные положения и словарь

Потенциальной основой для успешного руководства всех НМГС и постоянного совершенствования показателей работы являются следующие восемь принципов менеджмента качества:

(a) ориентация на потребителя;
(b) лидерство руководителя;
(c) вовлечение работников;
(d) процессный подход;
(e) системный подход к менеджменту;
(f) постоянное улучшение;
(g) принятие решений, основанное на фактах;
(h) взаимовыгодные отношения с поставщиками.

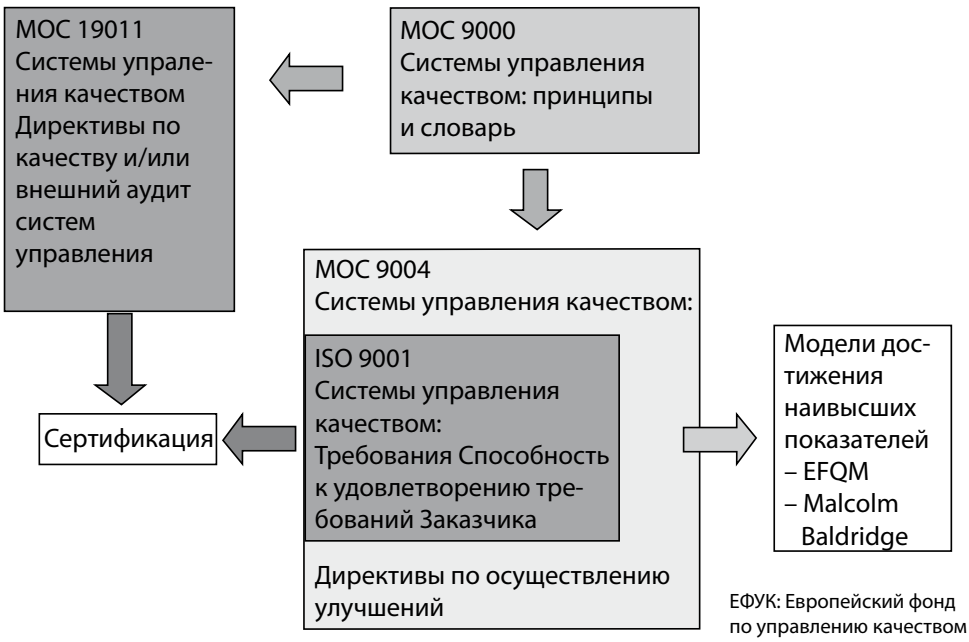
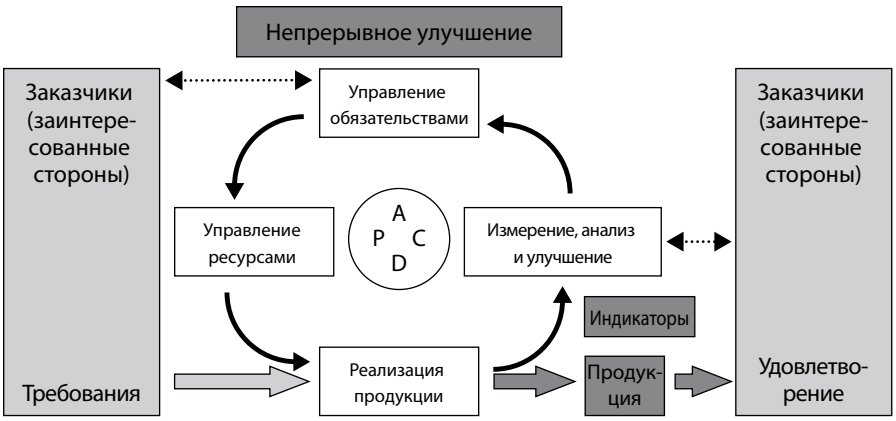


Рис.1.1. Основная концепция системы стандартов ISO 9000 и их взаимозависимость



P = План, D = Изготовляй, C = Проверяй, A = Действуй

Рис. 1.2. Цикл управления PDCA (также называемый циклом Деминга)

Все эти принципы должны быть документированы и осуществляться на практике для соблюдения требований стандартов ИСО 9000 и 9001 для прохождения сертификации. Основной темой этих стандартов является процессный подход, который можно просто описать как деятельность, при которой используются ресурсы для преобразования исходных компонентов в конечную продукцию.

Простая модель системы менеджмента качества, основанная на принципе процессного подхода, показана на рисунке 1.2. Основная идея состоит в том, что данный механизм будет способствовать постоянному совершенствованию системы и удовлетворенности потребителей посредством измерения процессных индексов (например, время расчета модели GME, удовлетворенность потребителей, время реагирования и т.д.), оценке результатов, принятия административных решений для лучшего менеджмента ресурсов и лучшей продукции.

1.2.2 ИСО 9001: Системы менеджмента качества – Требования

Этим стандартом предусматриваются основные требования в отношении системы менеджмента качества, включая процессы совершенствовании и урегулирования жалоб, а также осуществления анализов менеджмента. Эти процессы обычно включаются в руководство по качеству. Главное внимание в стандарте ИСО 9001 сосредоточено на ответственности руководства, а не на технической деятельности.

Для прохождения сертификации в рамках ИСО 9001 организация (НМГС) должна определить и документировать следующие шесть процессов:

(a) контроль документов;
(b) контроль записей;
(c) контроль не отвечающей требованиям продукции;
(d) корректирующие действия;
(e) предупреждающие действия;
(f) внутренний аудит.

Кроме того, в наличии должно быть руководство по качеству, в котором излагается политика (например, целью является достижение регионального лидерства в области прогнозирования погоды) и цели организации (например, совершенствование прогнозирования погоды: снижение вероятности ошибочных предупреждений), и дается описание процессных структур и их взаимодействия. Должны быть сформулированы заявления, касающиеся следующего:

(a) менеджмент;
(b) внутренняя связь;
(c) постоянное совершенствование;
(d) контроль системы (например посредством анализов менеджмента).

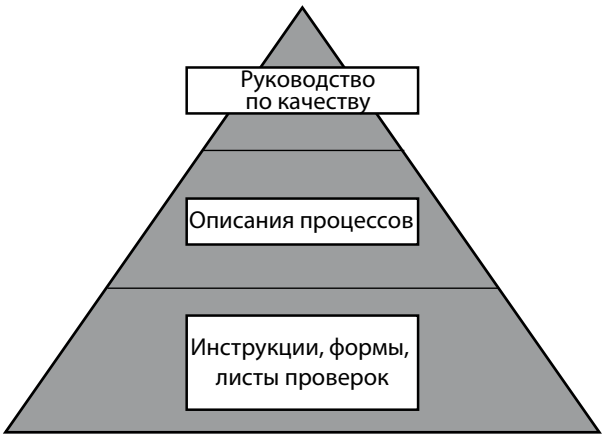


Рис. 1.3. Пирамида документов по системе управления качеством

Исключения могут быть сделаны, например, в отношении развития (если в организации не осуществляется никакой деятельности в области развития).

Пирамида документации системы менеджмента качества показана на рисунке 1.3. Процессные описания показывают реальную деятельность в организации, такую как процедура сбора данных в сетях наблюдений за погодой и климатом. Они сообщают информацию о разных процессных мерах и об организационных структурах, осуществляющих эти меры, в целях сотрудничества и совместного использования информации. В документации должно проводиться различие между периодическими и непериодическими процессами. Примерами периодических процессов является сбор данных или распространение прогнозов. Примеры непериодических процессов включают установку измерительного оборудования, которая начинается с требования, пользователя или компонентов (например, с распоряжения о создании сети измерений).

И наконец, в инструкциях ИСО 9001 содержится подробная информация о процессных мерах, которые должны упоминаться в описании процессов (например, с начального инструктажа по АМС). Формуляры и контрольные списки являются полезными средствами для уменьшения вероятности того, что о требуемых задачах будет забыто.

1.2.3 ИСО 9004: Системы менеджмента качества – Рекомендации по улучшению деятельности

В ИСО 9004 сформулированы рекомендации по разработке и внедрению системы менеджмента качества для достижения отличных результатов в предпринимательской деятельности. Основным аспектом является переход с позиции потребителей на позицию заинтересованных сторон. Благодаря рекомендациям ИСО 9004 могут быть разработаны различные модели, например Модель делового совершенства Европейского фонда менеджмента качества (ЕФМК)[1] или Премия качества им. Малькольма Болдриджа[2]. Обе модели делового совершенства должным образом сформулированы и признаются во всех странах мира.

Модель делового совершенства ЕФМК предусматривает следующие девять критериев, которые оцениваются группой экспертов-оценщиков:

(a) лидерство;
(b) работники;
(c) политика и стратегия;
(d) партнерство и ресурсы;
(e) процессы;
(f) результаты работников;
(g) результаты потребителей;
(h) результаты общества;
(i) ключевые результаты работы.

Модель им. Малькольма Болдриджа содержит семь критериев аналогичных Модели делового совершенства ЕФМК, а именно:

(a) лидерство;
(b) стратегическое планирование;
(c) ориентация на потребителей и рынок;
(d) менеджмент измерений, анализа и информации;
(e) ориентация на людские ресурсы;
(f) процессный менеджмент;
(g) результаты.

Для этого стандарта не существует никакой процедуры сертификации, однако внешняя оценка предусматривает возможность проведения сравнений с другими организациями в соответствии с применяемой моделью совершенства (см. также рисунок 1.1).

1.2.4 ИСО 19011: Руководящие указания по аудиту систем менеджмента качества и/или систем экологического менеджмента

Этот стандарт является руководством для аудита систем менеджмента качества или систем экологического менеджмента и не имеет никакого регламентирующего характера. Ниже дается подробное описание мер по осуществлению аудита организаций:

(a) принципы аудита (этичное поведение, справедливое представление, необходимое профессиональное поведение, независимость, основанный на доказательствах подход);
(b) планирование аудита (разработка и осуществление программы аудита);
(c) аудиторская работа (начало аудита, подготовка и проведение аудита на месте, подготовка аудиторского отчета);
(d) профессиональная подготовка и обучение аудиторов (компетенция, знания, навыки работы с людьми).

Методика проведения аудитов зависит от задач и рамок аудита, которые определяются руководством или заказчиком аудита. Главной задачей первого аудита является проверка соответствия системы менеджмента качества требованиям ИСО 9001. При последующих аудитах приоритетное внимание уделяется взаимодействию и интерфейсам процессов.

---

[1] См. веб-сайт ЕФМК по адресу: http://www.efqm.org.

[2] См. веб-сайт NIST по адресу: http://www.qualiy.nist.gov.

Критериями аудита являются документация системы менеджмента качества, процессные описания, руководство по качеству и уникальные отдельные нормативы.

В планировании аудита, опубликованном организацией, необходимо конкретно указывать соответствующие департаменты организации, критерии аудита, а также цели, место, дату и время аудита, для обеспечения четкого предназначения аудитов.

1.2.5 ИСО/МЭК 17025: Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий

Этот набор требований применим к организациям, включая лаборатории и испытательные полигоны, которые желают провести внешнюю аккредитацию их компетенции в области процедур измерений и тестирования.

Стандарт ИСО/МЭК 17025 согласует свои требования в отношении менеджмента с требованиями, предусмотренными ИСО 9001. Этот стандарт подразделяется на две основные части: требования в отношении менеджмента и технические требования. Соответственно система менеджмента качества должна следовать требованиям стандарта ИСО 9001, которые включают описанные процессы, руководство по менеджменту, в котором предусматривается связь между процессами, целями и заявлениями о политике, и то, что эти аспекты должны проходить регулярный аудит. Все лабораторные процедуры должны быть утверждены, верифицированы и легализованы соответствующим образом, с тем чтобы соответствовать требованиям. Кроме того, должны быть определены роли представителя менеджмента качества (менеджера по качеству) и руководителя лаборатории.

Существенным компонентом технических требований является подготовка анализов неопределенности для каждой из процедур измерений, включая соответствие документально оформленной и проверенной прослеживаемости международным метрологическим стандартам

1.2.6 ИСО/МЭК 20000: Информационная технология – Менеджмент услуг

НМГС пользуются ИТ-оборудованием для получения данных от сетей измерений, чтобы воспользоваться моделями GME/LM и обеспечить прогнозистов выходными продуктами моделей. Рекомендации этого стандарта являются полезными для предоставления надежных ИТ-услуг. Новый стандарт ИСО/МЭК 20000 содержит краткое описание предыдущего английского стандарта BS-15000 и рекомендаций Библиотеки инфраструктуры информационных технологий (БИИТ). Разбивка требований следует структуре БИИТ.

Элементы БИИТ подразделяются на предоставление услуг и поддержку обслуживания при следующих процессах:

Предоставление услуг:
(a) менеджмент на уровне услуг;
(b) финансовый менеджмент;
(c) менеджмент непрерывности ИТ-услуг;
(d) менеджмент наличия услуг;
(e) менеджмент потенциала.

Поддержка обслуживания:
(a) менеджмент изменений;
(b) менеджмент инцидентов;
(c) менеджмент проблем;
(d) менеджмент релизов;
(e) менеджмент конфигураций.

Менеджмент безопасности является общим для обеих областей.

Все это требует, чтобы:
(a) процессы были адаптированы к организации НМГС;
(b) особое внимание уделялось оказанию поддержки пользователей.

Особое внимание уделялось процессу менеджмента изменений, который может включать менеджмент релизов и конфигураций. Менеджмент инцидентов и проблем обычно осуществляется посредством создания справочной службы для пользователей.

1.2.7 Система менеджмента качества ВМО

Система менеджмента качества ВМО дает базовые рекомендации, которые были основаны на опыте НМГС. Необходимые условия для успешной сертификации, согласно ИСО 9001, объясняются в публикации ВМО (2005*a*; 2005b).

Система менеджмента качества является руководством для НМГС, особенно для НМГС с незначительным опытом в официальной системе менеджмента качества. В последующем разделе дается лишь краткое описание внедрения системы менеджмента качества, при этом отмечается, что ВМО не может осуществлять какую-либо сертификацию согласно ИСО 9001.

1.3 ВНЕДРЕНИЕ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА

Внедрение успешного менеджмента качества в значительной мере зависит от сотрудничества старшего руководства. Старшее руководство НМГС должно быть привержено системе менеджмента качества и поддерживать проектную группу. Необходимые условия для успешной сертификации кратко изложены, а термины стандартов ИСО 9001 объясняются в ИСО 20000.

Руководство высшего уровня определяет политику и задачи в области качества (включая приверженность менеджменту качества), а персонал должен пройти профессиональную подготовку для того, чтобы понимать суть процесса менеджмента качества (см. раздел 1.2.2). Самым важным условием является создание проектной группы для управления переходом к официальной системе менеджмента качества, включая определение и анализ процессов, используемых данной организацией.

В целях оказания помощи проектной группе персоналу, отвечающему за определение процесса, могут быть даны краткие инструкции обычно эти инструкции включают следующее:

(a) документирование (запись) того, чем занимается каждая группа;
(b) указание существующей документации;
(c) указание свидетельств или показателей того, что сделано;
(d) определение того, что может быть сделано для постоянного совершенствования процессов.

Учитывая тот факт, что в документации конкретно указывается то, что делает организация, важно, чтобы основные процессы отражали функции структуры НМГС. Это может быть частью названных процессов (см. рисунок 1.4), например:

(a) прогнозирование погоды (включая гидрометеорологические, агрометеорологические, человеческие биометеорологические аспекты) и метеорологические предупреждения;
(b) консультационные услуги (включая климат и окружающую среду);
(c) формирование данных (полученных в результате измерений и от наблюдательных сетей);
(d) международные вопросы;
(e) исследования и разработки (глобальное моделирование, модели ограниченной территории, приборное обеспечение);
(f) техническая инфраструктура (компьютеризация и связь, инженерное обеспечение, менеджмент данных и ИТ-обеспечение);

ГМС – Германская Метеорологическая служба
НГМС – Национальная Гидрометеорологическая Служба (НГМС)

Рис. 1.4. Процессный «ландшафт» НГМС (пример: ГМС, WMO 2005)

(g) административные процессы (закупки, финансовый и кадровый менеджмент, организация, административные офисы и недвижимое имущество, менеджмент информации, централизованное планирование и контроль и юридические вопросы).

Даже если эти процессы будут соответствовать индивидуальным потребностям НМГС и обеспечивать их подпроцессами, обычно существуют правила, касающиеся урегулирования инцидентов (например, сбои системы, несчастные случаи с персоналом).

В организации должны быть введены в действие процессы с четко определенными задачами в области качества, и весь персонал должен пройти учебную подготовку для понимания этих процессов, включая использование процедур и контрольных списков и измерение показателей процесса.

Перед подачей заявки на сертификацию должен быть проведен анализ системы менеджмента качества посредством осуществления внутренних аудитов в отделах и подразделениях организации, с тем чтобы проверить соответствие системы менеджмента качества в том виде, в котором это было заявлено и осуществлено. Эти документированные анализы могут быть выполнены специализированными и подготовленными аудиторами. Требования и рекомендации, касающиеся этих анализов, содержатся в ИСО 19011 (см. раздел 1.2.4).

Анализ системы менеджмента качества с точки зрения менеджмента будет включать следующее:
(a) результаты аудита;
(b) обратная связь с потребителями;
(c) эффективность процессов на основе показателей работы;
(d) статус предупреждающих и коррективных мер;
(e) действия, предпринятые по результатам предыдущих анализов менеджмента;
(f) изменения в системе менеджмента качества (политика организации);
(g) рекомендации по совершенствованию.

1.4 АККРЕДИТАЦИЯ ЛАБОРАТОРИЙ

Аккредитация требует дополнительных процессов и документации, а самое главное доказательств того, что персонал лаборатории прошел учебную подготовку и освоил процессы и методы, которые подлежат аккредитации.

Документация должна охватывать следующие аспекты:
(a) наставление по менеджменту для данной лаборатории;
(b) описания процессов, упомянутых в разделе 1.2;
(c) документация всех процессов и методов;
(d) рабочие инструкции для всех отдельных этапов процессов и методов;
(e) наставления по оборудованию (включая сертификаты калибровки);
(f) руководства по техническому обслуживанию.

Поскольку процедуры и методы меняются, вероятно, более часто, чем аспекты аккредитации, касающиеся менеджмента, эти методы обычно не включаются в руководство по менеджменту. Тем не менее, делается специальная ссылка на процедуры и методы, используемые в руководстве по менеджменту.

Поскольку после внедрения системы менеджмента качества вряд ли будут охвачены все аспекты аккредитации, рекомендуется провести предварительный аудит и согласовать его с сертифицирующим ведомством. Во время этих предварительных аудитов обычными будут следующие действия сертифицирующего ведомства:
(a) оценка персонала и необходимых помещений и полевых площадок;
(b) оценка соответствия системы менеджмента;
(c) проверка документации;
(d) валидация рамок аккредитации.

Процедура аккредитации включает оценки, проводимые группой экспертов (не состоящих в штате организации), в состав которой входит представитель сертифицирующего ведомства. Группы экспертов по оценке будет уделять главное внимание двум следующим основным областям:
(a) документации;
(b) проверке технических средств, включенных в рамки аккредитации (например лаборатории, специальных полевых площадок).

Оценка документации охватывает верификацию следующих документов:
(a) руководство по менеджменту (или наставление по лаборатории);
(b) инструкции по процедуре;
(c) рабочие инструкции;
(d) инструкции по тестированию;
(e) руководство по оборудованию;
(f) руководство по техническому обслуживанию;
(g) анализы неопределенности конкретных количественных величин, результатов тестирования и калибровок;
(h) подтверждающие документы (например о том, что персонал прошел учебную подготовку и что количественные величины поддаются прослеживанию);

(i) досье (например переписка с потребителями, выданные сертификаты калибровки).

Группа внешних экспертов может затребовать дополнительные документы, поскольку проверяются все аспекты стандарта ИСО/МЭК 17025 и причем более подробно по сравнению с сертификацией согласно ИСО 9001.

Помимо инспекции методов измерения и соответствующего оборудования оценка технических средств в рамках аккредитации будет включать следующее:
(a) оценка персонала (включая учебную подготовку и уровни ответственности);
(b) оценка инфраструктуры, которая обеспечивает эти методы (например здания, доступ).

Кроме того, во время оценки проверяется также соответствие следующих элементов поставленных руководством целей аккредитации:
(a) организационная структура;
(b) квалификация персонала;
(c) адекватность технических средств;
(d) ориентация на потребителей.

Помимо этого, в ходе оценки проверяются представленные лабораторией доказательства следующего:
(a) техническая компетенция (выбор и использование измерительной системы);
(b) калибровка измерительного оборудования;
(c) техническое обслуживание измерительного оборудования;
(d) верификация и валидация методов.

Преимущества и недостатки аккредитации

Посредством первоначальной аккредитации, проведенной независимым сертифицирующим ведомством, НМГС доказывают соответствие своей компетенции в области методов метеорологических измерений и тестирования признанному стандарту. После проведения аккредитации осуществляется текущий периодический внешний аудит, который дает дополнительное доказательство того, что стандарты соблюдались, но, что является более важным, он помогает организации обеспечить соблюдение своих собственных внутренних требований к качеству.

Аккредитация в соответствующих рамках также обеспечивает коммерческие возможности для калибровки, верификации и оценки измерительных устройств.

Существенными являются выгоды от аккредитации для организаций, в которых не существует системы менеджмента качества. Во-первых, она документально оформляет систему организации, и благодаря этому может быть использован процесс анализа для того, чтобы сделать данную организацию более результативной и эффективной. Например, один из компонентов аккредитации, согласно ИСО/МЭК 17025 требует проведения анализов погрешностей для каждой калибровки и испытания при верификации; подобные количественные анализы дают информацию о том, где может быть получена самая большая выгода при минимальных ресурсах.

Аккредитация или сертификация в рамках любой признанной системы качества требует регистрации и периодических аудитов внешними экспертами и сертифицирующим ведомством. Они влекут дополнительные расходы для организации и зависят от рамок аккредитации и сертификации.

Запрос о проведении аккредитации до внедрения эффективной системы менеджмента качества приведет к повышенному использованию ресурсов и отвлечению существующих ресурсов вместо их использования для создания системы менеджмента качества; кроме того, будут также иметь место дополнительные периодические затраты на проведение аудитов.

1.5 ИНСТРУМЕНТАРИЙ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА

Существует несколько хорошо известных инструментов для содействия процессам системы менеджмента качества и ее постоянного усовершенствования. В качестве введения ниже дается описание трех примеров этих инструментов: сбалансированная система показателей; анализ режимов отказов и их последствий; и система шести сигм.

Сбалансированная система показателей (Kaplan и Norton, 1996) имеет как минимум четыре центральных элемента: финансы, потребители, процессы и служащие. Часто добавляется широкая общественность, поскольку общественные интересы всегда должны приниматься во внимание.

Каждая организация и компонент этой организации представляют ключевые показатели эффективности работы по каждому из центральных элементов, которые, в свою очередь, связаны с миссией организации (или с целью, видением или задачами) и ее стратегией (или рабочей задачей и видением).

Анализ режимов отказов и их последствий – это метод изучения возможных причин, дефектов и

вероятности их появления. Этот метод может быть использован для анализа производственных процессов и нормативно-технической документации продукции. Цель процесса оптимизации заключается в снижении приоритетного порядка рисков.

Метод шести сигм был разработан коммуникационной отраслью и используется контроль статистических процессов для совершенствования продукции. Его целью является снижение процессных отказов до показателя ниже установленной величины.

1.6 ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА КАЧЕСТВО ДАННЫХ

Жизненный цикл приборов, применяемых в полевых условиях, включает различные этапы, такие как планирование в соответствии с требованиями пользователя, отбор и установка оборудования, эксплуатация, калибровка, техническое обслуживание и подготовка специалистов. Для получения данных достаточного или предписанного качества необходимо принять соответствующие меры на каждом из этих этапов. В настоящем разделе кратко описаны факторы, влияющие на качество данных, и делается ссылка на более полную информацию, имеющуюся в других главах настоящего Руководства и других наставлениях и руководствах ВМО.

Требования пользователей. Качество измерительной системы можно оценить путем сравнения требований пользователей и способности системы удовлетворить их. Соответствие требований пользователей к качеству данных и характеристик приборов необходимо рассматривать не только на этапе разработки и планирования проекта, но также на протяжении всей эксплуатации, а приборное оснащение должно планироваться таким образом, чтобы оптимизировать соотношения затраты/выгоды и затраты/эксплуатационные характеристики. Это предусматривает разделение ответственности по согласованию технических и финансовых факторов между пользователями, экспертами по приборам и экспертами по материально-техническому снабжению. В частности, эксперты по приборам должны изучить требования к качеству данных со стороны пользователей, с тем чтобы иметь возможность предложить спецификации, отвечающие современным техническим требованиям. Этот важный этап разработки называется анализом стоимости. Если им пренебречь, как это часто делается, то может оказаться, что требования к стоимости или качеству, либо и те и другие, не будут удовлетворяться, возможно, в нужной степени, проект потерпит неудачу, и усилия будут потрачены впустую.

Функциональные и технические спецификации. Воплощение высказанных требований в функциональные, а затем технические спецификации является очень важной и сложной задачей. Оно предусматривает наличие обширных знаний о требованиях пользователей, о технологиях и метеорологических измерений, о методах наблюдений, о регламентах е ВМО, и соответствующих условиях эксплуатации, а также о технических/административных инфраструктурах. Поскольку эти спецификации будут определять общее функционирование планируемой измерительной системы, их воздействие на качество данных имеет большое значение.

Выбор приборов. Приборы должны тщательно отбираться с учетом требуемых погрешности, диапазона и разрешения (определения см. в главе 1 части I), условий климата и окружающей среды, в которых предполагается их использование , условий эксплуатации, а также имеющейся технической инфраструктуры для подготовки специалистов, установки и технического обслуживания. Неправильный выбор приборов может привести к плохому качеству данных, вызывая многие трудности, прежде чем оно будет выявлено. Примером может служить неполная спецификация, ведущая к чрезмерному износу приборов или дрейфу их характеристик. Для метеорологических целей, как правило, должны применяться только высококачественные приборы. Следует сделать ссылку на соответствующую информацию, содержащуюся в различных главах настоящего Руководства. Дополнительную информацию о характеристиках различных приборов можно почерпнуть из отчетов о международных сравнениях приборов ВМО и трудов КПМН/ВМО и других международных конференций по приборам и методам наблюдений.

Испытания на соответствие техническим условиям. Перед установкой и сдачей в эксплуатацию необходимо убедиться в соответствие и приборов исходным техническим условиям. Технические характеристики приборов и их чувствительность к воздействующим факторам должны публиковаться заводами-изготовителями, а в некоторых случаях подтверждаться органами, проводящими калибровку. Однако взаимные сравнения приборов ВМО показывают, что показатели приборов могут ухудшаться под воздействием факторов, влияющих на их качество, что может проявиться еще на этапах производства и транспортировки. Ошибки калибровки сложно или невозможно обнаружить, когда соответствующие эталоны, а также испытательное и калибровочное оборудование являются труднодоступными . Важный компонент хорошего менеджмента – проведение соответствующих испытаний в рабочих условиях еще до того, как приборы будут использованы для

оперативных целей. Такие испытания могут проводиться как для того, чтобы определить характеристики данной модели, так и для контроля действительного качества каждого прибора.

При закупке оборудования следует поставить перед поставщиком вопрос о внедрении в его организации сертифицированных процедур обеспечения качества согласно требованиям НМГС, уменьшая тем самым необходимость испытания на соответствие техническим условиям получающей стороной. Повышенная цена при закупке оборудования может быть оправдана последующим уменьшением расходов на внутренние испытания или оперативное обслуживание либо гарантированным качеством при последующей полевой эксплуатации.

Совместимость. Проблемы совместимости данных могут возникать в тех случаях, когда приборы с различными техническими характеристиками используются для проведения однотипных измерений. Это может произойти, например, при переходе с ручных измерений на автоматизированные, добавлении новых приборов с другими постоянными времени, использовании иной защиты датчиков, применении иных алгоритмов обработки данных и т.д. Влияние на совместимость и однородность данных должно быть тщательно изучено посредством длительных взаимных сравнений. Следует сделать ссылку на различные отчеты ВМО о международных взаимных сравнениях приборов.

Размещение и установка. Плотность метеорологических станций зависит от временного и пространственного масштабов наблюдаемых метеорологических процессов и явлений и, как правило, определяется пользователем или устанавливается регламентными документами ВМО. Существуют экспериментальные доказательства, показывающие, что неправильные размещение и установка могут вызвать серьезные ухудшения точности или репрезентативности измерений. Общие критерии размещения и установки приведены в главе 1 части I, а детальная информация относительно конкретных приборов дается в различных главах части I. Следует сделать дополнительную ссылку на регламентные материалы ВМО (2003). и 2010c). Следует также обращать внимание на внешние факторы, которые могут стать причиной ошибок, такие как пыль, загрязнение, иней, соль, высокая экстремальная температура окружающей среды или вандализм.

Инструментальные ошибки. Правильный отбор приборов является необходимым, но не достаточным условием для получения данных хорошего качества. Ни один из методов измерений не идеален, и все приборы являются источником различных систематических или случайных погрешностей. Их влияние на качество данных должно быть сокращено до приемлемого уровня путем соответствующих предупредительных и коррективных мер. Эти ошибки и погрешности зависят от типа наблюдения; они рассматриваются в соответствующих главах настоящего Руководства (см. часть I).

Сбор данных. Качество данных зависит не только от качества приборов и их правильного размещения и установки, но также от аппаратуры и методов, используемых для их получения и преобразования в репрезентативные данные. Следует проводить различие между автоматизированными измерениями и наблюдениями, проводимыми человеком. В зависимости от технических характеристик датчика, в особенности от его постоянной времени, должны применяться соответствующие процедуры дискретизации и осреднения. Нежелательные источники внешних электрических помех и шума могут ухудшить качество выходного сигнала датчика, и их следует исключать путем соответствующего формирования сигнала датчика перед вводом в систему сбора данных. Следует сделать ссылку на дискретизацию и фильтрацию, о которых говорится в главе 1 части II и в главе 2 части II. В случае снятия показаний прибора вручную ошибки могут быть обусловлены конструкцией, размещением или разрешением прибора либо недостаточной подготовкой наблюдателя. При визуальных или субъективных наблюдениях ошибки могут возникать ввиду неопытности наблюдателя, неправильно интерпретирующего метеорологические явления.

Обработка данных. Ошибки могут также вноситься при преобразовании или при процедурах расчета, применяемых для преобразования измеренных данных в метеорологические данные уровня II или уровня III. Примерами этого являются расчеты влажности на основании измеренных значений относительной влажности или точки росы и приведение давления к среднему уровню моря. Ошибки также возникают при кодировании или декодировании метеорологических сообщений, в особенности, если это делается наблюдателем.

Контроль качества в режиме реального времени. Качество данных зависит от процедур контроля качества в режиме реального времени, применяемых при сборе и обработке данных и при подготовке сообщений, с целью исключения основных источников ошибок и погрешностей. Эти процедуры являются специфическими для каждого типа измерений, но, как правило, включают общие проверки на достоверность значений, скорость изменений, а также сравнения с результатами других измерений (например, точка росы не может превышать температуру).

Специальным проверкам подвергаются результаты наблюдений и метеорологические сообщения, вводимые вручную. В АМС имеется специальное встроенное испытательное оборудование, которое позволяет обнаружить конкретные аппаратные ошибки. Применение этих процедур является наиболее важным, поскольку некоторые ошибки и погрешности, вносимые в процессе измерения, нельзя исключить позднее. Общий обзор используемых ручных и автоматизированных методов содержится в других разделах настоящей главы, а также в главе 1 части II и в публикациях ВМО (1989; 1992; 1993*а*; 2003), а также (1993*а*; 2010*а*; 2010*в*; 2010*с*).

Мониторинг функционирования. Поскольку процедуры контроля качества в режиме реального времени имеют свои ограничения и некоторые погрешности, вызванные долговременным дрейфом датчиков, и ошибки в передаче данных могут остаться незамеченными, то требуется мониторинг функционирования на уровне сети, проводимый центрами метеорологического анализа и администраторами сети. Этот мониторинг описан в разделе 1.8 этой главы. Информацию также можно почерпнуть из главы 1 части II и из публикации ВМО (1989), а также(2010а). Важно установить эффективные процедуры связи между лицами, отвечающими за мониторинг, за техническое обслуживание и за калибровку с тем, чтобы способствовать быстрому реагированию на сообщения от системы мониторинга об ошибках или отказах.

Испытания и калибровка. В ходе эксплуатации технические и инструментальные характеристики метеорологических приборов изменяются в силу ряда причин, таких как старение аппаратных компонентов, ухудшение обслуживания и установки и т. д. Это может вызвать долгопериодные дрейфы или внезапные изменения в калибровке. Следовательно, для получения надежных данных необходимо проводить регулярную инспекцию и калибровку (поверку) приборов. Это требует наличия эталонов и соответствующей калибровочной и испытательной техники. Это также требует эффективного плана калибровки, поверки и метрологического обслуживания. За общей информацией об аспектах испытаний и калибровки следует обратиться к главе 4 части III и к соответствующим главам части I, посвященным отдельным приборам.

Техническое обслуживание. Техническое обслуживание может носить коррективный (когда выходят из строя некоторые части), профилактический (например, чистка или смазка) или адаптивный (в ответ на изменившиеся требования или моральный износ) характер. На качество данных, полученных с помощью прибора, оказывает значительное влияние качество его технического обслуживания, которое, в свою очередь, зависит, главным образом, от квалификации обслуживающего персонала и концепции технического обслуживания. Возможности, персонал и оборудование организации или подразделения, отвечающего за техническое обслуживание, должны быть адекватны обслуживаемым приборам и сетям. Необходимо принимать во внимание несколько факторов, таких как план технического обслуживания, который включает коррективное, профилактическое и адаптивное обслуживание, логический менеджмент и ремонтные, испытательные и вспомогательные технические средства. Необходимо отметить, что стоимость технического обслуживания оборудования может значительно превысить стоимость его закупки (см. главу 1 части II).

Подготовка кадров и образование. Качество данных зависит также от квалификации технического персонала, отвечающего за испытания, калибровку и техническое обслуживание приборов, а также наблюдателей, производящих наблюдения. Программы подготовки кадров и образования должны быть составлены в соответствии с рациональным планом, направленным на удовлетворение нужд пользователей и, особенно, требований к техническому обслуживанию и калибровке (поверке), описанных выше, и должны быть адаптированы к специфике системы; это особенно важно для АМС. В условия закупки системы должно входить обязательство завода-изготовителя предоставить всеобъемлющую эксплуатационно-техническую документацию и организовать учебные курсы для техников и операторов (см. главу 5 части III) в НМГС.

Метаданные. Хорошо продуманная система обеспечения качества предусматривает наличие детальной информации о самой наблюдательной системе и, в частности, обо всех изменениях, происходящих в ходе ее эксплуатации. Такая информация о данных, известная как метаданные, позволяет оператору наблюдательной системы предпринять самые необходимые профилактические, коррективные и адаптивные меры для поддержания или повышения качества данных. Требования к метаданным рассматриваются далее в разделе 1.9. Дополнительную информацию о метаданных см. в главе 1 части I (и приложении 1.C).

1.7 ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА (КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА)

В публикации ВМО (2003), а также (2010*с*) предписывается применять ко всем метеорологическим данным, подлежащим международному обмену, определенные процедуры контроля качества. Проходить такой контроль качества должны все данные уровня I

и уровня II и процедуры преобразования из одного уровня в другой. В публикации ВМО (1992), а также (2010*в*) центрам обработки метеорологических данных предписывается применять процедуры контроля качества в отношении большинства типов метеорологических сводок, обмениваемых в международном масштабе, с целью их проверки на наличие ошибок кодирования, внутреннюю совместимость, совместимость во времени и в пространстве и соответствие физическим и климатологическим ограничениям, и там же определяется минимальная частота и сроки проведения контроля качества.

В публикации ВМО (1989) и (2010*а*) содержится общее описание процедур контроля качества. В ней подчеркивается важность контроля качества на уровне станции, поскольку некоторые возникающие здесь ошибки нельзя впоследствии исправить, а также отмечаются большие преимущества автоматизации. В публикации ВМО (1993*а*) содержится довольно подробное описание процедур, которые могут использоваться центрами численного анализа, сведения о климатологических ограничениях, типах проверок на внутреннюю совместимость, сравнениях данных с данными соседних станций и с анализами и прогнозами, а также кратко комментируются вероятности исключения доброкачественных данных и принятия ошибочных данных с известными статистическими распределениями ошибок.

Контроль качества, как, в частности, конкретно определено в разделе 1.1, осуществляется в режиме реального или близкого к реальному времени сбора и обработки данных. На практике ответственность за контроль качества возлагается на различные точки в цепи получения данных. Они могут быть на станции, если сбор данных осуществляется непосредственно и вручную, или в различных центрах, в которых проводится обработка данных.

Процедуры обеспечения качества должны внедряться и переоцениваться на этапах разработки новых датчиков или наблюдательных систем (см. рисунок 1.5).

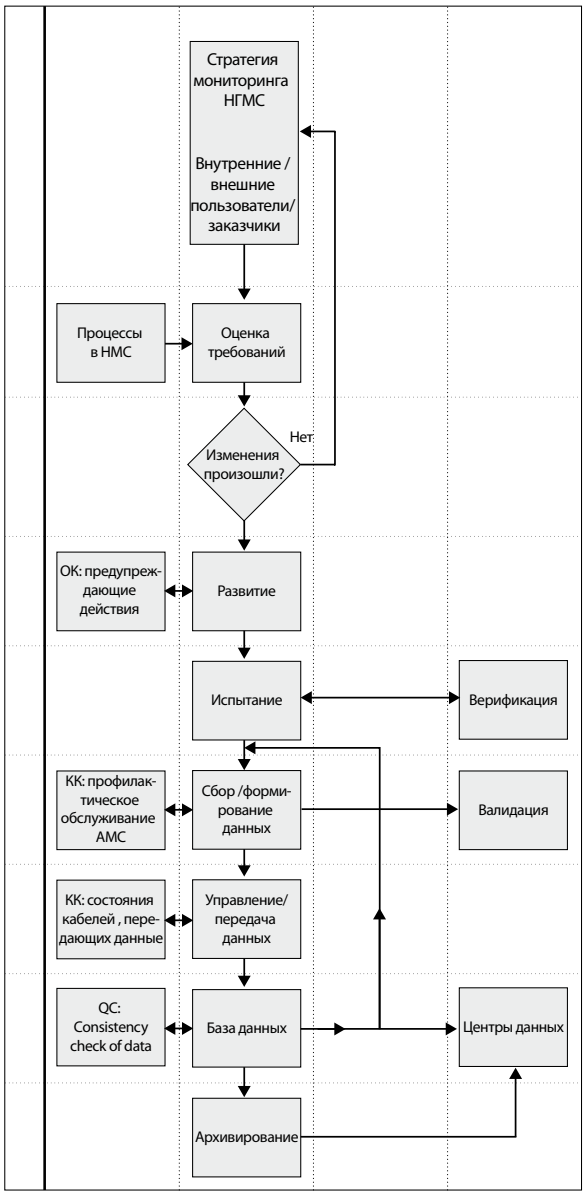
1.7.1 Приземные данные

1.7.1.1 Ручные наблюдения и станции с персоналом

В обязанности наблюдателя или дежурного сотрудника на станции входит обеспечение контроля качества данных, отправляемых со станции, и соблюдения установленных процедур выполнения этих обязанностей. Эта специфическая функция дополняет другие функции технического обслуживания и ведения записей и включает следующее:

(a) проверки на внутреннюю совместимость полных синоптических или других комплексных наблюдений: на практике опытный наблюдатель выполняет их в ходе обычной работы, но, тем не менее, они должны быть безусловным требованием. Примерами являются зависимости между температурой, точкой росы и суточными экстремальными значениями, а также между дождем, облачностью и погодой;

(b) климатологические проверки: они служат целям согласованности. Наблюдатель знает нормальные сезонные амплитуды переменных



АМС – Автоматическая Метеорологическая Станция

Рис.1.5. Процесс формирования данных наблюдений

на станции либо располагает соответствующими картами или таблицами, и он не должен допускать, чтобы необычные значения проходили непроверенными;

(c) временные проверки: их следует проводить, чтобы обеспечить реальность изменений, произошедших со времени предыдущего наблюдения, особенно когда наблюдения проводились различными наблюдателями;

(d) проверки арифметических операций и операций с использованием таблиц;

(e) проверки всех сообщений и других записей по исходным данным.

1.7.1.2 Автоматические метеорологические станции

На АМС некоторые из вышеуказанных проверок должны выполняться программным обеспечением наряду с техническими поверками функционирования системы. Эти вопросы рассматриваются в главе 1 части II.

1.7.2 Аэрологические данные

Процедуры контроля качества аэрологических данных по существу аналогичны процедурам, используемым для приземных данных. Необходимо выполнять проверки данных на их внутреннюю совместимость (например, скорости убывания и сдвиги), на климатологическую и временную совместимость, а также на совместимость с данными обычных наземных наблюдений. При радиозондировании крайне важно, чтобы базовая калибровка подвергалась тщательной и специальной проверке. Данные, содержащиеся в сообщении, также должны быть сверены с данными наблюдений.

Автоматизация контроля качества на станции особенно полезна в случае аэрологических данных.

1.7.3 Центры данных

Данные должны проверяться в режиме реального времени или как можно ближе к нему в первой и последующих точках, где они принимаются или используются. Весьма рекомендуется проводить одинаковые срочные проверки всех данных, даже тех, которые не используются в режиме реального времени, поскольку при задержках контроля качества имеется тенденция к потере эффективности. При наличии автоматизации ее, разумеется, следует использовать, но определенные процедуры контроля качества возможны и без компьютеров или только при частичном использовании вычислительной техники. Принцип состоит в том, что каждое сообщение должно проверяться предпочтительно на каждом этапе всей цепи получения данных.

Проверки, уже проведенные на уровне станции, обычно повторяются в центрах данных, возможно, в расширенной форме с использованием автоматизации. Однако центры данных обычно имеют доступ к другим данным сети, что делает возможным проведение пространственной проверки путем сравнения с результатами наблюдений соседних станций либо с полями результатов анализа или прогноза. Этот метод весьма эффективен и является составной частью деятельности центра данных.

Если обнаруживаются ошибки, то данные должны быть исключены или исправлены путем отправки назад к источнику либо в центре данных посредством логических умозаключений. Последняя из этих альтернатив, очевидно, может внести дополнительные ошибки, но она, тем не менее, обоснована в ряде обстоятельств; скорректированные таким образом данные должны быть помечены в базе данных и к их использованию следует относиться с осторожностью.

В процессе контроля качества формируются данные установленного качества, которые затем могут быть использованы для деятельности в режиме реального времени и для банка данных. Однако побочным продуктом этого процесса должен быть сбор информации об обнаруженных ошибках. При хорошей организации работы в первой точке обработки данных или в последующих точках устанавливается система немедленной обратной связи с источником данных в случаях обнаружения ошибок и ведения соответствующей регистрации для использования администратором сети с целью мониторинга функционирования сети, как описано ниже. Эту функцию наилучшим образом можно осуществить на региональном уровне, где имеется непосредственный доступ к полевым станциям.

Подробные процедуры, описанные в публикации ВМО (1993а), являются руководством для контроля качества данных, подлежащих международному обмену, согласно рекомендациям ВМО (2010в).

Автоматические метеорологические станции требуют особого внимания со стороны центра сбора данных, поскольку системы контроля качества, установленные на станции, не обладают той гибкостью и, возможно, надежностью, которые обеспечиваются при ручных операциях

1.7.4 Взаимодействие с полевыми станциями

Для поддержания определенного качества данных абсолютно необходимо прослеживать источники, из

которых поступают ошибки, принимая соответствующие коррективные меры. Для данных, полученных со станций с персоналом, это весьма эффективно делается в режиме, близком к реальному времени, не только потому, что данные можно исправить, но и потому, что, определив причину ошибки, можно предотвратить ее повторение.

Эффективной практикой работы в центре данных или другом оперативном центре является назначение лица, ответственного за поддержание связи практически в реальном масштабе времени и эффективных рабочих контактов с полевыми метеостанциями в тех случаях, когда обнаруживаются ошибки в данных.

1.8 МОНИТОРИНГ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

Управление сетью или станцией значительно улучшается, если ведется непрерывная регистрация функционирования, как правило, по ежедневному и месячному графику. Цель мониторинга функционирования состоит в том, чтобы постоянно следить за качеством работы метеостанций и каждой системы наблюдений, таких как сеть измерения давления или радиозондовая сеть.

Мониторинг функционирования предполагает несколько следующих аспектов:

(a) уведомления из центров данных должны использоваться для регистрации числа и типов ошибок, обнаруженных при осуществлении процедур контроля качества;

(b) данные с каждой станции должны включаться в синоптические и временные ряды. Такие ряды должны использоваться для определения систематических расхождений с данными соседних станций как по пространственным полям, так и по сравнимым временным рядам. Полезно получать статистику средних значений и рассеяния отклонений. Для этих целей эффективны графические методы;

(c) от полевых станций должны поступать сводки об отказах оборудования или других аспектах функционирования.

Сводки такого рода весьма эффективны для выявления систематических недостатков в функционировании и определения коррективных мер. Они эффективно демонстрируют влияние на данные многих факторов, таких как изменения установки или калибровки, ухудшение работы оборудования, изменения качества расходных материалов или необходимость в переподготовке персонала. Они особенно важны для поддержания доверия к автоматическому оборудованию.

Результаты мониторинга функционирования должны использоваться для обратной связи с полевыми станциями, что важно для поддержания заинтересованности персонала. Эти результаты также показывают, когда необходимо предпринять меры по ремонту или модернизации полевого оборудования.

Мониторинг функционирования является трудоемкой задачей, на решение которой администратор сети должен выделить достаточные ресурсы. В публикации ВМО (1988) описывается система мониторинга данных с сети АМС небольшой специальной группой сотрудников, проводящей мониторинг выходных данных в режиме реального времени и консультирующей администраторов сети и пользователей данных. Miller и Morone (1993) описывают систему с аналогичными функциями в режиме, близком к режиму реального времени, с использованием мезомасштабной численной модели для пространственных и временных проверок данных.

1.9 ОДНОРОДНОСТЬ ДАННЫХ И МЕТАДАННЫЕ

В прошлом сети наблюдений создавались, главным образом, в поддержку деятельности по прогнозированию погоды. Оперативный контроль качества был сосредоточен в основном на определении грубых ошибок, но редко включал в себя проверки на однородность данных и непрерывность временных рядов. Рост интереса к вопросам изменения климата под влиянием, прежде всего, повышенного содержания парниковых газов изменил это положение. Проверки на однородность данных выявили, что многие из очевидных изменений климата можно объяснить неоднородностями во временных рядах, вызванными лишь оперативными изменениями в системах наблюдений. В этом разделе мы попытаемся кратко описать причины этого и предложим некоторые рекомендации относительно необходимой информации о данных, а именно метаданных, которая должна предоставляться для изучения однородности данных и исследований изменения климата.

1.9.1 Причины неоднородностей данных

Неоднородности, вызванные изменениями в системе наблюдений, проявляются в виде резких разрывов непрерывности, постепенных изменений или изменений характера изменчивости. Резкие разрывы

непрерывности обусловлены, главным образом, изменениями в приборном оснащении, размещении и установке, перемещением станций, изменениями в расчетах средних значений величин, процедурах приведения данных и применением новых поправок калибровки. Неоднородности, проявляющиеся в виде эффекта постепенного изменения в сторону увеличения, могут объясняться изменением окружения станции, урбанизацией и постепенными изменениями характеристик приборов. Изменения характера изменчивости вызываются нарушениями нормальной работы приборов. Кроме того, неоднородности возникают в силу изменений времени наблюдений, недостаточности регулярных инспекций, технического обслуживания и калибровки и неудовлетворительности процедур наблюдений. На уровне сети неоднородности могут быть обусловлены несовместимостью данных. Очевидно, что все факторы, влияющие на качество данных, также могут вызывать неоднородности в данных.

Серьезность этой проблемы иллюстрируется историческим обзором изменений радиозондов (ВМО, 1993b), который является хорошим примером тщательной работы, которая необходима для устранения проблемы.

Изменения в рядах данных о приземной температуре при замене станций с персоналом на АМС и изменения в аэрологических данных при смене типов радиозондов являются особо весомыми причинами появления неоднородностей данных. Эти две причины теперь общепризнанны, и в принципе их можно предвидеть и устранить, а мониторинг функционирования может быть использован для подтверждения эффективности таких исправлений или даже для определения источников некорректности.

1.9.2 Метаданные

Неоднородностей данных следует по мере возможности избегать путем соответствующих процедур обеспечения качества, касающихся контроля качества. Однако этого не всегда можно добиться, поскольку некоторые причины неоднородностей, такие как замена датчиков, могут представлять собой реальные усовершенствования в измерительной аппаратуре. Важно иметь информацию о наличии, типе и, особенно, о времени появления всех неоднородностей. После получения такой информации климатологи могут задействовать соответствующие статистические программы для согласования предыдущих данных с новыми данными в однородных базах данных с высокой степенью уверенности. Информация такого рода обычно содержится в сведениях о данных, известных как метаданные, также называемых историей станции. Без такой информации многие из вышеупомянутых неоднородностей невозможно определить и исправить. Метаданные можно рассматривать как расширенную версию административного описания станции, содержащей всю возможную информацию о первоначальном размещении, типе и времени изменений, которые происходили в течение жизненного цикла наблюдательной системы. Поскольку важным аспектом систем передачи качественных данных являются компьютерные системы управления данными, желательно, чтобы метаданные содержались в компьютерной базе данных, составление, обновление и использование которой обеспечивается компьютером.

1.9.3 Элементы базы метаданных

База метаданных содержит первоначальную информацию о размещении станции наряду с обновлениями этих данных по мере того, как происходят изменения. Основные элементы включают следующее:

(a) информация о сети:
орган, эксплуатирующий сеть, а также тип и назначение сети;

(b) информация о станции:
- (i) административная информация;
- (ii) местоположение: географические координаты, высота над уровнем моря[3];
- (iii) описания удаленного и близлежащего окружения и препятствий[3];
- (iv) план размещения приборов[3];
- (v) технические средства: передача данных, энергопитание, кабельные соединения;
- (vi) климатологическое описание;

c) информация об отдельных приборах:
- (i) тип: завод-изготовитель, модель, серийный номер, принципы действия;
- (ii) рабочие характеристики;
- (iii) данные и время калибровки;
- (iv) размещение и установка: местоположение, устройства защиты, высота над землей[3];
- (v) программа измерений или наблюдений;
- (vi) сроки наблюдений;
- (vii) наблюдатель;
- (viii) сбор данных: дискретность, осреднение;
- (ix) методы и алгоритмы обработки данных;
- (x) профилактическое и коррективное обслуживание;
- (xi) качество данных (в виде отметки сомнительности или неопределенности).

---

[3] Необходимо включить карты и планы в соответствующих масштабах.

1.9.4 Рекомендации в отношении системы метаданных

Для разработки системы метаданных необходима серьезная междисциплинарная организация, а ее функционирование, в особенности скрупулезная и точно датированная регистрация изменений в базе метаданных, требует постоянного внимания.

Полезный обзор требований содержится в публикации ВМО (1994) с примерами последствий изменений в практике наблюдений и с объяснением преимуществ хороших метаданных для получения надежных климатологических рядов на основе данных с нарушением непрерывности. Основные функциональные элементы системы поддержания базы метаданных можно обобщить следующим образом:

(a) должны быть установлены стандартные процедуры сбора перекрывающих друг друга данных измерений в случаях любых значительных изменений в приборном оснащении, практике наблюдений и размещении датчиков;
(b) должны проводиться регулярные оценки проведения калибровки, технического обслуживания и проблем однородности с целью принятия коррективных мер, когда они необходимы;
(c) необходимо открытое взаимодействие между теми, кто собирает данные, и научными работниками для обеспечения механизмов обратной связи с целью обнаружения проблем с данными, исправления или, по крайней мере, документирования проблем, и совершенствования или пополнения документации для удовлетворения первоначально непредусмотренных требований пользователей (например, рабочих групп);
(d) должна существовать подробная и легко доступная документация о методах, обосновании, испытаниях, допущениях и известных проблемах, связанных с получением массивов данных на основе измерений.

Цель этих четырех рекомендаций заключается в обеспечении пользователей достаточными метаданными, позволяющими оперировать с данными, объединять и обобщать их с минимальными допущениями в отношении качества и однородности.

1.10 УПРАВЛЕНИЕ СЕТЬЮ

Управление сетью распространяется на все, влияющие на качество данных, факторы, описанные в разделе 1.6. В частности, управление сетью должно включать меры по исправлению недостатков в работе сети, выявленных посредством процедур контроля качества и мониторинга функционирования.

Сети определены в публикации ВМО (2003) и (2010c), а руководство по управлению сетью в общих чертах изложено в публикации ВМО (1989) и (2010a), включая структуру и функции подразделения управления сетью. Практика управления сетью весьма разнообразна в зависимости от установленных на местах административных положений.

Весьма желательно назначение конкретного лица или подразделения в качестве администратора сети, которому вменяется в обязанность оперативно следить за влиянием различных факторов на качество данных. Другие специалисты, отвечающие за управление и выполнение отдельных задач, должны сотрудничать с администратором сети и нести ответственность за изменение качества данных в результате принятых мер.

Администратор должен постоянно следить за процедурами и результатами, связанными со всеми влияющими на качество факторами, описанными в разделе 1.6, включая следующие соображения:

(a) системы контроля качества, описанные в разделе 1.1, играют важную оперативную роль в любой метеорологической сети, и им должно уделяться приоритетное внимание со стороны пользователей данных и администрации сети;
(b) мониторинг функционирования обычно понимается как функция управления сетью. По его результатам составляются указания о принятии мер по факторам влияния установки, калибровки и технического обслуживания. Он также обеспечивает информацию о влиянии некоторых других факторов;
(c) инспекция полевых метеостанций, описанная ниже, также входит в функции управления сетью;
(d) техническое обслуживание оборудования может входить в непосредственные функции подразделения по управлению сетью. В противном случае должно осуществляться особо эффективное сотрудничество между администратором сети и подразделением, отвечающим за оборудование;
(e) административная структура должна позволять администратору сети принимать или организовывать коррективные меры, вытекающие из результатов процедур контроля качества, мониторинга функционирования, программы инспекций или любых других факторов, влияющих на качество. Одним из прочих наиболее важных факторов, описанных в главе 5 части III, является подготовка

наблюдателей, и администратор сети должен быть в состоянии оказывать влияние на содержание и проведение курсов и методику их проведения или выполнение предписанных требований к подготовке специалистов.

1.10.1 **Инспекции**

Метеостанции должны регулярно инспектироваться, предпочтительно специально назначенными опытными инспекторами. Цели состоят в том, чтобы ознакомиться с работой наблюдателей, проверить техническое обслуживание и установку оборудования, а также повысить ценность данных путем регистрации истории станции. Одновременно могут быть выполнены различные административные функции, которые особенно важны для станций с персоналом. Одни и те же принципы применяются в отношении станций с персоналом, станций, эксплуатируемых персоналом с неполным рабочим днем, добровольцами или наблюдателями по контракту и в определенной степени АМС. Требования в отношении инспекций изложены в публикации ВМО (2003) и (2010*c*), а рекомендация дается в публикации ВМО (1989) и (2010*a*).

Отчеты об инспекциях входят в качестве составной части в отчеты о мониторинге функционирования.

Весьма желательно иметь систематическую и исчерпывающую процедуру, полностью документированную в форме справочников по инспекциям и техническому обслуживанию, которые должны использоваться инспекторами, посещающими станции. Процедуры должны включать подробные сведения о составлении отчетов и принятии последующих мер.

Инспектор должен удостовериться, в частности, в следующих аспектах функционирования станции.

(a) *Функционирование приборов*. Приборы, требующие калибровки (поверки), должны быть сверены с соответствующим эталоном. В первую очередь следует обратить внимание на атмосферное давление, поскольку все полевые барометры могут иметь определенный дрейф. Механические и электрические регистрирующие системы должны проверяться в соответствии с установленными процедурами. Более сложное оборудование, такое как автоматические метеорологические станции и радиолокаторы, нуждаются, разумеется, в различных физических и электрических поверках. Защита анемометров и будки для термометров особенно подвержены повреждениям различного рода, что может привести к изменению данных. Должно быть проверено физическое состояние всего оборудования на предмет грязи, коррозии и т. д.;

(b) *Методы наблюдений*. В процедуры наблюдений могут легко вкрасться отклонения от установленной практики, поэтому работа всех наблюдателей должна проверяться постоянно. Важную роль в использовании данных для синоптических и климатологических целей играет однородность методов наблюдений, регистрации, кодирования;

(c) *Установка*. Любые изменения в окружении станции должны быть документированы и, если это практически возможно, в соответствующее время исправлены. Может потребоваться перенос станции на новое место.

Инспекции станций с персоналом также служат цели поддержания интереса и энтузиазма наблюдателей. Инспектор должен быть тактичным, информативным, проявлять энтузиазм и готовность к сотрудничеству.

По каждой инспекции должна быть заполнена заранее подготовленная форма отчетности. Она должна включать проверочный список состояния и установки оборудования, а также квалификации и компетентности наблюдателей. Инспекционная форма может также использоваться для других административных целей, например инвентаризации.

Чрезвычайно важно, чтобы все изменения, обнаруженные в ходе инспекции, постоянно регистрировались и датировались с тем, чтобы велась история станции для последующего использования в исследованиях климата и для других целей.

Оптимальная частота инспекционных визитов не может быть точно установлена даже для одного конкретного типа станций. Она зависит от качества работы наблюдателей и оборудования, скорости, с которой может ухудшаться работа приборов и экспозиция, и изменений в персонале станции и ее технических средствах. Инспекционный интервал в два года может считаться достаточным для станции с хорошо отлаженной работой, а интервал в шесть месяцев может в большей мере подходить для автоматических станций. Для некоторых видов станций должны существовать специальные инспекционные требования.

Некоторые виды технического обслуживания оборудования могут проводиться инспектором или группой инспекторов в зависимости от их квалификации. Как правило, должна быть составлена программа технического обслуживания оборудования, как это делается в случае инспекций. Этот вопрос здесь не рассматривается, поскольку требования к таким программам и возможная организация весьма разнообразны.

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Deming, W.E., 1986: *Out of the Crisis: Quality, Productivity and Competitive Position*. University of Cambridge Press, Cambridge.

Международная организация по стандартизации, 2005: *Системы менеджмента качества – Основные положения и словарь*. ИСО 9000:2005.

Международная организация по стандартизации, 2000: *Системы менеджмента качества – Требования*. ИСО 9001:2000.

Международная организация по стандартизации, 2000: *Системы менеджмента качества – Рекомендации по улучшению деятельности*. ИСО 9004:2000.

Международная организация по стандартизации, 2002: *Руководящие указания по аудиту систем менеджмента качества и/или систем экологического менеджмента*. ИСО 19011:2002.

International Organization for Standardization International Electrotechnical Commission, 2005: *General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*. ISO/EC 17025:2005.

International Organization for Standardization International Electrotechnical Commission, 2005: Information technology – Service management – Part 1: Specification. ISO/IEC 20000-1:2005.

International Organization for Standardization: Information technology – Service management – Part 2: Code of practice, ISO/IEC 20000-2:2005-12, Geneva

Kaplan, R.S., D.P. Norton, 1996: *The Balanced Scorecard: Translating Strategy into Action*. Harvard Business School Press, Boston.

Miller, P.A. and L.L. Morone, 1993: Real-time quality control of hourly reports from the automated surface observing system. *Preprints of the Eighth Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation*. American Meteorological Society, Boston, pp. 373-38.

World Meteorological Organization, 1988: Practical experience of the operation of quality evaluation programmes for automated surface observations both on land and over the sea (M. Field and J. Nash). *Papers Presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation (TECO-1988)*. Instruments and Observing Methods Report No. 33, WMO/TD-No. 222, Geneva, pp. 335 – 340.

Всемирная Метеорологическая Организация, 1993*a*: *Руководство по Глобальной системе обработки данных*. ВМО-№ 305, Женева.

World Meteorological Organization, 1993*b*: *Historical Changes in Radiosonde Instruments and Practices* (D.J. Gaffen). Instruments and Observing Methods Report No. 50, WMO/TD-No. 541, Geneva.

World Meteorological Organization, 1994: Homogeneity of data and the climate record (K.D. Hadeen and N.B. Guttman). *Papers Presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation (TECO-94)*, Instruments and Observing Methods Report No. 57, WMO/TD-No. 588, Geneva, pp. 3 – 11.

World Meteorological Organization, 2005*a*: *Quality Management Framework* (QMF). First WMO Technical Report (revised edition), WMO/TD-No. 1268.

World Meteorological Organization, 2005*b*: *Guidelines on Quality Management Procedures and Practices for Public Weather Services*. PWS-11, WMO/TD No. 1256, Geneva.WMO/TD-No. 222, Geneva, pp. 335 – 340.

Всемирная Метеорологическая Организация, 1989, 2010*a*: *Руководство по Глобальной системе наблюдений и прогнозирования*. ВМО-№ 488, Женева.

Всемирная Метеорологическая Организация, 1992, 2010*в*: *Наставление по Глобальной системе обработки данных*. ВМО-№ 485, Женева

Всемирная Метеорологическая Организация, 2003, 2010с: *Руководство по Глобальной системе наблюдений*. Том I, ВМО-№ 544, Женева.

ГЛАВА 2

ДИСКРЕТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕННЫХ

2.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Цель настоящей главы состоит в том, чтобы дать введение в эту сложную тему для неспециалистов, нуждающихся в достаточных знаниях для расширения общего понимания вопросов и получения представления о важности описываемых методик.

Атмосферные переменные, такие как скорость ветра, температура, давление и влажность, являются функциями четырех измерений – двух по горизонтали, одного по вертикали и одного по времени. Они неравномерно варьируют во всех четырех измерениях, и целью изучения дискретных измерений метеорологических переменных является определение практических процедур для получения репрезентативных наблюдений с допустимыми погрешностями в оценках средних значений и изменчивости.

Описание дискретных измерений в горизонтальных координатах включает тему репрезентативности по площади, о чем рассказывается в главе 1 части I, в других главах, посвященных измерениям конкретных переменных, а также кратко излагается ниже. Эта тема также включает вопросы проектирования сети, что является особым видом исследования, связанного с численным анализом, а также измерений осредненных по площади величин с использованием радиолокаторов и спутников; ни один из этих вопросов в данной главе не рассматривается. Дискретные измерения по вертикали кратко описываются в главах 12 и 13 части I и в главе 5 части II. Поэтому настоящая глава посвящена лишь дискретным измерениям во времени, за исключением некоторых общих замечаний о репрезентативности.

Данная тема может рассматриваться на двух уровнях следующим образом:

(a) на элементарном уровне может обсуждаться основная проблема в метеорологии, которая заключается в получении среднего значения изменяющейся величины, репрезентативного для установленного интервала между отсчетами в данный момент времени, с использованием измерительных систем, имеющих более длительное время отклика по сравнению с периодом флуктуации. На самом простом уровне это приводит к рассмотрению статистических характеристик комплекса измерений и времени отклика приборов и электронных схем;

(b) более четко эту проблему можно обозначить, используя теорию анализа временных рядов, концепцию спектра и характеристик фильтров. Эти методы необходимы при решении более сложной проблемы применения относительно быстродействующих приборов для получения удовлетворительных измерений средних значений или спектра быстро изменяющейся величины, например ветра.

В связи с этим представляется целесообразным начать главу с описания временных рядов, спектров и фильтров, помещенного в разделах 2.2 и 2.3. Раздел 2.4 содержит практические советы по выполнению дискретных измерений. Большая его часть посвящена цифровым методам и автоматической обработке.

Важно отметить, что нам фактически никогда не удается измерить действительное значение атмосферной переменной. Можно лишь приблизительно его определить, насколько позволит датчик этой переменной. Важность такого различия состоит в том, что датчики не выдают точного аналога измеряемой переменной. Вообще говоря, датчики реагируют медленнее, чем меняется состояние атмосферы, и, кроме того, они вносят шум. Датчики также часто являются причиной других, обычно нежелательных эффектов, таких как дрейф первоначальных результатов калибровки, нелинейность чувствительности, создание помех для измеряемой величины, чаще предполагаемого выходят из строя и т. д. Однако материал настоящей главы будет ограничен лишь рассмотрением отклика и внесения шума.

Имеется много учебников, содержащих достаточно информации, необходимой для проектирования систем дискретных измерений или изучения выборки данных. Для примера можно привести работы Bendat and Piersol (1986) или Otnes and Enochson (1978). Среди других полезных работ можно отметить работы Pasquill and Smith (1983), Stearns and Hush (1990), Kulhánek (1976), и Jenkins and Watts (1968).

2.1.1 Определения

Для целей настоящей главы используются следующие определения:

Дискретные измерения – это процесс получения дискретной последовательности измерений какой-либо величины.

Отсчет – это единичное измерение, обычно одно из серии отдельных отсчетов, выполняемой сенсорной системой. Заметим, что это определение отличается от объяснения, принятого в статистике, т. е. множество чисел или измерений, которое является частью совокупности.

Наблюдение – это результат процесса дискретных измерений, который сообщается или регистрируется (часто также называется измерением). В контексте анализа временных рядов результат наблюдения получают на основании ряда отсчетов.

Измерение, согласно определению ИСО, – это «комплекс операций, имеющих целью определить значение какой-либо величины». В повседневном использовании под этим термином может подразумеваться значение либо отсчета, либо результата наблюдения.

Время дискретных измерений или период наблюдения – это продолжительность времени, за которое производится одно наблюдение, в течение которого выполняется ряд отдельных отсчетов.

Интервал дискретных измерений – это время между последовательными наблюдениями.

Функция дискретизации или весовая функция – в простейшем определении это алгоритм осреднения или фильтрации отдельных отсчетов.

Частота дискретных измерений – это частота, с которой выполняются отсчеты. Дискретность по времени – это время между отдельными отсчетами.

Сглаживание – это процесс ослабления высокочастотных составляющих спектра без существенного влияния на более низкие частоты. Оно обычно производится для устранения шума (случайных ошибок и флуктуации, не нужных для применения).

Фильтр – это цифровой алгоритм, предназначенный для ослабления, усиления или выделения определенных частот. Сглаживание осуществляется с помощью фильтра низких частот, и термины сглаживание и фильтрация в этом смысле часто используются равноценно. Однако существуют также фильтры высоких частот и полосовые фильтры. Фильтрация может быть свойством прибора, как, например, инерция, или может осуществляться электронными или численными методами.

2.1.2 Репрезентативность во времени и пространстве

Дискретные наблюдения производятся с ограниченной скоростью, в течение ограниченных интервалов времени на ограниченной площади. На практике наблюдения должны планироваться достаточно частыми, чтобы быть репрезентативными для неохваченных измерениями интервалов времени и областей пространства, и во многих случаях они считаются таковыми для больших интервалов времени и площадей.

Пользователь данных наблюдений ожидает от них репрезентативности или типичности для района, срока и интервала времени. Этим районом, например, может быть аэропорт или область в радиусе нескольких километров от наблюдателя, легко обозреваемая им. Срок – это время, в которое сделана запись или передано сообщение, а интервал – согласованная величина, часто составляющая 1, 2 или 10 минут.

Для того чтобы добиться репрезентативности наблюдений, датчики размещаются на стандартных высотах и на свободных от препятствий местах, а отсчеты обрабатываются для получения средних значений. В некоторых случаях датчикам, например, трансмиссометрам, свойственно пространственное осреднение, что способствует репрезентативности наблюдений. Другим примером является наблюдение за видимостью, производимое наблюдателем. Однако далее в этой главе мы не будем касаться дискретных измерений в пространстве и сосредоточим внимание на дискретизации во времени при измерениях, выполняемых в какой-либо точке.

Типичным примером дискретных измерений и осреднения по времени является измерение температуры каждую минуту (отсчет), расчет 10-минутных средних значений (интервал дискретных измерений и функция дискретизации) и передача этих средних значений (наблюдения) в синоптической сводке каждые три часа. Когда эти наблюдения собраны за некоторый период времени с одной и той же станции, они сами становятся отсчетами в новой временной последовательности с трехчасовым промежутком. Собранные по большому количеству станций, эти наблюдения также становятся отсчетами уже в пространственной последовательности. В этом смысле репрезентативные наблюдения являются также репрезентативными отсчетами. В настоящей главе мы обсудим исходные наблюдения.

2.1.3 Спектры атмосферных величин

Применяя математическую операцию, известную как преобразование Фурье, для нерегулярной по времени (или по пространству) функции, можно получить ее спектр, являющийся суммой большого количества гармонических колебаний со своей собственной амплитудой, длиной волны (или периодом, или

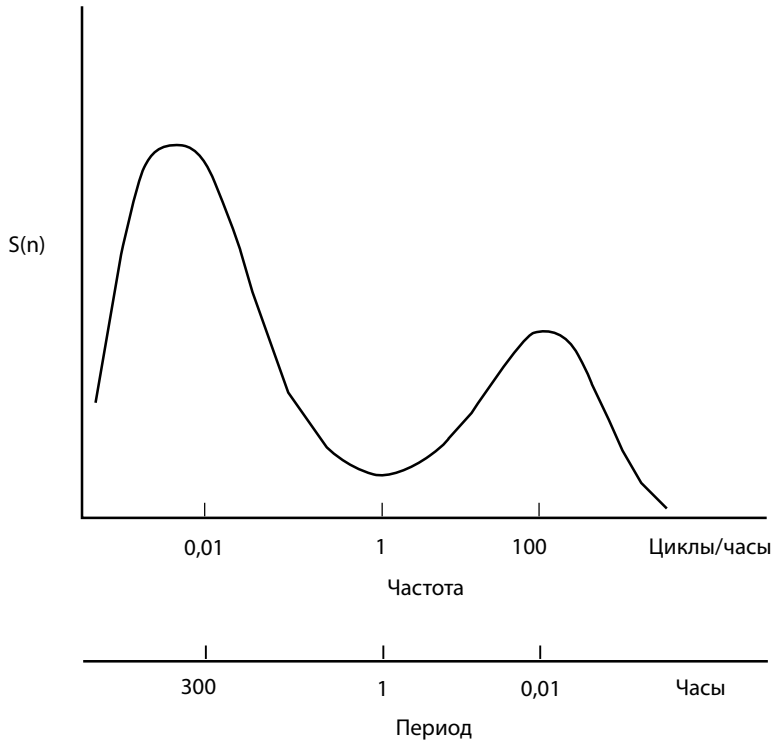


Рис.2.1. Типичный спектр колебаний метеорологической величины

частотой) и фазой. В широком понимании эти длины волн (или частоты) определяют «масштабы» или «масштабы движения» в атмосфере.

Диапазон этих масштабов в атмосфере ограничен. На одном конце спектра горизонтальные масштабы не могут превысить длины окружности Земли, т. е. около 40 000 км. Для метеорологических целей вертикальные масштабы не превышают нескольких десятков километров. Во временном измерении, однако, наибольшие масштабы являются климатологическими и, в принципе, неограниченными, но на практике самый длительный период не превышает длины наших рядов наблюдений. На другом конце спектра вязкая диссипация турбулентной энергии в тепло устанавливает нижнюю границу. Вблизи поверхности земли эта граница имеет длину волны в несколько сантиметров и увеличивается с высотой до нескольких метров в стратосфере. Во временном измерении эти длины волн соответствуют частотам в десятки герц. Правильнее будет сказать, что атмосферные переменные заключены в ограниченной полосе частот.

На рисунке 2.1 схематически представлен спектр метеорологической величины, например ветра, измеренной на конкретной станции. Ордината, часто называемая энергетической или спектральной плотностью, связана с изменчивостью флуктуации ветра на каждой частоте n. Спектр на рисунке 2.1 имеет минимум энергетической плотности в мезомасштабе вблизи одного колебания в час, между пиками в синоптическом масштабе около одного колебания за четыре дня и в микромасштабе около одного колебания в минуту. Наименьшие длины волн составляют несколько сантиметров, а самые большие частоты – десятки герц.

2.2 ВРЕМЕННЫЕ РЯДЫ, СПЕКТРЫ МОЩНОСТИ И ФИЛЬТРЫ

В этом разделе для неспециалистов вводятся понятия анализа временных рядов, которые являются основой для полезного применения в дискретных измерениях. В контексте настоящего Руководства они особенно важны для измерения ветра, но такие же задачи возникают и при измерении температуры, давления и других величин. Они приобрели значение для регулярных метеорологических измерений при внедрении автоматизации измерений, поскольку стали возможными более частые отсчеты. Серьезные ошибки могут возникать в оценках средних, экстремальных значений и всего спектра, если системы неправильно спроектированы.

Измерения спектра являются нерегулярными, но имеют множество применений. Спектр ветра имеет важное значение в строительстве, определении дисперсии, диффузии и динамических характеристик атмосферы. Вместе с тем описанные здесь понятия используются для количественного

анализа спутниковых данных (в горизонтальном пространственном измерении), а также в климатологии и микрометеорологии.

В кратком изложении рассуждение сводится к следующему:

(a) оптимальную частоту отдельных отсчетов можно оценить, исходя из рассмотрения изменчивости измеряемой величины. Оценки средних значений и других статистических характеристик наблюдений будут обладать меньшей неопределенностью с увеличением частоты отсчетов, а именно, при большем количестве отсчетов;

(b) теорема Найквиста устанавливает, что непрерывно изменяющуюся величину можно точно определить с помощью серии дискретных равномерно распределенных отсчетов при условии, что они расположены достаточно близко друг к другу и измерены абсолютно точно;

(c) если частота отдельных отсчетов слишком мала, то колебания на более высоких неизмеряемых частотах (выше частоты Найквиста, определенной в разделе 2.2.1 ниже) скажутся на оценке среднего значения. Они также будут влиять на расчет более низких частот, в результате чего вычисленный спектр окажется неправильным. Это известно как эффект наложения частот. Он может вызвать серьезные ошибки, если его не учитывать при проектировании систем;

(d) наложения частот можно избежать, если отсчеты выполнять более часто или осуществить фильтрацию, что позволит использовать более низкую и более удобную частоту отсчетов;

(e) фильтры могут быть цифровыми или аналоговыми. Датчик с достаточно продолжительным временем отклика действует как фильтр.

Для полного понимания дискретных измерений необходимо располагать знаниями о спектрах мощности, теореме Найквиста, фильтрации и инерционности приборов. Это весьма специальная тема, требующая понимания характеристик используемых датчиков, способов формирования, обработки и регистрации выходных сигналов датчиков, физических свойств измеряемых элементов и цели, для которой анализируются данные. Это, в свою очередь, может потребовать специальных знаний в области физических принципов действия приборов, теории электронных или других систем, используемых для согласования и регистрации, математических, статистических характеристик и метеорологических условий возникновения явлений; все это выходит за рамки настоящей главы.

Однако неспециалист сможет понять принципы полезного применения при измерении средних и экстремальных значений и представить проблемы, связанные с измерениями спектров.

2.2.1 Анализ временных рядов

Необходимо рассмотреть сигналы, принадлежащие либо временной, либо частотной области. Основной идеей, лежащей в основе спектрального анализа, является понятие преобразования Фурье. Функцию $f(t)$, определенную между $t = 0$ и $t = \tau$, можно разложить на сумму гармонических составляющих:

$$f(t) = \sum_{j=0}^{\circ} [A_j \sin(jwt) + B_j \cos(jwt)] \qquad (2.1)$$

где $\omega = 2\pi/\tau$. Правая часть уравнения представляет собой ряд Фурье A_j и B_j – амплитуды составляющих на частотах $n_j = j\omega$. Это является основным преобразованием между временной и частотной областью. Коэффициенты Фурье A_j и B_j относятся непосредственно к частоте $j\omega$ и их можно рассматривать как спектральные составляющие для $f(t)$ на этих частотах. Если известна частотная характеристика прибора, т. е. как он усиливает или ослабляет определенные частоты, а также если известно, каков вклад составляющих на этих частотах в первоначальном сигнале, то можно рассчитать влияние частотной характеристики на выходной сигнал. Вклад составляющей на каждой частоте характеризуется двумя параметрами. Наиболее удобно их выразить в виде амплитуды и фазы частотной составляющей. Таким образом, если уравнение 2.1 записать в иной форме:

$$(f(t) = \sum_{j=0}^{\infty} \alpha_j \, sin(j\omega t + \phi_j) \qquad (2.2)$$

то амплитудой и фазой, определяющими каждую спектральную составляющую, будут α_j и ϕ_j. Обе могут изменяться при дискретных измерениях и обработке.

До сих пор предполагалось, что функция $f(t)$ непрерывна во всем ее интервале от $t = 0$ до $t = \tau$. На самом деле в большинстве случаев это не так; метеорологическая переменная измеряется в дискретных точках временного ряда, представляющего собой N отсчетов, равномерно распределенных с интервалом Δt, в течение определенного периода $\tau = (N-1)\Delta t$. Предполагается, что отсчеты производятся мгновенно; это предположение, строго говоря, неверно, поскольку всем измерительным устройствам требуется некоторое время для определения значения, которое они измеряют. В большинстве случаев это время невелико по сравнению с интервалом между отсчетами Δt. Даже если это не так, время отклика измерительной системы может быть учтено при анализе, хотя этот вопрос здесь не рассматривается.

Если проанализировать данные, полученные при отсчетах синусоидальной функции с интервалом времени Δt, то можно видеть, что самая высокая выделяемая частота равна $1/(2\Delta t)$ и что на самом деле любая более высокочастотная синусоида, присутствующая во временном ряде, представлена в данных как имеющая более низкую частоту. Частота $1/(2\Delta t)$ называется частотой Найквиста и обозначается здесь как ny. Частоту Найквиста иногда называют частотой сгиба. Этот термин вытекает из рассмотрения эффекта наложения частот данных. Схематически это понятие отражено на рисунке 2.2. Когда проводится спектральный анализ временного ряда, то в связи с дискретным характером данных составляющая оценки на частоте n также содержит составляющие от более высоких частот, а именно от $2\,jn_y \pm n$ (j = 1 до ∞). Один из способов наглядного представления этого состоит в том, чтобы рассматривать частотную характеристику как будто бы она сложена подобно гармошке при $n = 0$ и $n = n_y$ и т. д. с шагом n_y. Спектральная оценка на каждой частоте диапазона представляет собой сумму всех составляющих следующих за ней более высоких частот.

Практические следствия эффекта наложения частот описываются в разделе 2.4.2. Это довольно сложная проблема, которая должна учитываться при проектировании измерительных систем. Ее можно решить путем минимизации или сведения до нуля мощности сигнала на частотах выше n_y. Для достижения этого имеется несколько способов. Во-первых, система может содержать фильтр нижних частот, который ослабляет составляющие на частотах выше n_y, прежде чем сигнал переводится в цифровую форму. Единственный недостаток этого подхода заключается в том, что время и величина быстрых изменений не будут достоверно зарегистрированы или даже не будут отмечены совсем. Второй подход состоит в том, чтобы иметь достаточно малый t, так чтобы компоненты с частотами выше частоты Найквиста были бы незначительными. Это можно выполнить, так как спектры большинства метеорологических переменных очень быстро затухают на очень высоких частотах. Однако этот второй подход не всегда практически осуществим: так, при трехчасовом измерении температуры, если t составляет порядка нескольких часов, мелкомасштабные колебания порядка минут или секунд могут иметь относительно большие спектральные ординаты и приводить к сильно выраженному эффекту наложения. В таком случае предпочтителен первый метод.

2.2.2 Измерение спектра

Спектральная плотность, по крайней мере по ее оценкам на основании временных рядов, определяется как:

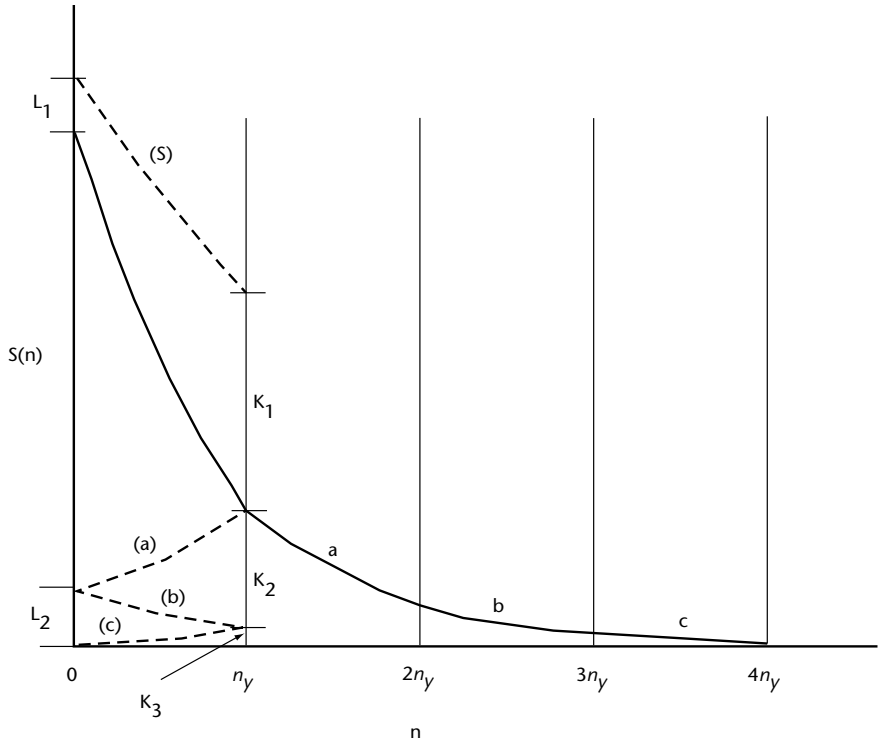


Рис.2.2. Схематическая иллюстрация сглаживания спектра , вычисленного по данным стационарных временных рядов. Спектр может быть вычислен лишь в диапазоне частот от нуля до частоты Найквиста n_Y. Истинные значения энергии в области более высоких частот показаны в секторах , обозначенных литерами a, b и c. Они заключены внутри сектора от n = 0 до n_Y, как это показано ломаными линиями (a), (b), (c). Вычисленный спектр, представленный пунктирной ломаной линией (s), включает в себя их сумму.

$$S(n_j) = (A_j^2 + B_j^2) / n_y = \alpha_j^2 / n_y \qquad (2.3)$$

Следует отметить, что в данном случае фаза не имеет значения.

Спектр изменяющейся величины может измеряться несколькими способами. В электротехнике в прошлом он часто определялся путем пропускания сигнала через полосовые фильтры и измерения выходной мощности. Затем она приводилась к мощности на центральной частоте фильтра.

Имеется несколько способов осуществления численного спектрального анализа временных рядов. Наиболее очевидным является прямое преобразование Фурье для временных рядов. В этом случае, поскольку ряды имеют ограниченную длину, будет существовать только конечное число частотных составляющих в разложении. Если имеется N членов во временном ряду, то в результате такого анализа будет $N/2$ частот. Прямые расчеты чрезвычайно трудоемки, поэтому были разработаны другие методы. Первая разработка принадлежала Blackman and Tukey (1958), которые установили связь автокорреляционной функции с оценками различных спектральных функций. (Автокорреляционная функция $r(t)$ – это коэффициент корреляции, рассчитанный между членами временного ряда, разделенными временным интервалом t). Этот метод применялся на маломощной вычислительной технике 1950-х и 1960-х годов, но в настоящее время его повсеместно вытеснило так называемое быстрое преобразование Фурье (БПФ), которое использует преимущество основных свойств цифровых вычислительных машин – значительно ускорять расчеты. Главное ограничение этого метода состоит в том, что временной ряд должен содержать 2^k членов, где k – целое число. В целом это не является серьезной проблемой, поскольку в большинстве случаев имеется достаточно данных для соответствующей организации рядов такой длины. С другой стороны, некоторые компьютерные программы БПФ могут использовать произвольное количество членов и добавлять расчетные данные для того, чтобы довести его до 2^k.

Поскольку временной ряд имеет конечную длину (N-членов), он представляет только отсчет интересующего нас сигнала. Таким образом, коэффициенты Фурье являются лишь оценочными. Для повышения надежности, как правило, осредняют несколько членов с каждой стороны конкретной частоты и присваивают это среднее значению данной частоте. Доверительный интервал оценки при этом сокращается. Согласно эмпирическому правилу, удовлетворительным количеством для практических целей является 30 степеней свободы. Поэтому, поскольку каждая оценка, проводимая с помощью преобразования Фурье, имеет две степени свободы (связанные с коэффициентами синусных и косинусных членов), как правило, осредняется около 15 членов. Отметим, что если используется подход БПФ, то лучшим числом является 16, поскольку оно равно 2^4, и в этом случае имеется точно $2(k/^2)^{-4}$ спектральных оценок; например, если во временном ряде имеется 1 024 члена, то будет 512 оценок *As* и *Bs* и 64 сглаженные оценки.

Вышеуказанные приемы анализа все более широко входят составной частью в метеорологические системы и пригодны не только для анализа данных. Точная форма спектров, встречающихся в метеорологии, может иметь разнообразные очертания. Как представляется, они могут включать составляющие от самых низких частот, отражающих изменение климата, годовые и сезонные составляющие, определяемые синоптическими явлениями с периодами в несколько дней, до суточных или полусуточных составляющих и локальных мезомасштабных явлений и вплоть до турбулентных и молекулярных флуктуации. Для большинства метеорологических применений, включая синоптический анализ, интерес представляет диапазон периодов от минут до секунд. Спектр на этих частотах, как правило, очень быстро затухает с частотой. За период менее 1 мин, спектра часто принимает значения пропорционально $n^{-5/3}$. Таким образом, часто сравнительно мал вклад частот выше 1 Гц.

Одно из важных свойств спектра состоит в том, что:

$$\sum_{j=0}^{\infty} S(n_j) = \sigma^2 \qquad (2.4)$$

где σ^2 – это дисперсия измеряемой величины.

Для анализа часто удобно выражать спектр в непрерывной форме так, чтобы уравнение (2.4) имело вид:

$$\int_0^{\infty} S(n)\, dn = \sigma^2 \qquad (2.5)$$

Из уравнений (2.4) и (2.5) можно видеть, что изменения в спектре, вызываемые, например, измерительной системой, будут влиять на значения σ^2 и, следовательно, статистические свойства выходного сигнала по отношению к входному. Это может иметь важное значение при проектировании приборов и анализе данных.

Отметим также, что левая часть уравнения (2.5) представляет собой площадь под кривой, представленной на рисунке 2.2. Эта площадь и, следовательно, дисперсия не меняется под влиянием наложения частот, если временной ряд является стационарным, т. е. если его спектр не меняется от

одного периода времени к другому.

2.2.3 Инерция измерительной системы

Датчики, а также электронные схемы, которые могут использоваться вместе с ними, составляют измерительную систему, обладающую определенным временем отклика и фильтрационными характеристиками, влияющими на результаты наблюдений.

Ни одна метеорологическая измерительная система или любая измерительная система аналогичного характера не дает абсолютно точного отображения исследуемого процесса. Как правило, не существует простых способов описания отклика системы, хотя имеются некоторые приемлемые ее аппроксимации. Наиболее просто их можно подразделить на звенья первого и второго порядка. Речь идет о порядке дифференциального уравнения, которое используется для аппроксимации характера отклика. Подробное рассмотрение описанных ниже понятий имеется во многих учебниках физики и в литературе (см. MacCready and Jex, 1964).

В системе первого порядка, такой как простой датчик или простейшая цепь фильтра нижних частот, скорость изменения значений, отмечаемых прибором, прямо пропорциональна разности между значением, регистрируемым прибором, и истинным значением переменной. Таким образом, если истинное значение в момент времени t равно $s(t)$, а значение, измеренное датчиком, равно $s_0(t)$, то система описывается дифференциальным уравнением первого порядка:

$$\frac{ds_0(t)}{dt} = \frac{s(t) - s_0(t)}{T_I} \qquad (2.6)$$

где T_I – постоянная, имеющая размерность времени, характеризующая систему. Отклик системы первого порядка на ступенчатую функцию пропорционален $\exp(-t/T_I)$, а T_I – это время, которое требуется системе для достижения 63 % установившегося показания после ступенчатого изменения.

Уравнение (2.6) справедливо для многих датчиков, например термометров.

Чашечный анемометр является прибором первого порядка, обладающим особым свойством – непостоянством T_I. Она изменяется с изменением скорости ветра. Фактически параметр s_0T_I называется путем синхронизации, так как он является почти постоянным. Как можно видеть в этом случае, уравнение (2.6) более не является простым уравнением первого порядка, поскольку теперь оно нелинейно и, следовательно, имеются серьезные трудности в его решении. Дополнительная проблема состоит в том, что TI часто зависит от того, ускоряется или замедляется вращение чашек, т. е. правая часть уравнения положительна или отрицательна. Это объясняется тем, что аэродинамический коэффициент сопротивления для чашки, обращенной к потоку вогнутостью, больше, чем обращенной выпуклостью.

Флюгер представляет собой приближенно систему второго порядка, поскольку ускорение его поворота в положение, совпадающее с истинным направлением ветра, пропорционально отклонению флюгера от этого истинного направления. Это, конечно, соответствует классическому описанию колебательного процесса (например, маятника). Флюгеры обладают естественным и конструктивным демпфированием. Это происходит по причине силы сопротивления, пропорциональной скорости изменения и действующей в противоположном ей направлении. Таким образом, дифференциальное уравнение, описывающее движение флюгера, имеет вид:

$$\frac{d^2\phi_0(t)}{dt^2} = k_1[\phi_0(t) - \phi(t)] - k_2\frac{d\phi_0(t)}{dt} \qquad (2.7)$$

где ϕ – истинное направление ветра, ϕ_0 – направление ветра по флюгеру, k_1 и k_2 – константы. Решением этого уравнения является затухающее колебание с собственной частотой колебаний флюгера (определяется константой k_1). Демпфирование, разумеется, имеет очень важное значение; оно определяется константой k_2 .Если оно слишком мало, то флюгер будет просто колебаться с собственной частотой, а если слишком велико, то флюгер не будет реагировать на изменения в направлении ветра.

Полезно рассмотреть, как эти две системы реагируют на ступенчатое изменение входного сигнала, поскольку это пример реакции приборов в реальных условиях. Для такого входного сигнала уравнения (2.6) и (2.7) можно решить аналитически. Реакция систем показана на рисунках 2.3 и 2.4. Отметим, что ни в одном из случаев системой не измеряется истинное значение элемента. Кроме того, выбор значений констант k1 и k2 может оказать большое влияние на выходной сигнал.

Важным свойством измерительной системы является ее амплитудно-частотная характеристика или передаточная функция $H(n)$. Эта функция показывает долю спектра, которая передается системой. Ее можно определить как:

$$S(n)_{out} = H(n)\, S(n)_{in} \qquad (2.8)$$

где знаки в нижнем индексе относятся к входному и выходному спектрам. Отметим, что согласно

соотношению в уравнении (2.5), дисперсия выходного сигнала зависит от $H(n)$. $H(n)$ определяет действие датчика как фильтра, о чем говорится в следующем разделе. Способы ее расчета или измерения описаны в разделе 2.3.

2.2.4 **Фильтры**

В этом разделе обсуждаются свойства фильтров с примерами их возможного влияния на данные.

Фильтрация представляет собой обработку временных рядов (либо непрерывных, либо дискретных, а именно, в виде отсчетов) таким образом, что значение, отнесенное к данному моменту времени, отягощено значениями, которые имели место в другие моменты времени. В большинстве случаев эти моменты времени будут находиться по соседству с данным моментом времени. Например, в дискретном временном ряде из N отсчетов, пронумерованных от 0 до N, со значениями $\bar{y}_i$, значение отфильтрованного наблюдения может быть определено по формуле:

$$\bar{y}_i = \sum_{j=-m}^{m} w_j \; y_{i+j} \qquad (2.9)$$

Здесь в фильтре имеется $2m + 1$ членов, пронумерованных с помощью фиктивной переменной j от $-m$ до $+m$, а $\bar{y}_i$ – расположен в центре при $j = 0$. Некоторые данные отбрасываются в начале и конце периода измерения. Величина w_j в основном известна как весовая функция и обычно:

$$\sum_{j=-m}^{m} w_j = 1 \qquad (2.10)$$

так, что по крайней мере среднее значение отфильтрованного ряда будет таким же, как до фильтрации.

В вышеприведенном примере применяется цифровая фильтрация. Аналогичных эффектов можно достигнуть, используя электронные схемы (например, с помощью резистивно-емкостной цепи) или с помощью характеристик датчика (например, как в случае описанного выше анемометра). Как цифровой, так и аналоговый фильтр характеризуется величиной $H(n)$. Если цифровой, $H(n)$ может быть рассчитана, если аналог, она может быть получена методами, описанными в разделе 2.3.

Для примера сравним систему первого порядка с временем отклика T_1 и блок узкополосных фильтров с периодом T_s на дискретном временном ряде, полученном с датчика с более быстрым откликом. Весовые функции этих двух фильтров показаны на рисунке 2.5. В первом случае прибор как бы обладает памятью, которая наиболее выражена в настоящий момент, но экспоненциально падает быстрее для более ранних данных. Блок узкополосных фильтров имеет все веса одинакового значения в течение периода T_s и равные нулю за его пределами. Амплитудно-частотные характеристики $H(n)$ для этих двух фильтров показаны на рисунке 2.6.

На этом рисунке частоты приведены в разных шкалах, с тем чтобы продемонстрировать аналогичность двух частотных характеристик. Он показывает, что прибор с временем отклика, скажем, в 10 с, оказывает приблизительно такое же влияние на входной сигнал, как блок узкополосных фильтров, действующий в течение 4 с. Однако следует отметить, что блок узкополосных фильтров, который рассчитывается численным образом, работает необычно. Он не удаляет все более высокие частоты, выходящие за частоту Найквиста, и может быть с уверенностью использован только тогда, когда спектр быстро затухает выше n_y. Отметим, что кривая для блока узкополосных фильтров, показанная на рисунке 2.6, является аналитическим решением для w как непрерывной функции; если количество отсчетов в фильтре мало, то отсечение становится менее резким, а нежелательные пики на более высоких частотах – более явными.

Практические сведения о блоках узкополосных фильтров и экспоненциальной фильтрации, а также сравнение их действия помещены в работе Acheson (1968).

На рисунке 2.7 приведена функция отклика системы второго порядка, в данном случае флюгера, которая показывает, как демпфирование действует в качестве полосового фильтра.

Можно видеть, что обработка сигналов с помощью систем способна оказать значительное влияние на выходные данные и поэтому должна производиться квалифицированно.

Одним из воздействий фильтров является их способность изменять статистические свойства данных. Этого вопроса мы касались ранее, рассматривая уравнения (2.5) и (2.8). Уравнение (2.5) показывает, как по интегралу спектра по всем частотам определяется дисперсия временного ряда, тогда как из уравнения (2.8) видно, что фильтрация, описываемая передаточной функцией, будет изменять измеряемый спектр. Отметим, что дисперсия не всегда уменьшается при фильтрации. Например, в некоторых случаях для системы второго порядка передаточная функция будет усиливать части спектра и, возможно, увеличивать дисперсию, как показано на рисунке 2.7.

Обратимся еще к одному примеру: для гауссова распределения дисперсия является полезным параметром. Если бы она уменьшалась при фильтрации, то пользователь данных недооценил бы отклонение от средних значений для явлений с заданными вероятностями или периодами временного ряда.

Конструкция цифрового фильтра также может привести к нежелательным или неожиданным эффектам. Из рисунка 2.6 можно видеть, что частотная характеристика для блока узкополосных фильтров имеет серию максимумов на частотах выше той, на которой она в первый раз достигает нуля. Это будет придавать отфильтрованным данным небольшую периодичность на этих частотах. В данном случае эффект будет минимальным, поскольку максимумы невелики. Однако некоторые конструкции фильтров могут вносить довольно значительные максимумы. При этом действует эмпирическое правило: чем меньше количество весов, тем сложнее проблема. В некоторых случаях периодичность в данных существует только потому, что они проходили фильтрацию.

Одним из вопросов, связанных с фильтрами, является длительность отсчетного ряда. Это можно проиллюстрировать, отметив, что если ряд имеет длину T, то составляющих изменчивости данных на частотах ниже $1/T$ не будет. Можно показать, что конечная длина ряда обладает свойством фильтра верхних частот. Как и фильтры нижних частот, описанные выше, фильтр верхних частот также будет оказывать воздействие на статистические характеристики выходных данных.

2.3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ

Характеристики фильтрации для датчика или электронной схемы, или системы, в которую они входят, должны быть известны, чтобы подобрать адекватные частоты отсчетов, образующих временные ряды, создаваемые данной системой. Процедура заключается в экспериментальном определении передаточной функции или амплитудно-частотной характеристики $H(n)$ в уравнении (2.8).

Передаточная функция может быть получена по крайней мере тремя способами: путем прямых измерений, посредством расчетов и с помощью оценок.

2.3.1 Прямое измерение отклика

Отклик можно измерить непосредственно по крайней мере двумя способами. При первом к датчику или фильтру применяется известное изменение, например ступенчатая функция, и измеряется его время отклика; затем можно вычислить $H(n)$. При втором способе сравниваются выходные сигналы испытываемого датчика и другого, более быстродействующего датчика. Первый способ используется более широко, чем второй.

Простым примером определения отклика датчика на известный входной сигнал является измерение пути синхронизации вращающегося чашечного или пропеллерного анемометра. В этом примере известным входным сигналом является ступенчатая функция. Анемометр помещают в поток воздуха постоянной скорости, удерживая его от вращения, а затем отпускают вращающуюся часть и регистрируют выходной сигнал. Время, которое требуется для увеличения выходного сигнала от 0 до 63 % его окончательной или, иначе, установившейся скорости в воздушном потоке, является постоянной времени (см. раздел 2.2.3).

Если имеется другой датчик, который реагирует гораздо быстрее, чем тот, чей отклик необходимо определить, то можно с достаточным приближением измерить и сравнить входной и выходной сигналы обоих датчиков. Наиболее удобным устройством для проведения такого сравнения является, по-видимому, современный двухканальный цифровой анализатор спектра. Выходной сигнал быстродействующего датчика вводится в один его канал, а выходной сигнал испытываемого датчика – в другой, и анализатор автоматически отображает передаточную функцию. Она же непосредственно характеризует датчик как фильтр. Если устройство, передаточную функцию которого необходимо определить, является электронной схемой, то сформировать известный или даже истинно случайный входной сигнал гораздо легче, чем искать более быстродействующий датчик. И в этом случае современный двухканальный цифровой анализатор спектра, вероятно, наиболее удобен, хотя могут применяться и другие электронные испытательные приборы.

2.3.2 Определение отклика расчетным путем

Это метод описан в разделе 2.2.3. Если, например, известны физические характеристики датчика/фильтра, то его отклик на разнообразные входные сигналы можно определить либо аналитически, либо численным решением. Могут быть рассчитаны как отклик на конкретные входные сигналы, например ступенчатую функцию, так и передаточная функция. Если датчик или схема линейны (т. е. описываются линейными дифференциальными уравнениями), то передаточная функция содержит полное описание амплитуды и фазы отклика как функции частоты, другими словами, как фильтра. Рассматривать

отклик как функцию частоты не всегда удобно, но поскольку передаточная функция эквивалентна преобразованию Фурье, то импульсную частотную характеристику, которая представляет отклик как функцию времени, использовать намного легче. Это иллюстрируют рисунки 2.3 и 2.4, которые интерпретируют отклик как функцию времени.

Предпочтение отдается аналитическим решениям, если они достижимы, поскольку они четко показывают зависимость от различных параметров.

2.3.3 Оценка отклика

Если известны передаточные функции преобразователя и каждой последующей схемы, то передаточной функцией всей системы является их произведение. Если, как в обычном случае, передаточные функции характеризуют фильтры нижних частот, то совокупная передаточная функция описывает фильтр нижних частот, частота среза которого меньше, чем любого из отдельных фильтров.

Если одна из отдельных частот среза гораздо меньше любой другой, то совокупная частота среза будет лишь ненамного меньше.

Частота среза фильтра нижних частот приблизительно равна обратному значению его постоянной времени, следовательно, если одно из конкретных значений существенно больше любого другого, то результирующая постоянная времени будет лишь ненамного больше.

2.4 ДИСКРЕТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

2.4.1 Методика проведения дискретных измерений

На рисунке 2.8 схематически показан типовой датчик и отражена последовательность проведения дискретных измерений. Под воздействием атмосферных условий некоторые характеристики преобразователя изменяются вместе с атмосферной переменной, такой как температура, давление, скорость и направление ветра, и происходит превращение этой переменной в полезный, как правило, электрический сигнал. Схемы формирования сигнала обычно выполняют такие функции, как преобразование выходного сигнала преобразователя в напряжение, усиление, линеаризация, компенсация и сглаживание. Фильтр нижних частот выполняет окончательное преобразование выходного сигнала датчика во входной сигнал схемы установки частоты отсчетов. Эта схема и аналого-цифровой преобразователь выполняют отсчеты, которые поступают в процессор обработки наблюдений.

Следует отметить, что сглаживание, осуществляемое по техническим причинам, на этапе формирования сигнала имеет целью исключить пики и стабилизировать электронные характеристики и выполняется с помощью фильтра нижних частот; это уменьшает время отклика датчика и подавляет высокие частоты, которые могут представлять

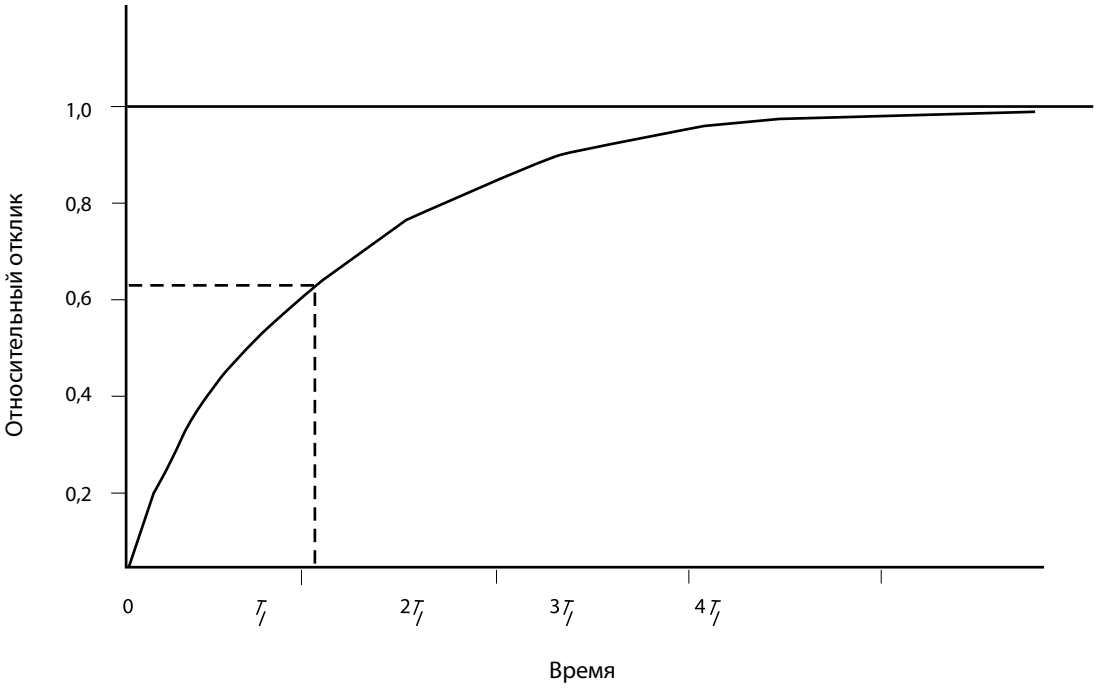


Рис.2.3. Отклик системы первого порядка на ступенчатую функцию. К моменту времени T_I в системе достигается 63 % от конечного значения воздействующей величины

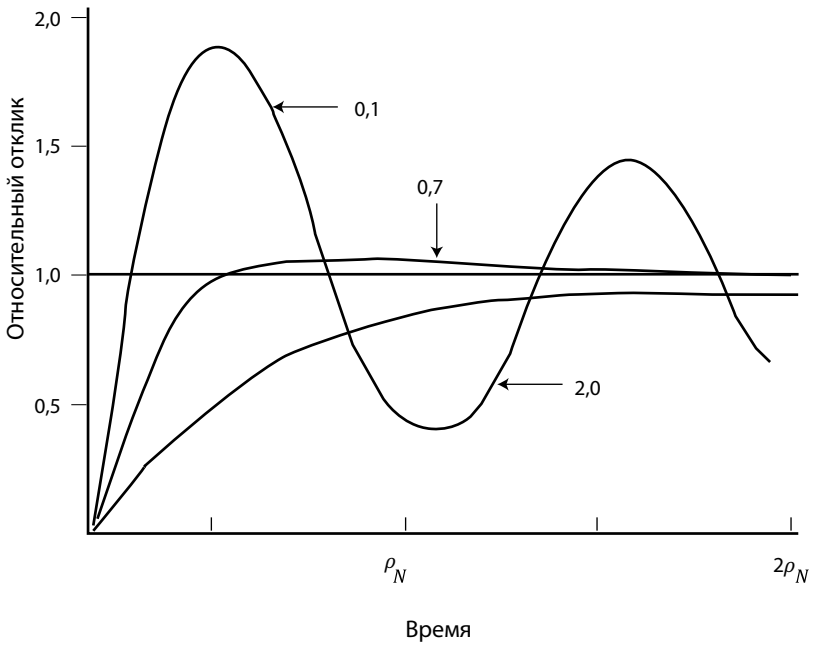


Рис. 2.4. Отклик системы второго порядка на ступенчатую функцию. ρ_N – это естественный период, связанный с k_1 в уравнении 2.7, который для флюгера зависит от скорости ветра. Кривые представлены для коэффициентов демпфирования со значениями 0,1 (очень слабое демпфирование), 0,7 (критическое демпфирование, оптимальное для большинства приложений), и 2,0 (сильное демпфирование). Коэффициент демпфирования относится к k_2 в уравнении 2.7

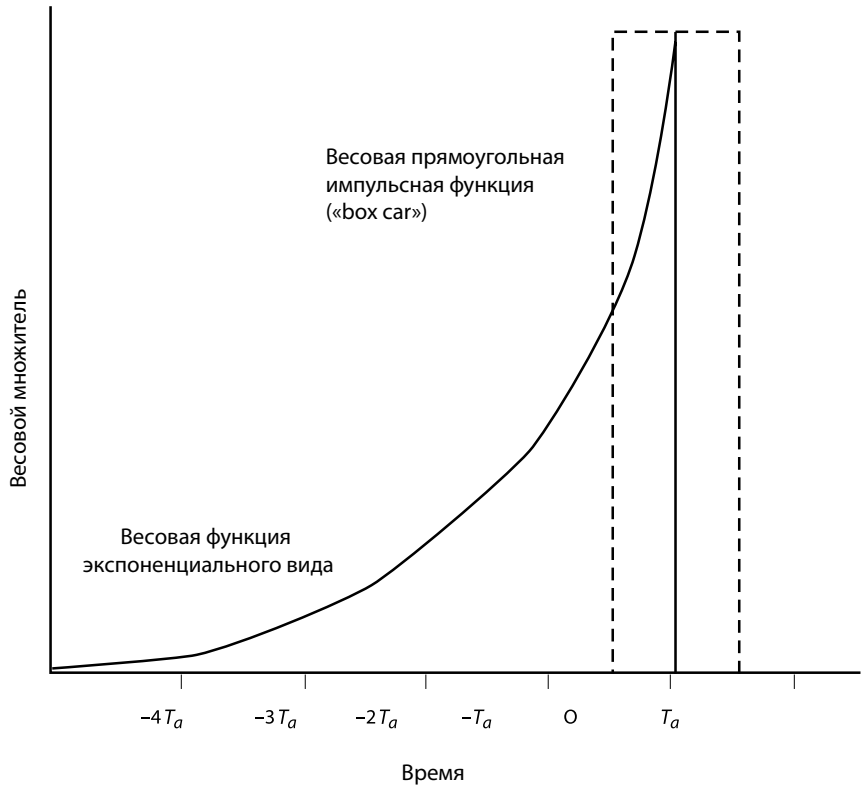


Рис. 2.5. Весовые множители для весовой функции первого порядка (экспоненциальной) и весовой прямоугольной импульсной функции («box car»)[1]. Для «box car» T_a – это T_s, т.е. время выборки, и w=1/N. Для функции первого порядка T_a – это T_I, т.е. постоянная времени фильтра, и $w = (1/T_i)\exp(-t/T_i)$.

1 Весовая функция экспоненциального вида

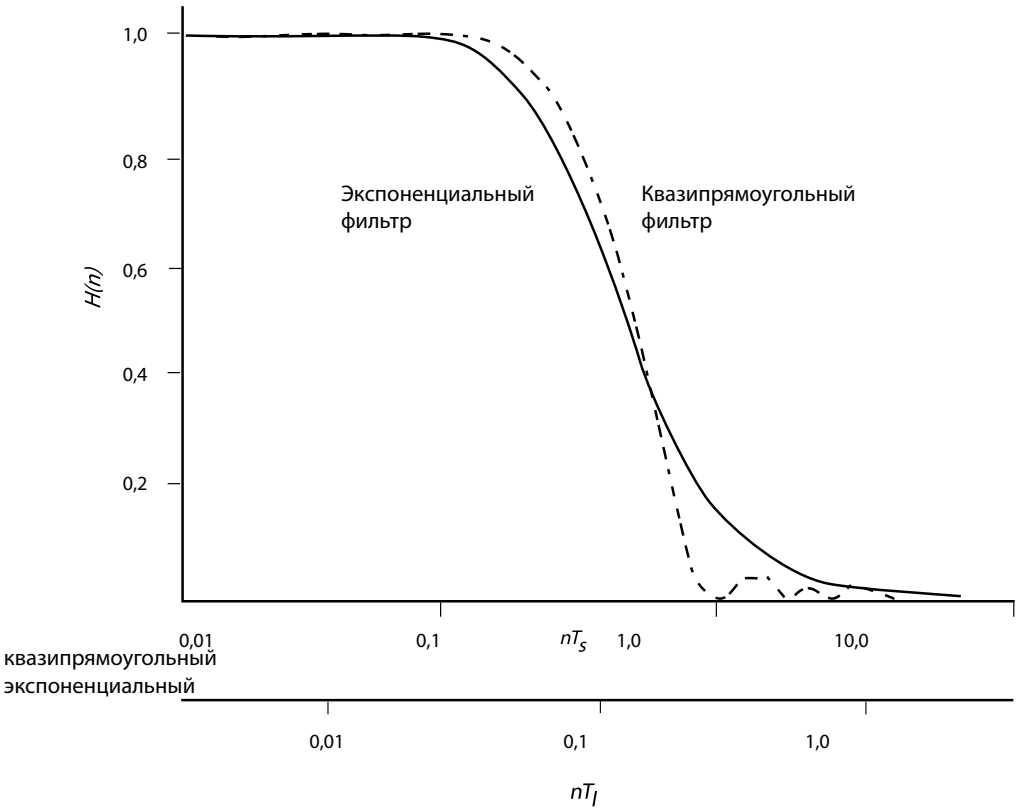


Рис. 2.6.Частотные функции отклика $H(n)$ для весовой функции первого порядка (экспоненциальной) и весовой функции типа «box car». Частота нормирована относительно постоянной времени T_I для фильтра первого порядка и относительно времени выборки T_S для фильтра типа ««box car».

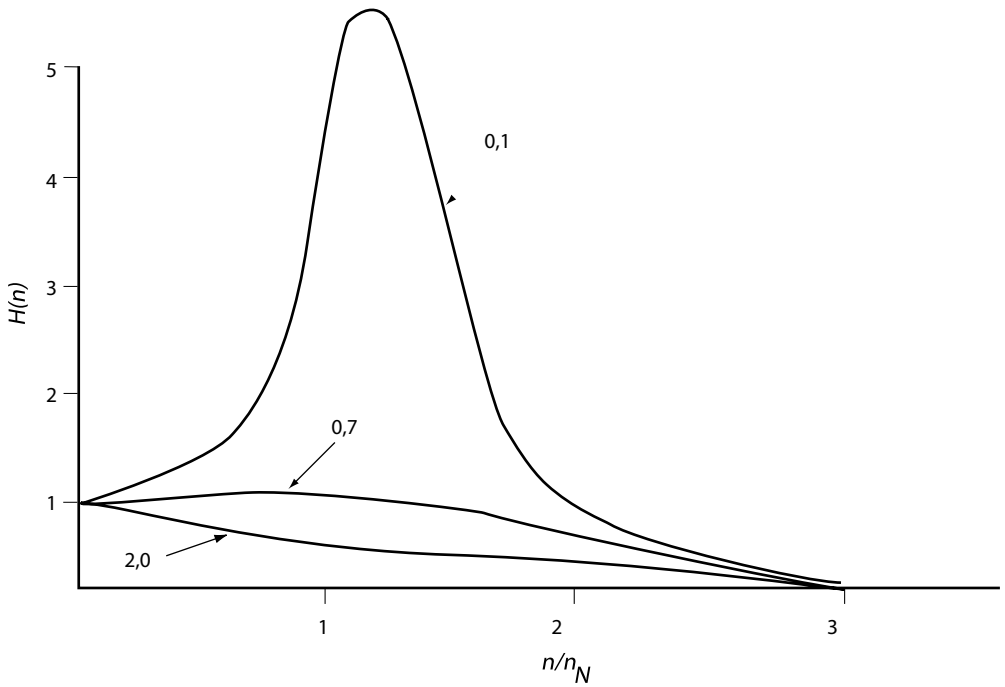


Рис. 2.7. Частотные функции отклика $H(n)$ для системы второго порядка, такой как флюгер. Частота нормирована относительно естественной частоты n_N, которая зависит от скорости ветра. Кривые построены для коэффициента демпфирования со значениями 0,1 (малодемпфированная), 0,7 (критическое демфирование, оптимальное для большинства приложений) и 2,0 (сильное демпфирование).

интерес. Разработчик, и пользователь должны хорошо представлять его действие, и частоту среза необходимо установить настолько высокой, насколько это практически осуществимо.

Так называемые «интеллектуальные датчики», т. е. датчики с микропроцессорами, могут объединять в себе перечисленные функции. Схемы формирования сигнала могут входить не во все датчики или могут быть объединены с другими схемами. В ряде случаев, например с чашечными или пропеллерными анемометрами, проще будет говорить только о датчике, поскольку его трудно отделить от преобразователя. В некоторых случаях, когда частота выходного сигнала преобразователя или датчика изменяется в зависимости от измеряемой атмосферной переменной, схема установки частоты отсчетов и аналого-цифровой преобразователь могут быть заменены счетчиком. Но эти детали не так важны. Важной задачей конструкции является обеспечение того, чтобы последовательность отсчетов адекватно передавала значительные изменения измеряемой атмосферной переменной.

Первое условие, предъявляемое к устройству, схематично представленному на рисунке 2.8, состоит в том, что датчик должен достаточно быстро реагировать на атмосферные изменения, которые необходимо отметить при наблюдении. Если наблюдение должно подвергаться 1-, 2- или 10-минутному осреднению, то это требование не является слишком жестким. С другой стороны, если наблюдение должно характеризовать турбулентность, например максимальный порыв ветра, то датчик нужно выбирать с большой тщательностью.

Второе условие, предъявляемое к устройству (см. рисунок 2.8), заключается в том, что схема установки частоты отсчетов и аналого-цифровой преобразователь должны предоставлять достаточно отсчетов для получения достоверного наблюдения. Точность, предъявляемая к метеорологическим наблюдениям, обычно должна обеспечиваться датчиком, а не электронной измерительной аппаратурой. Однако датчик и частоту отсчетов необходимо согласовывать во избежание наложения частот. Если интенсивность выполнения отсчетов ограничена по техническим причинам, то система датчик/фильтр должна быть сконструирована так, чтобы подавлять частоты, которые не могут быть представлены.

Если датчик имеет соответствующую частотную характеристику, то фильтр нижних частот можно отключить, включая его только для страховки, или он может быть подключен для улучшения качества входного сигнала схемы установки частоты отсчетов. Например, такой фильтр можно включить на конце длинного кабеля для подавления всплесков шума или для дальнейшего сглаживания выходного сигнала датчика. Ясно, что эта схема должна также довольно быстро реагировать для отслеживания атмосферных изменений, представляющих интерес.

2.4.2 Частота отсчетов при дискретных измерениях

Для большинства метеорологических и климатологических применений требуются наблюдения с интервалами от 30 минут до 24 часов, и каждое наблюдение проводится на протяжении от 1 до 10 минут. Приложение 1.B к главе 1 части I содержит недавно принятое заявление о требованиях для этих целей.

Повсеместная практика регулярных наблюдений состоит в том, чтобы произвести один отдельный отсчет по датчику (например, термометру) и исходя

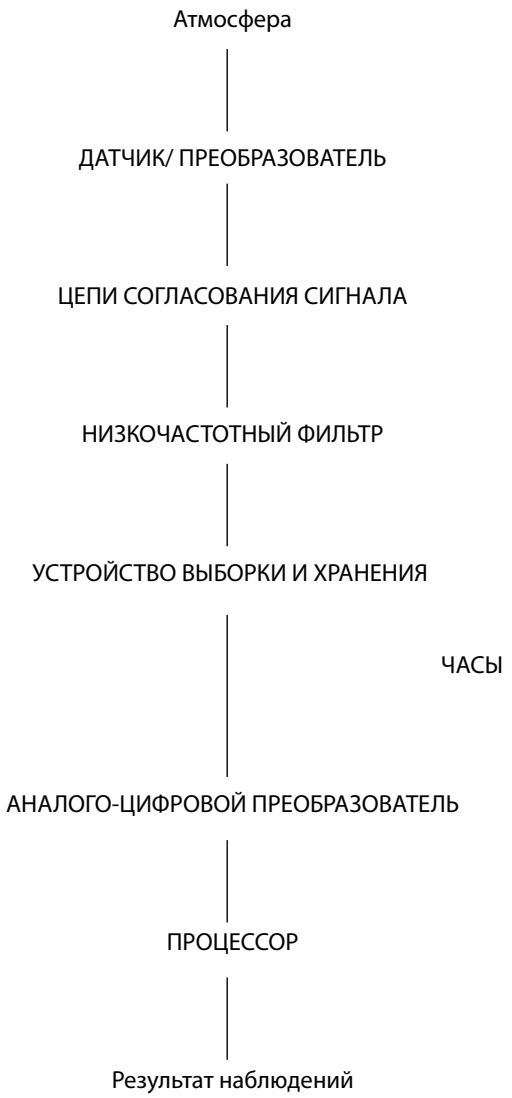


Рис.2.8. Измерительная система

из его постоянной времени обеспечить приблизительно правильное время измерений. Это равносильно использованию экспоненциального фильтра (рисунок 2.6). Автоматические метеорологические станции, как правило, используют более быстродействующие датчики, и для получения среднего (блок узкополосных фильтров) или другого средневзвешенного значения выполняются и обрабатываются несколько отдельных отсчетов.

Практически рекомендованная схема определения частоты отсчетов при дискретных измерениях заключается в следующем:[1]

(a) Отсчеты, которые производятся для расчета средних значений, следует выполнять через равные временные интервалы, которые:
   (i) не превышают постоянную времени датчика; или
   (ii) не превышают постоянную времени аналогового фильтра нижних частот, подключенного к линейному выходу быстродействующего датчика; или
   (iii) являются достаточными по количеству, чтобы погрешность осреднения отсчетов снизилась до приемлемого уровня, например меньшего, чем требуемая точность осреднения;

(b) Отсчеты, используемые для оценки экстремальных значений флуктуации, таких как порывы ветра, следует производить с частотой, по меньшей мере в четыре раза превышающей указанную в пунктах (i) и (ii).

Для получения средних значений часто предлагается и используется на практике частота отсчетов при дискретных измерениях выше, чем в пунктах i и ii, например, два отсчета за интервал, равный постоянной времени.

Критерии (i) и (ii) и получены, исходя из частоты Найквиста. Если интервал между отсчетами $t \leq T_I$, то частота отсчетов $n \geq 1/T_I$ и $nT_I \geq 1$. На экспоненциальной кривой на рисунке 2.6 видно, что это исключает более высокие частоты и предотвращает наложение частот. Если $t = T_I$, $n_y = 1/2T_I$ и данные будут псевдонимом только спектральной энергии на частотах в $nT_I = 2$ и за его пределами, то есть где колебания имеют периоды менее $0{,}5T_I$.

Критерии (i) и (ii) и используются для проведения автоматических дискретных измерений. Статистический критерий в iii больше применим для более низкой частоты отсчетов при проведении наблюдений вручную. Погрешность среднего значения обратно пропорциональна квадратному корню из количества наблюдений и может быть определена по статистическим характеристикам переменной.

Критерий (b) подчеркивает необходимость в высоких частотах отсчетов или, говоря более точно, малых постоянных времени для измерения порывов ветра. Зарегистрированные порывы ветра сглаживаются благодаря инерционности прибора, и регистрируемый максимум будет осредняться за период, в несколько раз больший, чем постоянная времени.

Влияние наложения частот на оценки средних значений можно очень просто показать: рассмотрим, что произойдет, когда частота измеряемого колебания совпадет с частотой отсчетов или будет кратна ей. Полученное среднее значение будет зависеть от интервала отсчетов. Отсчет, получаемый один раз в день в установленное время, не предоставляет достоверной оценки средней месячной температуры.

Для несколько более сложной иллюстрации наложения частот рассмотрим временной ряд из трехчасовых наблюдений температуры, произведенных стандартным термометром. Если температура, как обычно, изменяется плавно с течением времени, то среднее суточное значение, рассчитанное по восьми отсчетам, является практически стабильным. Однако если имело место мезомасштабное явление (гроза), при котором температура падала на целые градусы за 30 минут, то рассчитанное среднее значение ошибочно. Надежность среднесуточные зависит от обычной слабости спектра в мезомасштабных и более высоких частотах. Однако прохождение высокочастотного явления (гроза) приводит к наложению частот данных, что сказывается на расчете средних значений, средних квадратических отклонений и других показателях рассеяния, а также спектра.

Вопрос частоты отсчетов можно также обсудить с точки зрения рисунка 2.8. Рассуждение в разделе 2.2.1 сводилось к тому, что для измерения спектра частота отсчетов, которая определяет частоту Найквиста, должна выбираться так, чтобы вклад спектра колебаний на частотах выше частоты Найквиста оказался бы слишком слабым, чтобы ощутимо повлиять на рассчитываемый спектр. Это достигается установкой частоты отсчетов измерений на часах (см. рисунок 2.8), по крайней мере в два раза превышающей наибольшую частоту значимой амплитуды входного сигнала схемы установки частоты отсчетов.

Формулировка «наибольшая частота значимой амплитуды», используемая выше, довольно расплывчата. Найти более точное определение сложно, поскольку сигналы никогда строго не ограничиваются шириной

[1] Принята Комиссией по приборам и методам наблюдений на ее десятой сессии (1989 г.) в виде рекомендации 3 (КПМН-X).

полосы. Однако нетрудно обеспечить, чтобы амплитуда изменений сигнала быстро уменьшалась с увеличением частоты и чтобы средняя квадратическая амплитуда флуктуации с частотой, превышающей данную частоту, была бы мала по сравнению либо с шумом квантования аналого-цифрового преобразователя, либо с приемлемой ошибкой или уровнем шума в отсчетах, или вносила бы незначительный вклад в общую ошибку или шум в наблюдении.

Раздел 2.3 содержит описание характеристик датчиков и схем, которые можно выбрать либо отрегулировать так, чтобы амплитуда флуктуации сигнала быстро уменьшалась с увеличением частоты. Большинство преобразователей из-за их неспособности реагировать на быстрые (высокочастотные) атмосферные изменения, но способности достоверно отражать медленные (низкочастотные) изменения являются фильтрами низких частот. По определению, фильтры низких частот ограничивают полосу пропускания и, согласно теореме Найквиста, также ограничивают частоту отсчетов, что необходимо для правильного воспроизведения выходного сигнала фильтра. Например, если в атмосфере происходят реальные изменения с периодом ниже 100 мс, то частота отсчетов, по Найквисту, будет составлять 1 отсчет за 50 мс, что технически обеспечить довольно сложно. Однако если они наблюдаются с помощью датчика и фильтра, которые реагируют гораздо медленнее, например с постоянной времени 10 с, то частота отсчетов, по Найквисту, будет составлять 1 отсчет за 5 с, что гораздо легче, дешевле и предпочтительнее, если не требуются измерения высоких частот.

2.4.3 Частота отсчетов при измерениях и контроль качества

Многие методы контроля качества данных для их эффективного использования на автоматических метеорологических станциях зависят от временного постоянства или устойчивости данных. В качестве очень простого примера следует рассмотреть два гипотетических алгоритма контроля качества для измерений давления на автоматических метеорологических станциях. Отсчеты производятся каждые 10 с и одноминутные средние рассчитываются каждую минуту. Предполагается, что атмосферное давление лишь в очень редких случаях меняется со скоростью, превышающей 1 гПа в минуту.

Первый алгоритм исключает среднее значение, если оно отличается от предыдущего более чем на 1 гПа. Это не позволяет качественно использовать имеющиеся данные, так как единичный отсчет с ошибкой, достигающей 6 гПа, остается незамеченным, и в наблюдение вводится ошибка, составляющая 1 гПа.

Второй алгоритм исключает отсчет, если он отличается от предыдущего более чем на 1 гПа. В этом случае среднее значение не содержит ошибки, превышающей около 0,16 (1/6) гПа. Действительно, если предположение о том, что атмосферное давление очень редко меняется со скоростью, превышающей 1 гПа в минуту, верно, то можно ужесточить критерий принятия/исключения соседних отсчетов до 0,16 гПа и еще больше сократить ошибку среднего значения.

Смысл этого примера состоит в том, что эффективность процедур контроля качества данных, которые зависят от временного постоянства (корреляции), наиболее высока в отношении данных высокого временного разрешения (частоты отсчетов). На высокочастотном конце спектра выходного сигнала датчика/фильтра корреляция между соседними отсчетами увеличивается с увеличением частоты отсчетов до достижения частоты Найквиста, после которой никакого дальнейшего увеличения корреляции не происходит.

В нашем предыдущем описании нигде не говорится о том, чтобы не использовать датчик/фильтр с постоянной времени, достигающей периода осреднения, требуемого для наблюдения, и использования единичного отсчета в качестве наблюдения. Хотя это составляет минимальное требование в отношении цифровых подсистем, тем не менее существует еще одно соображение, которое необходимо учитывать для эффективного контроля качества данных. Наблюдения можно разделить на следующие три категории:

(a) точные (наблюдения с погрешностями, меньшими или равными определенному значению);
(b) неточные (наблюдения с погрешностями, превышающими определенное значение);
(c) отсутствующие.

Существует две причины для контроля качества данных, а именно: свести к минимуму количество неточных наблюдений и свести к минимуму количество отсутствующих наблюдений. Для обеих целей необходимо обеспечить, чтобы результат каждого наблюдения рассчитывался на основании разумно большого количества отсчетов, прошедших контроль качества. Таким образом, отсчеты, содержащие крупные случайные ошибки, можно изолировать и исключить, и далее производить расчет, результат которого не будет иметь погрешностей, вносимых этими отсчетами.

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Acheson, D.T., 1968: An approximation to arithmetic averaging for meteorological variables. *Journal of Applied Meteorology*, Volume 7, pp. 548 – 553.

Bendat, J.S. and A.G. Piersol, 1986: *Random Data: Analysis and Measurement Procedures*. Second edition, John Wiley and Sons, New York.

Blackman, R.B. and J.W. Tukey, 1958: *The Measurement of Power Spectra*. Dover Publications, New York.

Jenkins, G.M. and D.G. Watts, 1968: *Spectral Analysis and its Applications*. Holden-Day, San Francisco.

Kulhánek, O., 1976: *Introduction to Digital Filtering in Geophysics*. Elsevier, Amsterdam.

MacCready, P.B. and H.R. Jex, 1964: Response characteristics and meteorlogical utilization of propeller and vane wind sensors. *Journal of Applied Meteorology*, Volume 3, Issue 2, pp. 182 – 193.

Otnes, R.K. and L. Enochson, 1978: *Applied Time Series Analysis*. Volume 1: Basic techniques. John Wiley and Sons, New York.

Pasquill, F. and F.B. Smith, 1983: *Atmospheric Diffusion.* Third edition. Ellis Horwood, Chichester.

Stearns, S.D. and D.R. Hush, 1990: *Digital Signal Analysis.* Second edition. Prentice Hall, New Jersey.

ГЛАВА 3

ОБРАБОТКА ДАННЫХ

3.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В данной главе в общем виде рассматриваются процедуры для обработки и/или преобразования данных, получаемых непосредственно с помощью приборов, в данные, используемые потребителями метеорологической информации, особенно для обмена между странами. Официальные правила для обработки данных, которые подлежат международному обмену, рекомендуются ВМО; они изложены в ВМО (2003). В главе 1 части I настоящего Руководства содержится несколько соответствующих рекомендаций и определений.

3.1.1 Определения

При обсуждении использования контрольно-измерительных приборов, связанных с измерением атмосферных величин, стало полезным классифицировать данные наблюдений в соответствии с уровнями данных. Эта схема была введена в связи с системой обработки данных для Программы исследований глобальных атмосферных процессов и также определена в ВМО (1992; 2003).

Данные уровня I – это, как правило, показания приборов, выраженные в соответствующих физических единицах и привязанные к географическим координатам. Их необходимо перевести в обычные метеорологические величины(определяемые в главе 1 части I). Во многих случаях собственно данные уровня I получают путем обработки электрических сигналов, таких как значения напряжения, передаваемых в качестве необработанных данных. Примерами таких данных служат спутниковые данные излучений и давления водяного пара.

К данным, признанным метеорологическими величинами, относятся данные уровня II. Их можно получить непосредственно с помощью приборов (как в случае со многими видами простых приборов) или же рассчитать по данным уровня I. Так, например, датчик не может измерить видимость, которая представляет величину уровня II; вместо этого датчики измеряют коэффициент ослабления, который является величиной, относящейся к уровню I.

К данным уровня III относятся данные, содержащиеся в комплектах внутренне согласующихся данных, обычно в форме узловых точек сетки. Они не рассматриваются в настоящем Руководстве.

Данные, которыми обмениваются на международном уровне, – это данные уровня II или уровня III.

3.1.2 Требования к метеорологическим данным

Станции наблюдений во всем мире обычно осуществляют регулярные наблюдения в стандартных форматах, пригодных для обмена высококачественной информацией, получаемой с помощью единых методов наблюдений, несмотря на различие типов приборов, используемых во всем мире или даже в отдельных государствах. Для достижения такого положения в течение многих лет затрачивались значительные ресурсы на стандартизацию содержания данных, их качества и формата представления. По мере того как автоматизированные наблюдения за атмосферой становятся все более преобладающими, сохранение этой стандартизации и разработка дополнительных стандартов для перевода необработанных данных в данные уровня I, а также необработанных данных и данных уровня I в данные уровня II приобретают все более важное значение.

3.1.3 Процесс обработки данных

Задача датчика состоит в измерении атмосферной величины и переводе ее в количественном виде в полезный сигнал. Однако датчики могут обладать дополнительными реакциями на окружающую среду, как, например, температурная зависимость калибровочных характеристик, и их выходные сигналы подвержены различного рода ошибкам, таким как систематическое отклонение и шум. После надлежащей выборки данных с помощью системы приема данных выходной сигнал следует масштабировать и линеаризовать в соответствии с общей калибровкой системы и затем отфильтровать или осреднить. На этом этапе, или даже раньше, он переходит в категорию необработанных данных. Затем данные следует перевести в значения измерений физических величин, регистрируемые датчиком, которые соответствуют данным уровня I или же уровня II, если дальнейшие преобразования не требуются. Для некоторых применений необходимо получать дополнительные параметры. На различных этапах в процессе обработки данные могут быть скорректированы с учетом внешних воздействий, таких как экспозиция, и подвергаться контролю качества.

Поэтому данные от сетевых и автоматических метеорологических станций (АМС) следует подвергать многим операциям, прежде чем они станут пригодными для использования. Весь этот процесс известен как обработка данных и состоит из осуществления ряда операций, включая некоторые или все из нижеперечисленных:

(a) преобразование атмосферных величин;
(b) формирование выходных сигналов датчика;
(c) получение и выборка данных;
(d) применение информации о калибровке;
(e) линеаризация выходных сигналов датчика;
(f) определение статистических характеристик, таких как среднее значение;
(g) получение соответствующих переменных;
(h) введение поправок;
(i) проверка качества данных;
(j) регистрация и хранение данных;
(k) составление метаданных;
(l) форматирование сообщений;
(m) проверка содержания сообщений;
(n) передача сообщений.

Порядок, в котором осуществляются эти операции, является лишь приблизительно последовательным. Разумеется, первые и последние из вышеперечисленных операций всегда должны выполняться первыми и последними. Линеаризация может осуществляться непосредственно или внутри датчика, однако она должна предшествовать определению среднего значения. На различных уровнях процесса предварительной обработки данных может проводиться специальный контроль качества и введение поправок. В зависимости от назначения станции могут работать в упрощенном режиме без осуществления всех этих операций.

В контексте настоящего Руководства важные операции в процессе обработки данных состоят в выборе надлежащих процедур измерений, применении информации о калибровке, линеаризации, когда она требуется, фильтрации и/или осреднении, в расчете соответствующих величин, введении поправок, контроле качества и в составлении метаданных. Все эти вопросы рассматриваются в данной главе. Более подробная информация по менеджменту качества приводится в главе 1 части III, а в отношении методов измерения, фильтрации и осреднения – в главе 2 части III.

После того, как данные обработаны, их необходимо предоставлять посредством кодирования, передачи и приема, отображения и архивации, что является темами других наставлений и руководств ВМО. Система наблюдений является неполной, если она не соединена с другими системами, которые обеспечивают доставку данных потребителям. Качество данных определяется как наиболее слабое звено. На каждой стадии необходимо применять контроль качества.

Большинство существующих методов и стандартизированных методик обработки данных наблюдателем могут также использоваться АМС, которые, однако, требуют особых подходов. В АМС входят различные датчики, стандартные расчеты для получения элементов сообщений и сам формат сообщения. Не все датчики легко совмещаются с автоматизированным оборудованием. Аналитические выражения для расчетов, представленным в виде таблиц, необходимо восстанавливать или создавать. Правила для кодирования сообщений должны быть выражены на языках компьютера с уровнями точности, завершенности и ясности, не требующимися в указаниях на обычном языке, подготавливаемых для наблюдателей. Более того, некоторые обязанности наблюдателя, такие как определение типов облаков, в настоящее время не могут быть автоматизированы с использованием существующих методик или. и модификаций.

Вопросы получения данных и программного обеспечения обработки данных для АМС довольно подробно рассмотрены в главе 1 части II в виде, достаточно общем для любых применений электрических преобразований в метеорологии. Некоторые общие рассуждения и конкретные примеры построения алгоритмов для синоптических АМС приведены в ВМО (1987).

При обработке метеорологических данных обычно осуществляется одна корректная процедура, алгоритм или подход, при этом может быть много аппроксимаций, от удовлетворительных до малопригодных по своей эффективности. Опыт убедительно показывает, что подобный подход обычно наиболее эффективен в перспективном плане. Он является непосредственным, требует минимального уровня квалификации и, будучи однажды применен, не нуждается в дальнейшем обслуживании. Поэтому последующие параграфы в основном ограничены одним корректным приближением к рассматриваемой проблеме при наличии существующих точных решений.

3.2 ДИСКРЕТИЗАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

Полное рассмотрение вопроса дискретизации измерений см. в главе 2 части III. Ниже следует краткое изложение основных выводов.

Необходимо признать, что из-за постоянно существующей турбулентности атмосферные величины быстро и неоднородно изменяются, и выходные сигналы датчика не в полной мере воспроизводят значения атмосферных величин вследствие их

несовершенных динамических характеристик, таких как ограниченная способность реагировать на быстрые изменения. Как правило, для датчиков требуется оборудование, чтобы увеличить или сохранить их выходные сигналы и/или перевести одну форму сигнала в другую, например, сопротивление в напряжение. Используемые для этого схемы могут также сглаживать процесс или отфильтровывать низкие частоты сигнала. Имеется предельная частота, выше которой не происходит значительных изменений, поскольку таких изменений не существует в атмосфере и/или датчик или схема улучшения сигнала удаляют их.

Важным конструктивным соображением является вопрос о том, как часто следует измерять выходные сигналы датчика. Определенный ответ состоит в следующем: с равномерной скоростью, по меньшей мере, в два раза чаще, чем предельная частота выходного сигнала датчика. Однако обычно удовлетворяется более простое и равнозначное правило: интервалы измерения не должны превышать наибольших постоянных времени всех приборов и схем, предшествующих системе получения данных. Если частота измерения меньше удвоенной предельной частоты, то непременно возникают ошибки в данных и во всех производных величинах и статистических характеристиках. Несмотря на то, что такие увеличения интервалов измерений могут быть приемлемы в отдельных случаях, в других они не допустимы. Надлежащие измерения всегда обеспечивают минимальную дисперсию.

Для надежной конструкции может потребоваться включение низкочастотного фильтра с постоянной времени, примерно равной интервалу измерения в системе получения данных. Это также является профилактической мерой, чтобы свести к минимуму влияние шума, особенно помехи в 50 или 60 Гц от источников питания по кабелям, соединяющим датчики с процессорами, и за счет утечки через источники питания.

3.3 ПРИМЕНЕНИЕ КАЛИБРОВКИ

Правилами ВМО (ВМО, 2003) предписывается, чтобы станции были оборудованы надлежащим образом откалиброванными приборами и чтобы неукоснительно соблюдались адекватные методы наблюдений и измерений для обеспечения точности измерений, достаточной для удовлетворения требований метеорологических дисциплин. Преобразование необработанных данных, получаемых с помощью приборов, в соответствующие метеорологические параметры достигается посредством применения операций калибровки. Надлежащее использование процедур калибровки и любых других систематических поправок является наиболее важным моментом для получения данных, удовлетворяющих заданным требованиям точности.

Определение операций калибровки должно основываться на калибровке всех компонентов цепи измерений. В принципе, на практике для некоторых метеорологических величин, таких как давление, калибровка полевых приборов должна быть выполнена посредством сравнения с международным эталонным прибором с помощью непрерывной цепи сравнений между полевым прибором и несколькими или всеми из серий эталонных приборов, таких как переносной эталон, рабочий эталон, вторичный эталон и национальный эталон (см. главу 1 части I для определений).

В каждой из соответствующих глав части I содержится описание процедур калибровки и систематических поправок, касающихся каждой из основных метеорологических переменных.

Полевые приборы должны быть откалиброваны экспертом с учетом соответствующих изменений в операциях калибровки. Недостаточно полагаться на данные калибровки, предоставляемые вместе с оборудованием. Оборудование для калибровки поставщика часто содержит неизвестную зависимость по отношению к национальному эталону и в любом случае следует ожидать изменения калибровки во время транспортировки, хранения и использования приборов. Изменения в калибровке должны отражаться в файлах метаданных станции.

3.4 ЛИНЕАРИЗАЦИЯ

Если выходные сигналы датчика не строго пропорциональны измеряемой величине, следует линеаризовать сигнал с использованием калибровки прибора. Это необходимо осуществить перед фильтрованием или осреднением сигнала. Последовательность операций «осреднять, затем линеаризовать» приводит к результатам, отличающимся от результатов последовательности «линеаризовать, затем осреднять», когда сигнал не является постоянным в течение периода осреднения.

Нелинейность может возникать следующими тремя путями (ВМО, 1987):

(a) многие датчики изначально нелинейны, т. е. их выходной сигнал не пропорционален измеряемой атмосферной величине. Простым примером является термистор;

(b) несмотря на то, что в датчик можно включить линейные преобразователи, измеряемые переменные могут не быть линейно связаны с интересующей атмосферной переменной. Так, например, фотодетектор и преобразователь угла передачи облакомера с вращающимся лучом являются линейными устройствами, однако выходной сигнал облакомера (интенсивность обратно рассеянного света как функция угла) нелинейно связан с высотой облаков;

(c) преобразование данных из уровня I в уровень II может не быть линейным. Например, коэффициент ослабления, а не видимость или коэффициент пропускания, является подходящей переменной для осреднения, чтобы получить значения осредненной видимости.

В первом из этих случаев часто используется полиномиальная функция калибровки. Тогда весьма желательно иметь стандартные датчики с едиными коэффициентами калибровки, чтобы избежать проблем, возникающих при смене датчиков в поле. В двух других случаях обычно подходящей является аналитическая функция, которая описывает режим работы работу датчика.

3.5 ОСРЕДНЕНИЕ

Естественная мелкомасштабная изменчивость атмосферы вызывает необходимость проведения сглаживания или осреднения в целях получения репрезентативных наблюдений и обеспечения совместимости данных от различных приборов. Для международного обмена и многих оперативных применений требуется, чтобы передаваемое измерение должно быть репрезентативным за предыдущие 2 или 10 минут для ветра и, в основном, от 1 до 10 минут для других величин. Практика использования одноминутных измерений возникает, в частности, в результате того, что некоторые обычные метеорологические датчики имеют постоянную времени порядка 1 минуты и одно показание теоретически является одноминутным средним или сглаженным значением. Если постоянная времени прибора значительно меньше, то необходимо делать отсчеты и фильтровать или осреднять их. Это – тема главы 2 части III. Для получения представления о требованиях к периодам осреднения, типичным для оперативных метеорологических измерительных систем, см. главу 1 части I (приложение 1.B).

Обычно используются два типа осреднения или сглаживания: арифметический и экспоненциальный. Арифметическое осреднение соответствует осреднению в обычном смысле и легко выполняется расчетным путем; это блок узкополосных фильтров, описанный в главе 2 части III. Экспоненциальное осреднение – это выходной сигнал элементарного низкочастотного фильтра, представляющий простейшую реакцию датчика на атмосферные изменения, и его более удобно осуществить в аналоговой схеме, чем арифметическое осреднение. В случаях, когда постоянная времени простого фильтра приблизительно равна половине времени измерения, по которому рассчитывается среднее, значения арифметического и экспоненциального сглаживания практически близки (см. главу 2 части III, а также работу Acheson, 1968).

Выходные сигналы быстродействующих датчиков быстро изменяются, что приводит к необходимости более высокой частоты дискретных измерений для оптимального (минимум неопределенности) осреднения. Для уменьшения требуемой частоты дискретных измерений и для обеспечения в этом случае оптимального цифрового осреднения можно линеаризовать выходной сигнал датчика (когда это необходимо), экспоненциально сгладить его с использованием аналоговой схемы с постоянной времени t_c, а затем произвести отсчеты в цифровом виде с интервалами t_c.

Для специальных применений используется много других видов сложных фильтров с цифровым выходом.

Осреднение нелинейных величин создает определенные трудности в тех случаях, когда они изменяются в течение периода осреднения, поэтому важно выбирать соответствующую линейную переменную для расчета среднего значения. В таблице, представленной ниже, перечислены некоторые конкретные примеры элементов синоптического наблюдения, регистрируемых в качестве средних, с соответствующей линейной переменной, которую следует использовать.

3.6 ВЗАИМОСВЯЗАННЫЕ ВЕЛИЧИНЫ И СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

В зависимости от целей наблюдения, кроме осредненных данных, должны определяться также экстремальные и другие переменные, которые репрезентативны для конкретных периодов времени. Примером являются измерения порыва ветра, для которых требуется более высокая частота отсчетов.

По осредненным данным следует также определять другие величины, такие как среднее давление на уровне моря, видимость и точка росы. На

обычных обслуживаемых персоналом станциях используют таблицы перевода. В соответствии с обычной практикой принято встраивать таблицы в АМС и предусматривать процедуры интерполяции или включать основные формулы или их аппроксимации. В отношении применения преобразования данных см. различные главы части I, а также главу 1 части II по применению АМС.

Величины, для которых необходимо преобразовывать данные при расчете средних значений

Регистрируемая величина	*Осредняемая величина*
Скорость и направление ветра	Декартовы компоненты
Точка росы	Абсолютная влажность
Видимость	Коэффициент ослабления

3.7 ПОПРАВКИ

При измерении многих метеорологических величин вводятся поправки либо к необработанным данным, либо к данным уровня I или уровня II, чтобы откорректировать различные влияния. Такие поправки описываются в главах по различным метеорологическим элементам в части I. Поправки к необработанным данным, на аддитивную и мультипликативную составляющие ошибки, или на температуру, силу тяжести и другие получают при калибровке и по характеристикам прибора. К другим типам поправок или коррекций, применяемым к необработанным данным или к данным более высокого уровня, относятся сглаживание, подобное тому, которое применяется к измерениям высоты облаков и к аэрологическим профилям, и коррекции на экспозицию, например такие, которые иногда применяют к наблюдениям за температурой, ветром и осадками. В некоторых случаях алгоритмы для таких типов поправок основаны на исследованиях, еще не полностью завершенных; таким образом, несмотря на то, что они, несомненно, улучшают точность данных, в дальнейшем сохраняется возможность получения различных алгоритмов. В таком случае может возникнуть необходимость в восстановлении первичных неоткорректированных данных. Поэтому рекомендуется детально описывать алгоритмы.

3.8 КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА

Вопрос о контроле качества обсуждается в главе 3. Официальные требования излагаются в ВМО (2003), а общие процедуры рассматриваются в ВМО (1989).

Процедуры контроля качества следует осуществлять на каждом этапе преобразования необработанных выходных сигналов датчиков в метеорологические величины. Сюда относятся операции, связанные с получением данных, а также с приведением их к данным уровня II.

В процессе получения данных контроль качества должен быть нацелен на уменьшение как систематических, так и случайных погрешностей измерений, и исключения ошибок в результате отклонения от технических стандартов, ошибок при неправильной установке приборов и субъективных ошибок наблюдателя.

Контроль качества во время обработки и преобразования данных должен быть направлен на устранение ошибок, возникающих в результате используемых методов преобразования или используемых процедур расчетов. В целях улучшения качества получаемых данных при высокой частоте отсчетов, которые могут вырабатывать увеличенный шум, используются методы фильтрации и сглаживания. Они описаны ранее в этой главе, а также в главе 2 части III.

3.9 СОСТАВЛЕНИЕ МЕТАДАННЫХ

Метаданные рассматриваются в главе 1 части I, в главе 3, а также в других главах, касающихся различных метеорологических величин. Метаданные следует сохранять для того, чтобы:

(a) можно было восстановить первичные данные для возобновления работы в случае необходимости (например, с различным фильтрованием или коррекциями);

(b) потребитель мог легко оценить качество данных, а также условия, при которых они были получены (такие как экспозиция);

(c) потенциальные потребители могли узнать о существовании данных.

Поэтому необходимо записывать все процедуры, используемые в вышеописанных операциях обработки данных, характерные для каждого типа данных и отдельно для каждой станции и типа наблюдений.

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Всемирная Метеорологическая Организация, 1992: *Наставление по Глобальной системе обработки данных и прогнозирования*. Том I, ВМО-№ 485, Женева.

Всемирная Метеорологическая Организация, 1989: *Руководство по Глобальной системе наблюдений*. ВМО-№ 488, Женева.

Всемирная Метеорологическая Организация, 2003: *Наставление по Глобальной системе наблюдений*. Том I: Глобальные аспекты. ВМО-№ 544, Женева.

Acheson, D.T., 1968: An approximation to arithmetic averaging for meteorological variables. *Journal of Applied Meteorology*, Volume 7, Issue 4, pp. 548 – 553.

World Meteorological Organization, 1987: Some General Considerations and Specific Examples in the Design of Algorithms for Synoptic Automatic Weather Stations (D.T. Acheson). Instruments and Observing Methods Report No. 19, WMO/TD-No. 230, Geneva.

ГЛАВА 4

ИСПЫТАНИЕ, КАЛИБРОВКА И ВЗАИМНОЕ СРАВНЕНИЕ ПРИБОРОВ

4.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Одной из целей ВМО, сформулированных в статье 2 (с) Конвенции ВМО, является «содействие стандартизации метеорологических и сопутствующих геофизических наблюдений и обеспечение однородности публикуемых данных наблюдений и статистики». С этой целью разработаны комплекты стандартных процедур и рекомендованных правил, суть которых изложена в настоящем Руководстве.

Достоверные данные наблюдений могут быть получены только тогда, когда в отношении приборов и сети применяется комплексная программа обеспечения качества. Калибровка и проведение испытаний являются неотъемлемой частью программы обеспечения качества. В программу также входят такие элементы, как четкое определение требований, специальный отбор приборов на основе этих требований, критерии выбора площадки наблюдений, техническое обслуживание и материально-техническое обеспечение. Все эти элементы должны приниматься во внимание при разработке планов калибровки, поверки и испытаний. В международном масштабе расширение программ обеспечения качества за счет включения взаимных сравнений приборов имеет большое значение для получения совместимых комплектов данных.

Ввиду важности стандартизации на межгосударственном уровне несколько региональных ассоциаций ВМО учредили Региональные центры по приборам[1] с целью организации и оказания помощи в проведении стандартизации, калибровки и поверки. Их круг обязанностей и местонахождение приводятся в приложении 1.А, глава 1, часть I. Подобным образом по рекомендации СКОММ[2] была создана сеть региональных центров по морским приборам для обеспечения выполнения тех же функций в отношении измерений, проводимых по морской метеорологии и сопутствующей программе океанографических наблюдений. Их сфера полномочий и местонахождение соответственно приводятся в приложении 4.А, глава 4, часть II.

[1] Рекомендовано Комиссией по приборам и методам наблюдений на ее девятой сессии (1985 г.), рекомендация 19 (КПМН-IX)

[2] Рекомендовано Совместной технической комиссией ВМО-МОК по океанографии и морской метеорологии на её третьей сессии (2009 г.), рекомендация 1 (СКОММ-III)

Существуют национальные и международные стандарты и руководства для многих аспектов проведения испытаний и оценки приборов, и их следует использовать, когда это необходимо. На некоторые из них делаются ссылки в этой главе.

4.1.1 Определения

Определения терминов в метрологии даются Международной организацией стандартизации (ИСО, 1993 и 2007). Многие из них приводятся в главе 1 части I настоящего Руководства, а некоторые повторяются здесь для удобства. Эти термины применяются не везде и в некоторых отношениях отличаются от терминов, которые обычно используются в метеорологии. Тем не менее, определения ИСО рекомендованы для использования в метеорологии. Указанный документ ИСО выпущен совместно с Международным бюро мер и весов, Международной организацией правовой метрологии, Международной электротехнической комиссией и другими подобными международными органами.

Терминология ИСО отличается от общепринятой в некоторых аспектах, в частности:

Точность (измерения) – это степень приближения результата измерения к истинному значению измеряемой величины; она является качественной характеристикой. Точность прибора – это способность прибора давать показания, близкие к истинному значению; она также является качественной характеристикой. Можно говорить о приборе или об измерении, имеющем высокую точность, но количественной мерой точности является неопределенность.

Неопределенность выражается степенью разброса значений, такой как среднеквадратическое отклонение или уровень достоверности.

Погрешность измерения – это результат измерения за вычетом его истинного значения (отклонение имеет другой знак); она включает в себя случайные и систематические погрешности. (Термин смещение обычно используется в отношении систематической погрешности.)

Воспроизводимость также выражается статистически как степень сходства результатов последовательных измерений, проводимых при одних и тех же условиях измерений.

Сходимость – это степень близости результатов измерений при определенных различных условиях.

ИСО не дает определения термина прецизионность и рекомендует не употреблять этот термин.

4.1.2 Программы испытаний и калибровки

Прежде чем использовать для метеорологических целей результаты атмосферных измерений, сделанных с помощью конкретного датчика, необходимо ответить на ряд вопросов.

(a) Какова точность датчика или измерительного канала системы?
(b) Какова изменчивость измерений на сети, имеющей такие системы или датчики?
(c) Каково будет изменение или смещение данных, предоставляемых датчиком или системой, если их местонахождение будет изменено?
(d) Каково будет изменение или смещение данных, если будет произведена замена на другой датчик или систему, измеряющие одну и ту же метеорологическую величину?

Для того чтобы ответить на эти вопросы и обеспечить достоверность и согласованность измерений, производимых метеорологическим датчиком или системой, необходимо провести его калибровку (поверку), лабораторные испытания и испытания работоспособности.

Следует разработать и стандартизировать программы калибровки (поверки)и испытаний, основанные на ожидаемой климатической изменчивости, воздействии окружающей среды и электромагнитных помех, в которых, как ожидается, эти системы и датчики будут работать. Например, рассматриваемые факторы могут включать в себя ожидаемый диапазон температуры, влажности и скорости ветра; будут ли датчик или система функционировать в морских условиях или в районах с пыльными или песчаными бурями; ожидаемые изменения электрического напряжения или фазы и скачки напряжения в линиях электропередач; ожидаемые средние и максимальные электромагнитные помехи. Метеорологические службы могут заказывать проведение калибровки (поверки) и испытаний у частных лабораторий и компаний или создавать свои организации для предоставления таких услуг.

Самое важное, чтобы в любой программе испытаний, по крайней мере, два однотипных датчика или системы прошли каждый вид испытания. Это позволяет определить ожидаемую изменчивость показаний датчика или системы, а также облегчает выявление проблем.

4.2 ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ

4.2.1 Цель испытаний

Испытание датчиков и систем проводится с целью сбора информации об их точности измерений в конкретных условиях работы. Как правило, изготовители проводят испытания своих датчиков и систем, и в некоторых случаях указанные в спецификации рабочие характеристики приводятся на основе результатов таких испытаний. Однако для пользователя – Метеорологической службы чрезвычайно важно разработать и выполнить собственную программу испытаний или иметь доступ к организации, проводящей независимые испытания.

Проведение испытаний можно разделить на: испытание на воздействие окружающей среды, испытание на воздействие электрических и электромагнитных помех и испытание работоспособности. Программа испытаний может состоять из одного или нескольких таких элементов.

Обычно программа испытаний составляется с целью обеспечения проверки датчика или системы на соответствие заявленной точности измерений, требованиям технического обслуживания и среднего времени наработки на отказ во всех ожидаемых условиях работы, хранения и транспортировки. Программы испытаний составляются также для того, чтобы собрать информацию об ожидаемой изменчивости показаний аналогичных датчиков на сети, о функциональной сходимости показаний и сравнимости данных измерений, произведенных различными датчиками или системами.

Знания, как о функциональной сходимости, так и сравнимости результатов измерений имеют большое значение для целей климатологии, где единая база данных многолетних наблюдений, как правило, содержит данные измерений одной и той же метеорологической величины в течение длительного периода, проведенных с использованием различных датчиков и методик наблюдений. На самом деле для практических применений хорошая сравнимость работы приборов является по существу более важным атрибутом, чем точная абсолютная калибровка. Эта информация собирается при испытаниях работоспособности датчика.

Даже в тех случаях, когда датчик или система поставляются с отчетом о проведенной калибровке,

необходимо провести испытание на воздействие окружающей среды и, возможно, дополнительную калибровку (поверку). Примером является современная система измерения температуры, в которой датчиком обычно служит терморезистор. Как правило, несколько терморезисторов калибруются изготовителем в температурной ванне, и предоставляемые в спецификации рабочие характеристики основаны на результатах этой калибровки. Однако система измерения температуры, которая выдает значения температуры, также включает в себя источник энергии и электронную схему, которые также могут подвергаться влиянию температуры. Поэтому во время калибровки важно задействовать электронную схему и датчик как единую систему во всем диапазоне температур. При хорошей организации работы проводится также замена датчика на резистор с известным температурным коэффициентом, который выдает известные значения температуры, а электронная схема функционирует во всем диапазоне температур, представляющим интерес, для обеспечения должной температурной компенсации электронной схемы.

Пользователи должны также иметь программу испытаний случайно отобранных серийных датчиков и систем, даже если их элементы были испытаны перед сборкой, поскольку даже относительно небольшие изменения в использованных материалах, конфигурации или процессе изготовления могут повлиять на рабочие характеристики датчиков и систем.

Международная организация стандартизации разработала стандарты (ИСО, 1989a, 1989*b*), которые содержат описания программ и процедур для проведения выборочных поверок большого числа приборов.

4.2.2 Испытание на воздействие окружающей среды

4.2.2.1 Определения

Для качественного описания датчика или измерительной системы (прибора), который должен подвергнуться эксплуатационным испытаниям, применяются следующие определения:

Условия эксплуатации – условия или сочетание условий, которые встречаются или ожидаются в течение срока выполнения прибором его стандартных рабочих функций в полном соответствии с его рабочими характеристиками.

Условия устойчивости – такие условия или сочетание условий за пределами обычных условий эксплуатации, которые способен выдержать прибор. Такие условия могут иметь лишь небольшую вероятность возникновения в течение срока службы прибора. Предполагается, что прибор не должен выполнять свои оперативные функции при наличии таких условий. Однако прибор должен быть в состоянии выдержать эти условия и вернуться к нормальной работе при возвращении к обычным условиям эксплуатации.

Внешняя среда – условия или сочетание условий, которые встречаются или ожидаются в течение срока выполнения прибором его стандартных рабочих функций в незащищенных и неконтролируемых природных условиях.

Среда в помещении – условия или сочетание условий, которые встречаются или ожидаются в течение срока, когда прибор подключен к источнику питания и выполняет свои стандартные рабочие функции внутри замкнутой конструкции. Во внимание принимаются условия как неконтролируемой среды в помещении, так и искусственно контролируемой среды в помещении.

Условия транспортировки – условия или сочетание условий, которые встречаются или ожидаются на этапе транспортировки в течение срока службы прибора. Принимаются во внимание условия при основных способах транспортировки: автомобильным транспортом, по железной дороге, на судне и самолетом – а также полный диапазон внешних условий, встречающихся до и во время транспортировки и на этапе разгрузки. Как правило, прибор подвергается воздействию условий транспортировки, находясь в упакованном виде в грузовом контейнере.

Условия хранения – условия или сочетание условий, которые встречаются или ожидаются в то время, когда прибор не действует и находится на хранении. Принимаются во внимание все типы складирования: от открытого складирования, когда прибор хранится незащищенным в условиях внешней среды, до защищенного хранения внутри помещения. Как правило, прибор подвергается воздействию такого рода условий хранения, находясь в упакованном виде в грузовом контейнере.

Международная электротехническая комиссия также имеет более подробный набор стандартов (IEK, 1990), по сравнению с упомянутым выше стандартом, для классификации условий окружающей среды. Они определяют диапазоны метеорологических, физических и биологических внешних факторов, в которых может оказаться прибор при транспортировке, хранении, установке и использовании, что полезно для подготовки спецификации на оборудование и для планирования испытаний.

4.2.2.2 Программа испытаний на воздействие окружающей среды

Испытания на воздействие окружающей среды в лаборатории позволяют быстро испытать прибор в широком диапазоне условий и могут ускорить определенное воздействие, например морской среды с её насыщенной солью атмосферой. Преимущество испытаний на воздействие окружающей среды перед полевыми испытаниями состоит в том, что в хорошо оборудованной лаборатории многие испытания могут быть ускорены, и приборы можно испытать в широком диапазоне климатической изменчивости. Испытание на воздействие окружающей среды очень важно, поскольку позволяет предвидеть потенциальные проблемы и обеспечить готовность для перехода к полевым испытаниям, но оно не может заменить полевых испытаний.

Программа испытаний на воздействие окружающей среды обычно планируется с учетом набора следующих условий: высокая температура, низкая температура, воздействие резкого изменения температуры, цикл изменения температуры, влажность, ветер, дождь, переохлажденный дождь, пыль, солнечное сияние (инсоляция), низкое давление, вибрация и тряска при транспортировке. Диапазоны или ограничения по испытаниям в отношении каждого испытания определяются ожидаемыми условиями окружающей среды (эксплуатации, устойчивости, внешней среды, в помещении, транспортировки, хранения), в которых может оказаться прибор.

Целью документа, содержащего программу испытаний на воздействие окружающей среды, является установление стандартных критериев оценки результатов испытаний на воздействие окружающей среды и соответствующих процедур испытаний для определения технических характеристик с целью закупки, конструирования и испытания прибора. Этот документ должен основываться на ожидаемых рабочих и экстремальных условиях окружающей среды.

Например, Национальная метеорологическая служба Соединенных Штатов подготовила стандартные процедуры и критерии испытаний на воздействие окружающей среды (NWS, 1984), основанные на результатах исследования, в котором обобщены и описаны ожидаемые рабочие и экстремальные диапазоны различных метеорологических величин в районе ответственности Соединенных Штатов, и представила предложенные критерии проведения таких испытаний (NWS, 1980). Эти критерии и процедуры состоят из трех частей:

(a) критерии испытаний на воздействие окружающей среды и граничные параметры испытаний в условиях внешней среды, в помещении и при транспортировке/хранении;
(b) процедуры испытаний оцениваемого прибора на основе критериев испытаний на воздействие окружающей среды;
(c) обоснованное предоставление справочной информации о различных условиях окружающей среды, в которых может оказаться прибор, о потенциальном воздействии этих условий на прибор и соответствующее обоснование рекомендованных критериев проведения испытаний.

4.2.3 Испытание на воздействие электрических и электромагнитных помех

Распространение датчиков и систем автоматизации сбора и обработки данных, содержащих электронные компоненты, во многих случаях ведет к необходимости включения в общую программу проведение испытаний работы приборов в условиях воздействия электрических и электромагнитных помех.

Следует подготовить документ, содержащий программу испытаний на воздействие электрических и электромагнитных помех. Целью этого документа является установление стандартных критериев для проведения испытаний на воздействие электрических и электромагнитных помех и соответствующих процедур испытаний, а также представление единого руководства по техническим характеристикам требований на устойчивость к воздействию электрических и электромагнитных помех с целью закупки и конструирования прибора.

Документ должен основываться на изучении количественных характеристик ожидаемых скачков напряжения в линиях электропередач и времени нарастания электрического импульса, вызванного природными явлениями, например такими, как грозы. В программу также должны быть включены испытания ожидаемым изменением электропитания как по напряжению, так и по фазе. Если ожидается, что прибор будет работать в условиях аэропорта или в другой окружающей среде с возможными помехами, вызванными электромагнитным излучением, то такие условия следует также количественно описать и включить в этот стандарт. Целью этой программы может также быть обеспечение того, чтобы прибор сам не стал генератором электромагнитного излучения. Особое внимание следует уделить прибору, содержащему микропроцессор и, следовательно, кварцевый генератор тактовой частоты, который имеет важное значение для временной функции.

4.2.4 Испытание работоспособности

Калибровка (поверка) и испытание на воздействие окружающей среды предоставляют необходимую, но недостаточную основу для определения рабочих характеристик датчика или системы, поскольку калибровка, поверка и лабораторные испытания не могут полностью определить, как будет работать датчик или система в полевых условиях. Невозможно смоделировать совокупное воздействие всех изменяющихся метеорологических величин, влиянию которых будет подвержен прибор во всех предписанных условиях эксплуатации.

Испытание работоспособности заключается в обычной проверке работы прибора во внешней среде в природных условиях, в которых, как предполагается, будет работать прибор в широком диапазоне изменчивости метеорологических условий и климатических режимов, а в случае приборов для приземных наблюдений, в условиях различной подстилающей поверхности с широким диапазоном альбедо. Испытания работоспособности необходимы для того, чтобы определить, отвечает ли датчик или система требованиям, предъявляемым к нему при работе в условиях воздействия меняющихся в широком диапазоне величин ветра, количества осадков, температуры, влажности, прямой, рассеянной и отраженной солнечной радиации. Испытания работоспособности становятся все более важными по мере того, как в оперативную практику входит применение датчиков на основе новейших технологий, например с использованием электрооптических, пьезоэлектрических и емкостных элементов. На показания этих датчиков могут оказывать влияние такие случайно проявившиеся факторы, как насекомые, пауки и их паутина и плотность распределения взвешенных частиц в атмосфере; все это должно быть определено при испытании работоспособности.

Для многих прикладных целей следует провести сравнимость показаний в полевых условиях. Это достигается путем одновременного испытания аналогичных, но разнотипных датчиков или систем с использованием полевого транспортируемого эталона сравнения. Эти сведения представлены в работах Hoehne (1971, 1972, 1977).

Испытание работоспособности может планироваться и проводиться частными лабораториями или соответствующими подразделениями метеорологической службы или другой организации-пользователя. При закупке и эксплуатации приборов следует учитывать образовательный уровень и практические навыки наблюдателей и техников, которые будут использовать данную систему. Использование прибора обслуживающим персоналом должно быть частью программы испытаний. Персонал, который будет устанавливать, использовать, обслуживать и ремонтировать прибор, должен дать оценку его датчикам или части системы и проверить их на соответствие инструкциям и справочникам, которые они будут использовать в своей работе. При составлении закупочной спецификаций следует также учитывать уровень практической подготовки персонала.

4.3 КАЛИБРОВКА (ПОВЕРКА)

4.3.1 Цель калибровки (поверки)

Калибровка (поверка) датчика или системы является первым шагом в определении достоверности данных. Обычно она предусматривает сопоставление показаний датчика с известным эталоном для определения того, насколько близко величина выходного сигнала прибора соответствует показаниям эталона в ожидаемом рабочем диапазоне измерений. Выполнение лабораторной калибровки и поверки, безусловно, предполагает, что характеристики прибора достаточно стабильны для проведения его метрологического обслуживания в поле. Записи об очередной калибровке или поверке на протяжении жизни прибора должны обеспечивать уверенность в стабильности его показаний

Как правило, калибровка и поверка представляет собой серию операций, которые позволяют при заданных условиях определить взаимосвязь между показаниями измерительного прибора или измерительной системы и соответствующими известными значениями измеряемой величины, а именно физической величины, которая должна быть измерена. Она должна определить систематическую погрешность датчика/системы или среднее отклонение от показания эталонного прибора, по которому ведется калибровка или поверка, случайную погрешность датчика/системы, диапазон показаний, для которого калибровка или поверка действительна, и наличие любых пороговых значений или зон с нелинейной характеристикой. Калибровка (поверка) также определяет разрешающую способность и гистерезис прибора. Гистерезис следует определять посредством циклических измерений во время калибровки и поверки на всем рабочем диапазоне датчика/системы. Результат калибровки (поверки) часто выражается калибровочным (градуировочным) коэффициентом или серией калибровочных коэффициентов, представленных в виде калибровочной таблицы или калибровочной кривой. Результаты калибровки могут регистрироваться в документе, называемом калибровочным сертификатом или протоколом калибровки, а поверки – оформляться в виде свидетельства о поверке.

Калибровочный сертификат, протокол и свидетельство должны показывать систематическую погрешность, которая впоследствии может быть устранена с помощью механической или электрической юстировки или корректирующего программного обеспечения. Остаточная случайная погрешность не повторяется и не может быть устранена, но может быть определена статистическим методом при достаточном количестве повторных измерений в ходе калибровки или поверки.

4.3.2 Эталоны

Калибровка и поверка приборов или измерительных систем обычно проводится путем сравнения их показаний с одним или несколькими измерительными эталонами. Эти эталоны классифицируются в соответствии с их метрологическими особенностями. Их определения (ИСО, 1993 2007) даны в главе 1 части I и могут быть кратко сформулированы следующим образом:

Первичный эталон – эталон, который обладает наивысшими метрологическими характеристиками, и значение которого принимается без сравнения с другими эталонами.

Вторичный эталон – эталон, значение которого определяется путем сравнения с первичным эталоном.

Международный эталон – эталон, признанный международным соглашением служить на международном уровне основой для установления значений других эталонов соответствующей физической величины.

Национальный эталон – эталон, признанный решением на национальном уровне служить основой в стране для установления значений других эталонов.

Образцовый(исходный, ведомственный) эталон – эталон, который обладает, как правило, наивысшими метрологическими характеристиками и доступен в определенном месте или в конкретной организации, и по которому сверяются проводимые измерения.

Рабочий эталон – эталон, который используется на регулярной основе для калибровки или поверки измерительных приборов (до 1994 г. назывался «образцовым средствам измерений»).

Переходный эталон (сравнения) – эталон, используемый в качестве промежуточного средства при сравнении эталонов.

Транспортируемый эталон сравнения – эталон, имеющий иногда специальную конструкцию и предназначенный для транспортировки между различными пунктами.

Первичный эталон хранится в крупном международном или национальном учреждении. Вторичные эталоны часто хранятся в крупных калибровочных и поверочных лабораториях и, как правило, не пригодны для полевого использования. Рабочие эталоны обычно представляют собой лабораторные приборы, которые откалиброваны по вторичному эталону. Рабочие эталоны, которые могут использоваться в полевых условиях, известны как переходные эталоны. Переходные эталонные приборы могут также использоваться для сравнения приборов в лаборатории или в поле.

4.3.3 Сличение

ИСО (1993) определяет сличение следующим образом:

> «Свойство результата измерения или значения эталона, благодаря которому он может быть соотнесен с установленными образцами, обычно национальными или международными эталонами, на основе непрерывной цепи сравнений, причем все они обладают известными величинами неопределенности.»

В метеорологии обычная практика измерения давления состоит в сличении прибора с транспортируемыми эталонами, рабочими эталонами и вторичными эталонами при соотнесении данных этих измерений с показаниями национальных или первичных эталонов с целью определения накопленной погрешности (за исключением тех, которые возникают в поле и должны быть определены с помощью полевых испытаний). Измерения температуры основываются на такой же практике.

Тот же самый принцип должен применяться в отношении измерений любой физической величины, для которой требуются измерения с известной погрешностью.

4.3.4 Установленный порядок калибровки (поверки)

Калибровка (поверка) метеорологических приборов обычно проводится в лаборатории, где размещены соответствующие эталоны, калибровочные и поверочные устройства. Это может быть национальная лаборатория, частная лаборатория или лаборатория, учрежденная в структуре метеорологической службы или другой организации-пользователя. Калибровочная (поверочная) лаборатория отвечает за поддержание необходимого качества ее эталонов и за ведение учетных записей об их сличении. Такие лаборатории могут также выдавать калибровочные сертификаты и свидетельства о поверке, которые должны содержать оценку

точности калибровки и поверки. Для того чтобы гарантировать их качество лаборатория должна быть признана и уполномочена соответствующими национальными органами.

Изготовители метеорологических приборов должны поставлять свою высококачественную продукцию, например эталонные барометры или термометры, с калибровочными сертификатами, протоколами калибровки или свидетельствами о поверке. Эти документы не всегда обязательно включаются в базовую цену прибора, а предлагаются в качестве опции за дополнительную плату. Калибровочные сертификаты и свидетельствами о поверке, выдаваемые уполномоченными лабораториями, могут быть более дорогостоящими, чем заводские сертификаты. Как уже упомянуто в предыдущем разделе, необходимо проводить испытания на воздействие окружающей среды, испытания работоспособности и возможные дополнительные калибровочные (поверочные) испытания.

Пользователи тоже могут приобрести калибровочные и поверочные устройства, измерительные эталоны для своих собственных лабораторий. Хорошее калибровочное и поверочное устройство должно всегда сочетаться с надлежащим эталоном измерений, например резервуар для калибровки температуры в жидкостной ванне разумно сочетать с комплектом сертифицированных стеклянных жидкостных термометров и/или сертифицированных резисторных термометров. Для вышеприведенного примера следует использовать и дополнительные средства, например – непроводящую кремнийорганическую жидкость. Таким образом, если устройство измерения температуры смонтировано на плате с электронной схемой, то вся плата должна быть погружена в ванну, с тем чтобы устройство можно было испытать в его рабочей конфигурации. Не только калибровочное (поверочное) оборудование и эталоны должны обеспечивать высокую точность измерений, но и инженеры и техники калибровочной лаборатории должны быть хорошо подготовлены в области базовой метрологии и использования имеющихся калибровочных (поверочных) устройств и измерительных эталонов.

Как только приборы прошли первичную калибровку, (поверку), испытания и были приняты пользователем, следует утвердить программу периодических поверок и калибровок. Такие приборы, как ртутные барометры, весьма подвержены возникновению дефектов при транспортировке в полевых условиях. На отдаленных станциях эти приборы должны, по мере возможности, храниться в неподвижном состоянии и калиброваться (поверяться) по более устойчивым к повреждениям передвижным, транспортируемым эталонам, которые могут перевозиться инспекторами с одной станции на другую. Транспортируемые эталоны должны часто сравниваться с рабочим эталоном или исходным образцовым эталоном в калибровочной лаборатории, причем до и после каждой инспекционной поездки.

Подробности процедур лабораторной калибровки, например барометров, термометров, гигрометров, анемометров и приборов по измерению солнечной радиации, содержатся в соответствующих главах настоящего Руководства или в специализированных справочниках. Эти издания содержат также информацию о признанных международных эталонных приборах и калибровочных устройствах. Процедуры калибровки для автоматических метеорологических станций требуют особого внимания и описаны в главе 1 части II.

В публикации ВМО (1989) содержится подробный анализ процедур калибровки, применяемых несколькими метеорологическими службами для калибровки приборов, используемых для измерения температуры, влажности, давления и ветра.

4.4 ВЗАИМНЫЕ СРАВНЕНИЯ

Взаимные сравнения приборов и наблюдательных систем, как и установленные процедуры контроля качества, имеют большое значение для создания совместимых комплектов данных. Все взаимные сравнения должны тщательно планироваться и выполняться, чтобы поддерживать соответствующий и однородный уровень качества измерений каждой метеорологической величины. Многие метеорологические физические величины, например видимость, высота нижней границы облачности и осадки, нельзя непосредственно сравнить с метрологическими эталонами и, следовательно, с абсолютной точкой отсчета. Для таких физических величин первоочередное значение имеют взаимные сравнения.

Сравнения или оценки приборов и наблюдательных систем могут организовываться и проводиться на следующих уровнях:

(a) международные сравнения, на которых могут присутствовать участники из всех заинтересованных стран в соответствии с общим приглашением.

(b) региональные взаимные сравнения, на которых могут присутствовать участники из стран конкретного региона (например, региона ВМО) в соответствии с общим приглашением.

(c) многосторонние и двусторонние взаимные сравнения, на которых могут присутство-

вать участники из двух или более стран, без рассылки общего приглашения.

(d) национальные взаимные сравнения внутри отдельной страны.

Поскольку сравнимость измерений на международном уровне очень важна, ВМО время от времени по линии одного из своих конституционных органов организует международные и региональные сравнения приборов. Такие взаимные сравнения или оценки приборов и систем наблюдений могут быть весьма продолжительными и дорогостоящими. В связи с этим были установлены правила, которые обеспечивают эффективную координацию. Эти правила приведены в приложениях 4.A и 4.B[3]. В них содержатся общие руководящие принципы, которые, при необходимости, должны дополняться конкретными рабочими правилами по каждому взаимному сравнению (см. соответствующие главы настоящего Руководства).

Ссылки на отчеты о конкретных международных сравнениях ВМО содержатся в других главах настоящего Руководства (см., например, часть I, главы 3, 4, 9, 12, 14 и 15). В приложении 4.C помещен перечень международных сравнений, которые проведены при поддержке Комиссии по приборам и методам наблюдений и результаты которых опубликованы в серии технических документов ВМО.

Отчеты о сравнениях на любом уровне должны доводиться до сведения и быть доступными для метеорологического сообщества в полном объеме.

[3] Приложение к рекомендации 14 (КПМН-XI) и Приложение IX (1994 г.), одобренные одиннадцатой сессией Комиссии по приборам и методам наблюдений

ПРИЛОЖЕНИЕ 4.А
ПРОЦЕДУРЫ ПРОВЕДЕНИЯ ГЛОБАЛЬНЫХ И РЕГИОНАЛЬНЫХ СРАВНЕНИЙ ПРИБОРОВ ВМО

1. Сравнения приборов и методов наблюдений ВМО должны быть одобрены соответствующим конституционным органом ВМО в качестве взаимных сравнений ВМО.

2. Исполнительный Совет будет рассматривать утверждение взаимных сравнений и их включение в программу и бюджет ВМО.

3. Когда возникает срочная необходимость в проведении специальных взаимных сравнений, которые не рассматривались на сессии конституционного органа, президент соответствующего органа может представить соответствующее предложение Президенту ВМО для утверждения.

4. Перед каждым сравнением Генеральный секретарь при содействии президента КПМН и, возможно, президентов других технических комиссий, региональных ассоциаций или руководителей соответствующих программ должен с достаточной заблаговременностью провести опрос с целью выяснения желания какой-либо страны-члена или нескольких стран-членов организовать сравнения, а также выявления заинтересованности стран-членов в участии в таких взаимных сравнениях.

5. Если хотя бы одна страна-член согласится выступать в качестве страны-организатора сравнений и наберется достаточное число стран-членов, заявивших о своей заинтересованности участвовать в этих сравнениях, президент КПМН по согласованию в необходимых случаях с главами соответствующих конституционных органов должен учредить международный организационный комитет.

6. До начала сравнений организационный комитет должен решить вопросы, связанные с их организацией, например, как минимум определить основные задачи, место, время и продолжительность проведения взаимных сравнений, условия участия, методологию сбора, обработки и анализа полученных данных, планы публикации результатов, правила проведения взаимных сравнений и обязательства страны – организатора и участников.

7. Страна-организатор должна назначить руководителя проекта, который будет отвечать за надлежащее проведение сравнений, анализ данных и подготовку окончательного отчета о взаимных сравнениях по согласованию с организационным комитетом. Руководитель проекта в силу занимаемой должности является членом организационного комитета.

8. Если организационный комитет принял решение о проведении сравнений на полигонах в различных странах-организаторах, каждая из этих стран должна назначить своего руководителя сравнений. Сфера ответственности каждого руководителя сравнений и руководителя проектом в целом определяются организационным комитетом.

9. Генеральному секретарю предлагается сразу после учреждения организационного комитета проинформировать страны-члены о запланированных взаимных сравнениях. Приглашение должно содержать информацию об организации и правилах проведения взаимных сравнений, одобренные организационным комитетом. Страны, принимающие участие в сравнениях, должны соблюдать эти правила.

10. Вся дальнейшая переписка между страной-(ами)-организатором(ами) и участниками по организационным вопросам должна вестись руководителем проекта, а в определенных случаях руководителем сравнений, если организационный комитет не определит другой порядок.

11. В случае необходимости, в ходе взаимных сравнений могут быть организованы заседания организационного комитета.

12. По завершении сравнений организационный комитет должен обсудить и утвердить основные результаты анализа данных взаимных сравнений и внести предложения об использовании этих результатов метеорологическим сообществом.

13. Окончательный отчет о взаимных сравнениях, подготовленный руководителем проекта и утвержденный организационным комитетом, должен быть опубликован в серии отчетов ВМО по приборам и методам наблюдений.

ПРИЛОЖЕНИЕ 4.B
РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОРГАНИЗАЦИИ ВЗАИМНЫХ СРАВНЕНИЙ ПРИБОРОВ ВМО

1. ВВЕДЕНИЕ

1.1 Настоящие рекомендации являются дополнением к процедурам проведения глобальных и региональных взаимных сравнений метеорологических приборов (СИ) ВМО. В них предусматривается, что для взаимных сравнений создается международный организационный комитет, а также приводится руководство для организационного комитета по проведению сравнений. В частности, см. приложение 12.C к главе 12, часть I.

1.2 Однако, поскольку все взаимные сравнения в определенной степени различаются между собой, эти рекомендации следует рассматривать как обобщенный перечень задач. Задачи могут изменяться в зависимости от ситуации, но при этом имеется в виду, что основными критериями проведения взаимных сравнений ВМО и оценок результатов должны быть беспристрастность и научная значимость.

1.3 Окончательные отчеты о других взаимных сравнениях ВМО и отчеты заседаний организационных комитетов могут служить в качестве примеров проведения взаимных сравнений. Эти отчеты имеются в Департаменте Всемирной Службы Погоды Секретариата ВМО.

2. ЦЕЛИ ВЗАИМНЫХ СРАВНЕНИЙ

Организационному комитету следует изучить ожидаемые результаты взаимных сравнений и определить конкретные проблемы, которые могут возникнуть. Он должен подготовить ясное и детальное заявление об основных целях взаимных сравнений и согласовать критерии, которые должны будут использоваться при оценке результатов. Организационный комитет должен также изучить вопрос, как наилучшим образом гарантировать успех взаимных сравнений, используя, при необходимости, опыт, накопленный в ходе предыдущих сравнений.

3. МЕСТО, ВРЕМЯ И ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ ПРОВЕДЕНИЯ СРАВНЕНИЙ

3.1 Секретариату следует просить страну-организатора предоставить организационному комитету описание предложенного места проведения взаимных сравнений и условий (местоположение, характеристики окружающей среды, климатологические параметры, основные топографические особенности и пр.). Страна-организатор должна также назначить руководителя проекта.[4]

3.2 Организационному комитету следует изучить пригодность предложенного полигона и его технических средств, предложить необходимые изменения и принять решение о полигоне и технических средствах, которые должны использоваться при сравнениях. Руководитель проекта должен впоследствии подготовить полное описание места и условий проведения сравнений. Организационный комитет по согласованию с руководителем проекта должен принять решение о дате начала взаимных сравнений и их продолжительности.

3.3 Руководитель проекта должен предложить дату, когда полигон испытаний и его технические средства будут предоставлены в распоряжение участников сравнений для установки своего оборудования и его подключения к системе сбора данных. График работ должен предусматривать время на проверку и тестирование оборудования и знакомство операторов с рабочими процедурами и установленным порядком.

4. УЧАСТИЕ В СРАВНЕНИЯХ

4.1 Организационный комитет должен рассмотреть технические и оперативные аспекты, особые пожелания и предпочтения, ограничения, приоритеты и описания различных типов приборов для взаимных сравнений.

4.2 Обычно к сравнениям допускаются лишь те приборы, которые используются странами-членами в оперативной работе либо планируются к оперативному использованию в ближайшем будущем. В обязанности стран-участниц входит калибровка (поверка) своих приборов по признанным измерительным эталонам перед их отправкой на полигон и предоставление

[4] В тех случаях, когда сравнения проводятся более чем на одном полигоне, должны быть, в соответствии с требованием, назначены руководители сравнений. Некоторые задачи руководителя проекта, описанные в этом приложении, должны быть поручены руководителям сравнений.

соответствующих калибровочных сертификатов и свидетельств о поверке. Участников могут просить предоставить два идентичных прибора каждого типа для получения большей достоверности данных. Однако это не должно быть условием для участия.

4.3 Организационный комитет должен составить подробный вопросник, чтобы получить необходимую информацию по каждому прибору, предлагаемому для взаимных сравнений. Руководитель проекта должен предоставить дополнительные сведения и обеспечить заполнение этого вопросника как можно скорее. Участников могут попросить детализировать в своих ответах требования к подсоединению аппаратуры и уточнить характеристики программного обеспечения, а также предоставить соответствующую документацию (ориентировочный перечень вопросов имеется в Секретариате ВМО).

4.4 Затем председатель организационного комитета должен попросить:

(a) Генерального секретаря официально пригласить страны-члены (которые проявили интерес) принять участие во взаимных сравнениях. Приглашение должно включать всю необходимую информацию о правилах взаимных сравнений, подготовленную организационным комитетом и руководителем проекта;

(b) Руководитель проекта поддерживает все дальнейшие контакты с участниками.

5. СБОР ДАННЫХ

5.1 Установка оборудования

5.1.1 Организационный комитет должен дать оценку предложенному плану размещения приборов, подготовленному руководителем проекта, и утвердить это размещения приборов для проведения взаимных сравнений. Особое внимание следует уделить беспристрастному надлежащему размещению и экспозиции приборов с учетом критериев и стандартов ВМО и других международных организаций. Принятые критерии размещения и экспозиции должны быть задокументированы.

5.1.2 Специальные запросы участников в отношении установки приборов должны рассматриваться и утверждаться, в случаях приемлемости, руководителем проекта от имени организационного комитета.

5.2 Эталоны и референтные приборы

Страна-организатор должна предпринять все меры для включения во взаимные сравнения, по крайней мере, одного референтного прибора (эталона). Калибровка (поверка) этого прибора (эталона) должна иметь прослеживаемость к национальным или международным эталонам. Описание и характеристики этого прибора (эталона) должны быть предоставлены в распоряжение организационного комитета. Если для измеряемой физической величины не существует признанного эталона или референтного прибора организационный комитет должен одобрить методику определения точки отсчета для взаимных сравнений.

5.3 Сопутствующие наблюдения и измерения

Организационный комитет должен согласовать перечень метеорологических величин и параметров окружающей среды, которые должны измеряться или наблюдаться на площадке проведения взаимных сравнений на протяжении всего периода сравнений. Он должен подготовить программу этих измерений и просить страну-организатора выполнить эту программу. Результаты выполнения этой программы следует запротоколировать в формате, пригодном для анализа взаимных сравнений.

5.4 Система сбора данных

5.4.1 Обычно страна-организатор должна предоставить необходимую систему сбора данных, способную регистрировать соответствующие аналоговые, импульсные и цифровые (последовательные или параллельные) сигналы со всех приборов, участвующих в сравнениях. Страна-организатор должна предоставить в распоряжение организационного комитета описание и блок-схему всей последовательности измерений. Организационный комитет совместно с руководителем проекта должен принять решение о том, будут ли приниматься аналоговые записи на ленте самописца и визуальное снятие показаний с дисплеев для целей проведения анализа измерений, либо они будут использоваться только для контроля работы приборов.

5.4.2 Аппаратная и программная части системы сбора данных должны быть тщательно испытаны перед началом сравнений, и необходимо принять меры по недопущению пропусков в регистрации данных на протяжении всего периода взаимных сравнений.

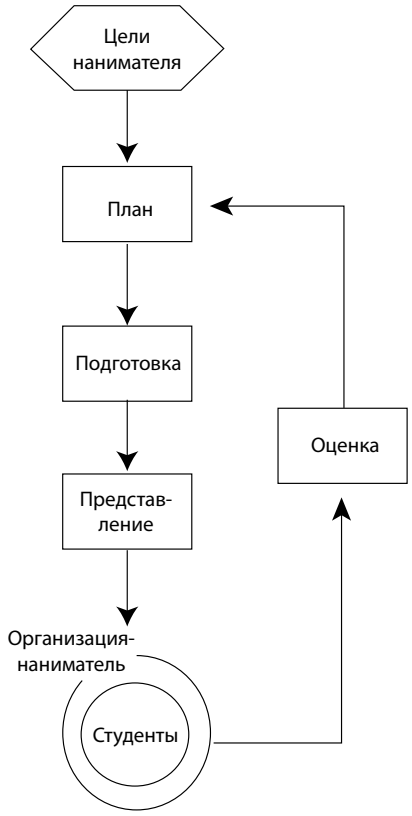
5.4.3 Планирование процесса профессионального обучения

Процесс профессионального обучения, как показано на рис. 5.2, состоит из четырех этапов:

(a) планирование:

(i) провести обзор целей обучения, определенных организацией-нанимателем или

органом, устанавливающим нормативы (например, ВМО);
(ii) провести анализ особенностей изучаемого материала, задачи или уровня знаний, являющихся предметом данного процесса обучения;
(iii) провести обзор характеристик студентов: уровня их квалификации, опыта работы, языковых возможностей, определённых проблем;
(iv) провести оценку необходимого уровня профессиональной подготовки (Кому из студентов потребуется уделить особое внимание?);
(v) определить цели процесса обучения (Какие должны быть результаты? Каким образом их можно измерить?);



Этапы процесса профессионального обучения

(b) подготовительная работа:
(i) выбрать содержание курса: собрать информацию, организовать ее в логической последовательности;
(ii) определить методы и средства обучения: обеспечить соответствие каждой конкретной теме для того, чтобы создать и поддерживать интерес к обучению (см. Раздел 5.4.5);
(iii) подготовить план учебного процесса: составить подробный план с указанием сроков для каждого вида деятельности;
(iv) спланировать оценку результатов: какая информация требуется и как ее собрать? Выбрать метод и подготовить вопросы или задания;

(c) осуществление:
(i) проводить занятия как указано в плане процесса обучения;
(ii) поощрять активное обучение и участие студентов в работе;
(iii) использовать все многообразие методов;
(iv) использовать наглядные показы и вспомогательные визуальные средства;

(d) оценка:
(i) провести запланированную оценку выполнения поставленных целей;
(ii) суммировать результаты;
(iii) провести обзор всего процесса обучения для оценки его эффективности;
(iv) рассмотреть вопрос о возможных улучшениях содержания и процесса проведения занятий;
(v) зафиксировать сделанные выводы;
(vi) учесть отзывы прошедших курс студентов при планировании следующего учебного процесса.

Процесс профессионального обучения будет более эффективным, если тщательно и систематически прорабатывать все эти этапы.

5.4.4 Эффективность профессионального обучения

5.4.4.1 Целенаправленное профессиональное обучение

Учитывая ограниченность ресурсов, выделяемых на профессиональное обучение, для обеспечения его максимальной эффективности следует предпринимать действительно значительные усилия. Учебные занятия и средства должны быть направлены на повышение отдачи от обучения нужного персонала в оптимальные сроки. Так, например, обучение за слишком короткие сроки может оказаться просто потерей ресурсов, направление управляющего персонала на курсы для технического обслуживающего персонала было бы нецелесообразным, точно так же, как бессмысленно обучать людей за 12 месяцев до того, как они получат доступ к новой технологии.

Возможности и методы профессионального обучения следует выбирать так, чтобы они наилучшим образом соответствовали требованиям в отношении тех знаний и навыков, которые необходимо передать обучаемым, а также личностному профилю обучаемых с учетом их образовательного уровня и

национальных особенностей. Для обеспечения максимальной эффективности необходимо проводить оценку результатов профессионального обучения.

5.4.4.2 Оценка профессионального обучения

Оценка – это процесс получения определенной информации и предоставления ее тем лицам и органам, которые в дальнейшем могут оказать влияние на процесс профессионального обучения. В зависимости от того, каким из нижеперечисленных организаций и категорий лиц необходима такая информация, могут применяться несколько подходов к оценке результатов обучения:

(a) ВМО. Данная организация заинтересована в повышении качества данных, собираемых в рамках Глобальной системы наблюдений. Она разрабатывает программы профессионального обучения, создает фонды и использует услуги экспертов, главным образом для повышения квалификации персонала в развивающихся странах;

(b) национальная метеорологическая служба. Любой национальной метеорологической службе необходимы качественные метеорологические данные, и поэтому она заинтересована в повышении общего потенциала подразделения, занимающегося получением данных и конкретными задачами по эксплуатации приборов при некоторых ограничениях численности персонала. Она заинтересована в эффективном использовании бюджета и экономичности расходов при осуществлении программ профессионального обучения;

(c) департамент профессионального обучения или региональный учебный центр. Каждый департамент профессионального обучения или региональный учебный центр заинтересован в разработке таких программ профессионального обучения, которые были бы направлены на достижение установленных целей в рамках согласованного бюджета. Их преподаватели должны знать, насколько эффективны применяемые ими методы для достижения этих целей и каким образом их можно усовершенствовать;

(d) руководители в инженерно-технических областях. Подобного рода руководители заинтересованы в получении таких рабочих навыков, которые позволяли бы им надлежащим образом выполнять свои функции в зонах ответственности без потери времени или материальных средств;

(e) обучающиеся. Все обучающиеся заинтересованы в получении удовлетворения от своей работы и соответствующих вознаграждений, что приходит с повышением уровня компетентности. Они хотят, чтобы учебные курсы отвечали их потребностям и ожиданиям.

Таким образом, эффективность процесса профессионального обучения должна оцениваться на нескольких уровнях. Национальные и региональные учебные центры могут проводить оценку своих программ как ежегодно, так и один раз в три года, сравнивая количество обучавшихся на различных курсах и уровень знаний при сдаче экзаменов в сопоставлении с размером бюджетных средств и целями, поставленными в начале каждого периода обучения. Преподавателям необходимо проводить оценку адекватности и эффективности содержания и методов преподавания их предметов.

5.4.4.3 Виды оценки

Виды оценки включают следующее:

(a) отчет о профессиональном обучении. Данный отчёт не является попыткой оценить эффективность, а представляет собой фактическое сообщение о, например, видах и количестве проведенных курсов, их датах и продолжительности, числе обучавшихся, получивших профессиональную подготовку и повысивших свою квалификацию, и об общей стоимости этого обучения. В некоторых случаях требуется отчет об оценке способностей конкретного студента;

(b) оценка ответной реакции. Служит для определения того, каким образом обучающиеся реагируют на программу обучения. Она может быть в форме напечатанного вопросника, в который обучающиеся в конце курса ставят очки, соответствующие их мнениям об адекватности, содержании, методах, учебных пособиях, работе преподавателей и администрации. Однако такой метод оценки не может улучшить то обучение, которое они уже прошли. Поэтому необходимо в течение каждого курса профессионального обучения регулярно проводить обзоры и узнавать мнения студентов в ходе обсуждений в группах. Это позволит преподавателю обнаруживать любые возникающие в процессе обучения проблемы или узнавать об индивидуальных потребностях студентов и затем принимать надлежащие меры;

(c) оценка знаний. Служит для определения тех новых знаний и профессиональных навыков, которые обучавшийся получил в процессе профессиональной подготовки; при этом, объём полученных новых знаний лучше всего определять методом сравнения с уровнем знаний, продемонстрированным при тестировании перед началом обучения. Для проверки знаний обучающихся можно разработать различные формы письменных тестов (эссе, вопросы, подразумевающие краткие ответы, вопросы типа „правильно или неправильно», вопросы с возмож-

ностью выбора ответа из нескольких вариантов, построение диаграмм или блок-схем). Обучающиеся могут на практике проверить и оценить свои знания. Профессиональные навыки лучше всего проверяются путем постановки какой-либо конкретной задачи или путем наблюдения во время профессионального обучения на рабочих местах (WMO, 1990). Лица, оценивающие знания, могут пользоваться контрольным перечнем действий и навыков (формуляр наблюдений), которые необходимы для выполнения той или иной конкретной задачи;

(d) оценка эффективности. Позволяет определить, как изменилась эффективность работы обучавшегося через некоторое время после прохождения им профессионального обучения; при этом, новый уровень эффективности работы обучавшегося лучше всего определять методом сравнения с уровнем эффективности, продемонстрированным им при тестировании перед началом обучения. Такая оценка может проводиться работодателем с использованием, например, формуляра наблюдений по меньшей мере в течение шести недель после окончания обучения. Учебное заведение также может провести эту оценку, послав вопросники как работодателю, так и лицу, прошедшему обучение;

(e) оценка влияния обучения. Служит для определения эффективности обучения путем выяснения того, какие изменения произошли в какой-либо организации или рабочей группе. Для проведения этой оценки может потребоваться предварительное планирование, а также сбор базисных данных до начала конкретного курса профессионального обучения и после него. В качестве некоторых видов оценки можно назвать следующие: неправильные данные и отсутствие ряда данных в метеорологических сводках, период времени, необходимый для установки оборудования, и стоимость установки оборудования.

5.4.4.4 Профессиональная подготовка преподавателей

Преподаватели также нуждаются в постоянном обучении, с тем чтобы быть в курсе новых достижений технологии, знакомиться с новыми методами и средствами обучения и получать возможность свежим взглядом посмотреть на свою работу. В ежегодном бюджете НМГС следует предусматривать средства на профессиональное обучение преподавательского состава НМГС, возможно, в порядке ротации.

В качестве некоторых вариантов можно назвать: самообразование; краткосрочные курсы (включая навыки преподавания), проводимые техническими институтами; направление на обучение для повышения квалификации; посещения производственных цехов изготовителей метеорологического оборудования; посещения и работа в качестве командированных специалистов в других НМГС и РЦП, а также участие в организованных ВМО и другими организациями учебных и технических конференциях.

5.4.5 Методы и средства обучения

В приведенном ниже перечне лишь кратко излагаются методы обучения, которые могут служить в качестве памятки, и возможности их применения (более подробные сведения можно найти во многих других источниках, таких, как работы Moss (1987) и Craig (1987)):

(a) конкретное исследование:
  (i) перед отдельными лицами или группой лиц ставится конкретная проблема из реальной жизни или проект развития, которые они должны исследовать;
  (ii) для представления полученных результатов можно предложить использовать официальную документацию, применяемую в реальной ситуации;

(b) лекции в классе:
  (i) этот метод лучше всего подходит для понимания информации, усваиваемой наилучшим образом в устной и письменной форме: базисные знания, теоретические идеи, расчеты, процедуры;
  (ii) очень полезными дополнительными средствами при этом могут служить визуальные средства и отдельные печатные материалы, раздаваемые присутствующим;
  (iii) следует предусматривать достаточно времени для ответов на вопросы и проведение обсуждений;
  (iv) лекции можно рассматривать как слишком пассивный метод обучения;

(c) обучение с использованием компьютеров:
  (i) при проведении такого обучения используется способность персонального компьютера хранить большое число текстов и изображений, запрограммированных в последовательности, пригодной для обучения, часто с некоторыми элементами интерактивного выбора студентами на основе использования перечней, содержащихся в меню, и клавишей для осуществления выбора на экране;
  (ii) логические условия и структуры ветвления и замкнутых циклов в программе моделируют процессы обучения с выбором той темы для изучения, которая отвечает потребностям конкретного студента, с представлением

нужной информации, с проверкой понимания материала студентом на основе выбора им вариантов ответов и с направлением ему обратно проверенного материала; и так до тех пор, пока не будет получен правильный ответ;

(iii) некоторые компьютерные языки, например ToolBook для персональных компьютеров типа IBM PC и HyperCard для компьютеров Macintosh, разработаны специально для составления и представления интерактивных курсов профессионального обучения в рамках так называемой гиперсреды;

(iv) в современных системах используются экраны с цветной графикой, и на них могут быть представлены графики и диаграммы, статические изображения и короткие движущиеся последовательности, при этом графический интерфейс пользователя используется для улучшения интерактивной связи между студентом и программой;

(v) на компьютере могут быть промоделированы полномасштабные системы метеорологических приборов, например система аэрологического зондирования;

(vi) сложные системы могут включать плеер DVD либо лазерных видеодисков или наборы CD-ROM, на которых постоянно хранится значительное количество текстовой информации и последовательности движущихся изображений;

(vii) затраты на разработку программного обеспечения и капитальные затраты на системы обучения с использованием компьютеров могут быть разными, от умеренных до очень значительных; такие системы постепенно приходят на смену учебным вспомогательным средствам, основанным на использовании мультимедиа и видео;

(d) курсы заочного обучения:

(i) обычно курсы такого типа представляют собой уроки с упражнениями или заданиями, которые периодически посылаются студентам по почте;

(ii) преподаватель выставляет отметки за выполненные задания и возвращает их студентам вместе со следующими уроками;

(iii) иногда студенты могут обсуждать возникшие трудности со своим преподавателем по телефону;

(iv) некоторые курсы могут предусматривать использование аудио- или видеопленок или компьютерных дисков при условии, что студенты имеют доступ к нужному оборудованию;

(v) в конце таких курсов могут быть организованы экзамены в учебном центре;

(e) наглядные методы:

(i) преподаватель демонстрирует различные технические приемы в лаборатории или в рабочей ситуации;

(ii) такие наглядные показы необходимы для первоначального обучения процедурам ручного обслуживания и калибровки;

(iii) студентам должна быть обеспечена возможность самим осуществить изучаемые процедуры и задать вопросы;

(f) дистанционное обучение:

(i) студенты проходят курс профессионального обучения, находясь в местах своего проживания, в отдалении от учебного центра и преподавателя, и, как правило, частично в течение рабочего дня и в свободное от работы время;

(ii) такое обучение может производиться на индивидуальной или групповой основе;

(iii) некоторые учебные заведения специализируются на предоставлении услуг по дистанционному обучению;

(iv) дистанционное обучение в настоящем разделе представлено заочными курсами, телевизионными лекциями и дистанционным обучением с использованием средств телесвязи;

(g) дистанционное обучение с использованием средств телесвязи:

(i) класс студентов связан с помощью специального телефонного оборудования с находящимся на расстоянии преподавателем. Они изучают печатные тексты. Каждый студент имеет микрофон, который позволяет ему вступать в дискуссии, вести диалог вопрос — ответ. При этом могут использоваться любые надежные средства связи, включая спутники; очевидно, однако, что может возникнуть вопрос о затратах на связь;

(ii) в более сложных и дорогостоящих системах каждый студент имеет компьютер, соединенный посредством компьютерной сети с компьютерами других студентов и с компьютером находящегося на расстоянии преподавателя; или преподаватель ведет обучение из специальной телевизионной студии и появляется на телевизионном экране в находящейся на расстоянии классной комнате, в которой также установлены телекамера и микрофоны, позволяющие преподавателю видеть и слышать студентов;

(h) упражнения и задания:

(i) упражнения и задания часто следуют за лекцией или наглядным показом;

(ii) они носят обязательный характер, с тем чтобы студенты могли активно усваивать и применять новые знания;
(iii) задание может включать как научно-исследовательскую работу, так и выполнение практических задач;

(i) наглядные экспонаты:
(i) они представляют собой специально подготовленные визуально воспроизводимые материалы и модели, которые студенты могут изучать;
(ii) их полезно использовать для воссоздания общей ситуации в тех случаях, когда реальная ситуация является сложной или реальная среда находится на значительном удалении от мест обучения;

(j) обучение в полевых условиях и посещения:
(i) обучающиеся проводят наблюдения и изучают измерительные системы в полевых условиях, что особенно полезно во время установки, обслуживания или калибровки приборов;
(ii) посещения цехов изготовителей метеорологического оборудования и других метеорологических служб необходимы для расширения технических знаний специалистов;

(k) обсуждение/решение задач в группах:
(i) класс подразделяется на небольшие группы, состоящие из четырех – шести человек;
(ii) руководитель группы должен обеспечивать активное участие всех обучающихся;
(iii) высказанные идеи записываются или регистрируются на доске, которую видит вся группа;
(iv) на первом этапе коллективной „мозговой» атаки, все высказанные идеи принимаются без какой-либо критики; затем группа изучает каждую идею подробно и классифицирует ее по степени полезности;

(l) ротация на рабочих местах/командировки:
(i) согласно учебному расписанию, студенты выполняют различные задачи в рамках разнообразных обязанностей, часто под контролем разных преподавателей или руководителей, с тем чтобы они могли приобрести как можно больше опыта работы;
(ii) студенты могут быть командированы на какой-то фиксированный срок в другой департамент, компанию-изготовитель приборов или в другую метеорологическую службу для приобретения опыта работы, который нельзя получить в их департаменте или службе;
(iii) студенты, направляемые в командировки по международной линии, должны быть очень способными и, как правило, иметь поддержку в рамках двусторонних соглашений или по линии стипендий;

(m) программы мультимедиа:
(i) в данных программах используются диапозитивы для проецирования, видеоленты и компьютерные диски типа DVD и CD-ROM;
(ii) для них требуется доступ к дорогостоящему оборудованию, которое должно быть совместимым с медиа;
(iii) их можно использовать для проведения классных или индивидуальных занятий;
(iv) эти программы должны включать упражнения, вопросы и темы для обсуждений;
(v) в том, что касается обеспечения в области метеорологических приборов, имеется ограниченное количество материалов;

(n) обучение „один на один»:
(i) преподаватель работает с одним студентом, который нуждается в профессиональной подготовке в какой-либо конкретной области;
(ii) данный метод может применяться для обучения как отстающих, так и успевающих студентов;

(o) обучение на рабочих местах:
(i) это чрезвычайно важный компонент процесса обучения, при котором обучающийся учится применять приобретенные теоретические знания и навыки для решения самых разных задач и проблем, с которыми приходится сталкиваться специалисту. Все профессиональные навыки усваиваются наилучшим образом на практике;
(ii) некоторые виды профессионального обучения лучше всего проводить непосредственно на рабочих местах после необходимых разъяснений и предупреждений. К ним относятся все те профессиональные действия, которые требуют очень умелого обращения с приборами и для обучения которым потребовалось бы воспроизводить соответствующие условия или оборудование в лаборатории или мастерской, что связано со значительными трудностями и финансовыми затратами. В качестве примеров можно назвать действия по установке оборудования, некоторые операции по обслуживанию и сложные виды калибровки;
(iii) данный вид профессионального обучения позволяет использовать имеющиеся людские ресурсы и оборудование и не

требует организации поездок, привлечения специальных преподавателей или использования специальных помещений; этот вид обучения соответствует местным потребностям. Он особенно уместен в тех случаях, когда потребность в практических навыках значительно перевешивает потребность в теоретической подготовке, как, например, в случае профессиональной подготовки техников;

(iv) риски при этом заключаются в том, что из-за отсутствия других методов подготовка на рабочих местах может рассматриваться как „естественный» метод подготовки, в то время как для формирования высококвалифицированных специалистов требуется более сложная профессиональная подготовка, включающая значительный теоретический компонент; что к обучению могут быть привлечены обучающиеся с посредственными способностями; что это обучение может носить слишком узкий характер и при этом могут возникать значительные проблемы в профессиональных знаниях или навыках; и что эффективность обучения в этом случае нельзя объективно оценить;

(v) успех профессионального обучения на рабочих местах обуславливается наличием следующих компонентов:

a. плана профессионального обучения, определяющего те профессиональные навыки, которые должны быть получены;
b. содержания работы, охватывающего необходимую область;
c. руководителя работы, являющегося хорошим преподавателем, разбирающимся в данной теме, с хорошим стилем преподавания, терпеливого и умеющего стимулировать обучающихся;
d. надлежащей теоретической подготовки, являющейся основой для практической подготовки;
e. дневника работы обучающегося, в котором он мог бы регистрировать полученные знания и навыки;
f. регулярного обзора руководителем профессионального обучения достигнутых успехов;
g. объективной оценки приобретенных знаний и навыков (путем наблюдения или тестирования);

(p) профессиональное обучение по принципу совместных действий:

(i) данный вид профессионального обучения дает возможность студентам активно взаимодействовать в ходе учебного процесса, делиться знаниями и опытом;
(ii) студенты объединяются в команды или группы и выбирают своих лидеров;
iii) данный вид профессионального обучения используется для выработки идей, решения задач, составления планов, разработки проектов и осуществления профессиональной подготовки руководящего персонала;

(q) обучение по принципу равного участия:

(i) данный вид обучения зависит от того, проходили ли студенты ранее совместное обучение и подготовку;
(ii) в небольших группах студенты по очереди принимают на себя роль преподавателя, в то время как остальные студенты учатся и задают вопросы;

(r) запрограммированное обучение:

(i) данный вид обучения полезен для студентов, находящихся вдали от преподавателей или учебных заведений;
(ii) студенты работают индивидуально, каждый своим темпом, используя структурированные тексты, мультимедиа или курсы с использованием компьютеров;
(iii) каждый этап обучения предусматривает самопроверку и исправление ошибок перед переходом к следующей теме;
(iv) подготовка учебных материалов является дорогостоящим мероприятием, и поэтому варианты курсов могут быть ограничены.

Хорошее преподавание имеет гораздо большее значение, чем дорогостоящие учебные средства.

5.4.6 Телевизионные лекции

Некоторые учебные заведения, которые обеспечивают в основном внеаудиторные занятия, читают лекции своим студентам-заочникам путем вещания по специальному телевизионному каналу либо в определенные периоды времени по какому-либо коммерческому каналу.

5.4.7 Видеопрограммы

Видеопрограммы являются хорошим средством профессионального обучения, что подтверждается следующими фактами:

(a) видеопрограммы являются хорошим средством для регистрации и неоднократного наглядного показа процедур, когда доступ к измерительным системам и услугам квалифицированного преподавателя ограничен;

(b) в таких программах могут быть предусмотрены паузы для постановки вопросов, которые необходимо обсудить;

(c) для получения наилучших результатов видеопрограммы можно использовать совместно с дополнительными печатными текстами и обсуждениями в группах;

(d) несмотря на то, что профессионально сделанные видеопрограммы стоят дорого, и количество материалов по метеорологическим приборам ограничено, полезные технические видеоматериалы для местного использования при небольших затратах на оборудование могут быть подготовлены и любителями; при этом важно тщательно спланировать действия и затем добавить звуковую дорожку.

5.5 Методика сбора данных

Организационный комитет должен согласовать соответствующие процедуры сбора данных, такие как частота проведения измерений, выборка данных, осреднение, предварительная обработка данных, форматы данных, оперативный контроль качества и пр. В случае, если сводки данных должны предоставляться участниками в ходе взаимных сравнений или если имеются данные в виде записи на ленте самописца или визуального снятия показаний, организационный комитет должен принять решение об ответственности за проверку этих данных, о периоде времени, в течение которого эти данные должны быть предоставлены в распоряжение руководителя проекта, и о форматах и носителях, которые позволят хранить эти данные в базе данных страны-организатора. По возможности, должны проводиться непосредственные сравнения с показаниями образцового референтного прибора.

5.6 График взаимных сравнений

Организационный комитет должен принять решение в отношении содержания графика проведения взаимных сравнений, включая обычные и специальные задачи, и подготовить временную диаграмму. Подробный график должен быть в дальнейшем подготовлен руководителем проекта.

6. ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ ДАННЫХ

6.1 База данных и доступность данных

6.1.1 Все необходимые данные взаимных сравнений, включая сопутствующие метеорологические данные и данные о состоянии окружающей среды, должны храниться в базе данных для дальнейшего анализа под наблюдением руководителя проекта. Организационный комитет совместно с руководителем проекта должен предложить единый формат для всех данных, включая те данные, которые сообщаются участниками в ходе взаимных сравнений. Организационный комитет должен принять решение о мониторинге данных и проверке проведения контроля качества данных почти в реальном масштабе времени для обеспечения достоверности базы данных.

6.1.2 По завершении взаимных сравнений страна-организатор должна по запросу предоставить каждой стране-участнице комплект данных, полученных с предоставленных ею приборов. Этот комплект также должен содержать сопутствующие метеорологические данные, а также данные о состоянии окружающей среды и образцовых приборах.

6.2 Анализ данных

6.2.1 Организационный комитет должен предложить основные принципы анализа и обработки данных и представления результатов. Он должен утвердить методы преобразования данных, алгоритмы калибровки (поверки) и внесения поправок, а также подготовить перечень терминов, определений, сокращенных наименований и соотношений (если они отличаются от общепринятой, документально оформленной практики). Он должен тщательно обдумать и подготовить всестороннее описание предложенных статистических методов, которые соответствуют достижению целей взаимных сравнений.

6.2.2 В случае, когда невозможно провести прямые, синхронизированные во времени сравнения приборов один на один (например, в случае разнесения в пространстве испытываемых приборов), следует применять методы анализа, основанные на статистическом распределении. В тех случаях, когда не существует эталонов (например, при измерении нижней границы облачности, метеорологической дальности видимости и пр.), приборы должны сравниваться с относительным референтным прибором, выбранным из числа испытываемых приборов, основываясь на срединных или наивероятнейших значениях; при этом следует обращать внимание на исключение нерепрезентативных значений из выборочного подкомплекта данных.

6.2.3 Всякий раз, когда второе взаимное сравнение проводится спустя некоторое время после первого или в последующей фазе текущего взаимного сравнения, следует применять методы анализа и представления данных, которые использовались на первом этапе. Это не должно исключать добавления новых методов.

6.2.4 Как правило, руководитель проекта должен отвечать за обработку и анализ данных. Он должен как можно быстрее проверить пригодность отобранных процедур анализа и, по мере необходимости, готовить промежуточные отчеты для получения комментариев от членов организационного комитета. На основе этих обзоров должен рассматриваться вопрос о необходимости внесения изменений.

6.2.5 По завершении взаимных сравнений организационный комитет должен рассмотреть результаты и анализ данных, представленные руководителем проекта. Он должен обратить особое внимание на рекомендации по использованию результатов взаимных сравнений и содержание окончательного отчета.

7. ОКОНЧАТЕЛЬНЫЙ ОТЧЕТ О ПРОВЕДЕНИИ ВЗАИМНЫХ СРАВНЕНИЙ

7.1 Организационный комитет должен подготовить проект содержания окончательного отчета и поручить руководителю проекта подготовить на его основе предварительный отчет.

7.2 Окончательный отчет о проведении взаимных сравнений должен содержать по каждому прибору краткое изложение основных характеристик точности измерений и рабочих характеристик. Результаты статистического анализа должны быть представлены либо в табличной, либо, в соответствующих случаях, графической форме. Временные ряды наблюдений должны рассматриваться по выборочным периодам, содержащим результаты, представляющие особую значимость. Стране-организатору следует предложить подготовить главу, описывающую базу данных и технические средства, использованные для обработки, анализа и хранения данных.

7.3 Организационный комитет должен согласовать процедуры утверждения окончательного отчета, например следующие:

(a) руководитель проекта готовит проект окончательного отчета и представляет его на рассмотрение всех членов организационного комитета, а также, в соответствующих случаях, стран-участниц;

(b) комментарии и дополнения должны быть представлены в установленные сроки в адрес руководителя проекта и в копии председателю организационного комитета;

(c) в случае, если предлагаются лишь незначительные поправки, отчет может быть доработан руководителем проекта и направлен в Секретариат ВМО для публикации;

(d) в случае значительных дополнений или возникновения серьезных проблем, которые невозможно решить по переписке, рассматривается вопрос о созыве дополнительного заседания организационного комитета (президент КПМН должен быть немедленно проинформирован о такой ситуации).

7.4 Организационный комитет может принять решение о представлении руководителем проекта и сотрудниками проекта промежуточных и окончательных результатов на технических конференциях.

8. ОБЯЗАТЕЛЬСТВА

8.1 Обязательства участников

8.1.1 Участники несут полную ответственность за транспортировку всего представленного оборудования, выполнение всех формальных процедур по импорту и экспорту своего оборудования, а также несут любые связанные с этим расходы. Следует точно придерживаться процедур импорта/экспорта во избежание задержек, связанных с этим процессом.

8.1.2 Участники сами устанавливают и демонтируют любое оборудование под наблюдением руководителя проекта, за исключением случаев, когда эту работу берет на себя страна-организатор.

8.1.3 Каждый участник предоставляет все необходимое вспомогательное и монтажное оборудование, сигнальные и силовые кабели и соединения (совместимые со стандартами страны-организатора), запасные части и расходные материалы для своего оборудования. Участник, нуждающийся в специальном или нестандартном источнике энергии, должен привезти с собой свой собственный преобразователь или адаптер. Участники предоставляют все подробные инструкции и наставления, необходимые для установки, эксплуатации, калибровки и повседневного обслуживания приборов.

8.2 Поддержка от страны-организатора

8.2.1 Страна-организатор должна предоставить по запросу необходимую информацию странам-участницам о временных и постоянных (в случае расходных материалов) процедурах, связанных с импортом и экспортом. Она должна оказывать помощь в распаковке и установке оборудования участников и предоставить помещения или шкафы для размещения оборудования, требующего защиты

от атмосферных воздействий, и для хранения запасных частей, наставлений, расходных материалов и пр.

8.2.2 Страна-организатор должна предоставить достаточное количество вспомогательного оборудования или сооружений, таких как вышки, укрытия, основания или фундаменты.

8.2.3 Должна быть предоставлена подача необходимой электроэнергии для всех приборов. Участники должны быть информированы о напряжении и частоте тока в сети и их стабильности. Подсоединение приборов к системе сбора данных и к источнику питания проводится совместно с участниками. Руководитель проекта должен согласовать с каждым участником вопрос о предоставлении участником либо страной-организатором силовых и сигнальных кабелей достаточной длины (и с соответствующими соединениями).

8.2.4 Страна-организатор отвечает за получение официального разрешения на проведение измерений в атмосфере, например использование частот, использование лазерного излучения, за выполнение гражданского и авиационного законодательства и пр. Каждый участник должен предоставить необходимые документы по запросу руководителя проекта.

8.2.5 Страна-организатор может предоставить информацию о размещении участников, переездах, местном транспорте, ежедневном материально-техническом обеспечении и пр.

8.3 Обслуживание, предоставляемое страной-организатором

8.3.1 Страна-организатор предоставляет оператора для повседневного обслуживания приборов только в случае проведения продолжительных сравнений, для которых оправдано отсутствие участников или их представителей.

8.3.2 Когда страна-организатор отвечает за предоставление операторов по обслуживанию, она должна:

(a) предоставить обычного оператора для обслуживания каждого прибора, например для его чистки, смены ленты самописца и повседневных корректировок, как указано в предоставленных участником инструкциях по эксплуатации;

(b) ежедневно проверять каждый прибор, участвующий во взаимных сравнениях, и немедленно информировать назначенное ответственное лицо, представляющее участника, о любых неисправностях, которые нельзя устранить с помощью обычного обслуживания;

(c) предпринять все усилия для проведения периодических калибровок и поверок приборов в соответствии с подробными инструкциями участника.

8.3.3 Руководитель проекта должен вести в журнале регулярную регистрацию функционирования всего оборудования, участвующего во взаимных сравнениях. Этот журнал должен содержать замечания обо всем происходящем, что может оказать влияние на проведение взаимных сравнений, обо всех событиях, связанных с участвующими приборами, а также с оборудованием и техническими средствами, предоставленными страной-организатором.

9. ПРАВИЛА В ХОДЕ СРАВНЕНИЙ

9.1 Руководитель проекта осуществляет общий контроль за ходом взаимных сравнений от имени организационного комитета.

9.2 Никакие изменения в аппаратном оборудовании и программном обеспечении не разрешаются без согласия руководителя проекта.

9.3 Незначительные ремонтные работы, такие как замена предохранителя, разрешаются по согласованию с руководителем проекта.

9.4 Калибровки, поверки и техническое обслуживание приборов участниками, которые требуют специальных знаний или специального оборудования, будут разрешаться в соответствии с заранее установленными процедурами.

9.5 По всем вопросам, возникающим в ходе проведения сравнений в отношении оборудования участников, следует обращаться к руководителю проекта.

9.6 Руководитель проекта может выбрать период в течение взаимных сравнений, во время которого прибор будет работать с увеличенными интервалами между обычным регулярным обслуживанием, чтобы оценить подверженность оборудования влиянию окружающей среды. Такие же увеличенные интервалы будут применяться ко всем приборам.

ПРИЛОЖЕНИЕ 4.C
ОТЧЕТЫ О МЕЖДУНАРОДНЫХ СРАВНЕНИЯХ, ПРОВЕДЕННЫХ ПОД ЭГИДОЙ КОМИССИИ ПО ПРИБОРАМ И МЕТОДАМ НАБЛЮДЕНИЙ

Тема	*Номер отчета о приборах и наблюдениях*	*Название отчета*
Продолжительность солнечного сияния	16	*Radiation and Sunshine Duration Measurements: Comparison of Pyranometers and Electronic Sunshine Duration – Recorders of RA VI* (Budapest, Hungary, July–December 1984), G. Major, WMO/TD-No. 146 (1986).
Радиация[a]	16	*Radiation and Sunshine Duration Measurements: Comparison of Pyranometers and Electronic Sunshine Duration Recorders of RA VI* (Budapest, Hungary, July–December 1984), G. Major, WMO/TD-No. 146 (1986).
Осадки	17	*International Comparison of National Precipitation Gauges with a Reference Pit Gauge* (1984), B. Sevruk and W.R. Hamon, WMO/TD-No. 38 (1984).
Радиозонды	28	*WMO International Radiosonde Comparison, Phase I* (Beaufort Park, United Kingdom, 1984), A.H. Hooper, WMO/TD-No. 174 (1986).
Радиозонды	29	*WMO International Radiosonde Intercomparison, Phase II* (Wallops Island, United States, 4 February–15 March 1985), F.J. Schmidlin, WMO/TD-No. 312 (1988).
Радиозонды	30	*WMO International Radiosonde Comparison* (United Kingdom, 1984/United States, 1985), J. Nash and F.J. Schmidlin, WMO/TD-No. 195 (1987).
Высота нижней границы облачности	32	*WMO International Ceilometer Intercomparison* (United Kingdom, 1986), D.W. Jones, M. Ouldridge and D.J. Painting, WMO/TD-No. 217 (1988).
Влажность	34	*WMO Assmann Aspiration Psychrometer Intercomparison* (Potsdam, German Democratic Republic, 1987), D. Sonntag, WMO/TD-No. 289 (1989).
Влажность	38	*WMO International Hygrometer Intercomparison* (Oslo, Norway, 1989), J. Skaar, K. Hegg, T. Moe and K. Smedstud, WMO/TD-No. 316 (1989).
Радиозонды	40	*WMO International Radiosonde Comparison, Phase III* (Dzhambul, USSR, 1989), A. Ivanov, A. Kats, S. Kurnosenko, J. Nash and N. Zaitseva, WMO/TD-No. 451 (1991).
Видимость	41	*The First WMO Intercomparison of Visibility Measurements* (United Kingdom, 1988/1989), D.J. Griggs, D.W. Jones, M. Ouldridge and W.R. Sparks, WMO/TD-No. 401 (1990).
Радиация[a]	43	*First WMO Regional Pyrheliometer Comparison of RA II and RA V* (Tokyo, Japan, 23 January–4 February 1989), Y. Sano, WMO/TD-No. 308 (1989).
Радиация[a]	44	*First WMO Regional Pyrheliometer Comparison of RA IV* (Ensenada, Mexico, 20–27 April 1989), I. Galindo, WMO/TD-No. 345 (1989).
Давление	46	*The WMO Automatic Digital Barometer Intercomparison* (de Bilt, Netherlands, 1989–1991), J.P. van der Meulen, WMO/TD-No. 474 (1992).
Радиация[a]	53	*Segunda Comparaci n de la OMM de Pirheli metros Patrones Nacionales AR III* (Buenos Aires, Argentina, 25 November–13 December 1991), M. Ginzburg, WMO/TD-No. 572 (1992).
Радиозонды	59	*WMO International Radiosonde Comparison, Phase IV* (Tsukuba, Japan, 15 February–12 March 1993), S. Yagi, A. Mita and N. Inoue, WMO/TD-No. 742 (1996).
Ветер	62	*WMO Wind Instrument Intercomparison* (Mont Aigoual, France, 1992–1993), P. Gregoire and G. Oualid, WMO/TD-No. 859 (1997).
Радиация[a]	64	*Tercera Comparaci n Regional de la OMM de Pirheli metros Patrones Nacionales AR III – Informe Final* (Santiago, Chile, 24 February–7 March 1997), M.V. Mu oz, WMO/TD-No. 861 (1997).
Осадки	67	*WMO Solid Precipitation Measurement Intercomparison – Final Report*, B.E. Goodison, P.Y.T. Louie and D. Yang, WMO/TD-No. 872 (1998).

Тема	*Номер отчета о приборах и наблюдениях*	*Название отчета*
Текущая погода	73	*WMO Intercomparison of Present Weather Sensors/Systems – Final Report* (Canada and France, 1993–1995), M. Leroy, C. Bellevaux, J.P. Jacob, WMO/TD-No. 887 (1998)
Радиозонды	76	*WMO Intercomparison of GPS Radiosondes – Executive Summary* (Alcant ra, Maranh o, Brazil, 20 May–10 June 2001), R.B. da Silveira, G. Fisch, L.A.T. Machado, A.M. Dall'Antonia Jr., L.F. Sapucci, D. Fernandes and J. Nash, WMO/TD-No. 1153 (2003).
Радиозонды	83	*WMO Intercomparison of Radiosonde Systems,* Vacoas, Mauritius, 2–25 February 2005, J. Nash, R. Smout, T. Oakley, B. Pathack and S. Kurnosenko, WMO/TD-No. 1303 (2006).
Интенсивность дождевых осадков	84	*WMO Laboratory Intercomparison of Rainfall Intensity Gauges* – Final Report, France, The Netherlands, Italy, September 2004–September 2005, L. Lanza, L. Stagi, M. Leroy, C. Alexandropoulos, W. Wauben, WMO/TD-No. 1304 (2006)
Влажность	85	*WMO Radiosonde Humidity Sensor Intercomparison – Final Report of Phase I and Phase II* Phase I: Russian Federation, 1995–1997 Phase II: USA, 8–26 September 1995, Phase I: A. Balagurov, A. Kats, N. Krestyannikova, Phase II: F. Schmidlin, WMO/TD-No. 1305 (2006)
Радиозонды	90	*WMO Intercomparison of GPS Radiosondes – Final Report*, Alcant ra, Brazil, 20 May to 10 June 2001, R. da Silveira, G. F. Fisc, L.A. Machado, A.M. Dall'Antonia Jr., L.F. Sapucci, D. Fernandes, R. Marques, J. Nash, WMO/TD-No. 1314 (2006)
Пиргелиометры	91	*International Pyrheliometer Comparison – Final Report*, Davos, Switzerland, 26 September–14 October 2005, W. Finsterle, WMO/TD-No. 1320 (2006)
Пиргелиометры	97	*Second WMO Regional Pyrheliometer Comparison of RA II* (Tokyo, 22 January–2 February 2007), H. Sasaki, WMO/TD-No. 1494 (2009)
Пиранометры	98	*Sub-Regional Pyranometer Intercomparison of the RA VI members from South-Eastern Europe* (Split, Croatia, 22 July–6 August 2007), K. Premec, WMO/TD-No. 1501 (2009)
Интенсивность дождевых осадков	99	WMO Field Intercomparison of Rainfall Intensity Gauges (Vigna di Valle, Italy, October 2007–April 2009), E. Vuerich, C. Monesi, L. Lanza, L. Stagi, E. Lanzinger, WMO/TD-No. 1504 (2009)
Влажность в психрометрической будке	106	*WMO Field Intercomparison of Thermometer Screens/Shields and Humidity Measuring Instruments*, Gharda a, Algeria, November 2008–October 2009 Final Report, M. Lacombe, D. Bousri, M. Leroy, M. Mezred, WMO/TD-No. 1579 (2011)
Радиозонды	107	*WMO Intercomparison of High Quality Radiosonde Systems*, Yangjiang, China, 12 July–3 August 2010, J. Nash, T. Oakley, H. V mel, LI Wei, WMO/TD-No. 1580 (2011)

a Отчеты о международных взаимных сравнениях пиргелиометров в рамках ВМО, проводимых Мировыми радиационным центром в Давосе, Швейцария, и организуемых с пятилетними интервалами, также распространяются ВМО.

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

International Electrotechnical Commission, 1990: *Classification of Environmental Conditions*. IEC 721.

International Organization for Standardization, 1989*a*: *Sampling Procedures for Inspection by Attributes*. – Part I: Sampling plans indexed by acceptable quality level (AQL) for lot-by-lot inspection. ISO 2859-1: 1989.

International Organization for Standardization, 1989*b*: *Sampling Procedures and Charts for Inspection by Variables for Percent Nonconforming*. ISO 3951: 1989.

International Organization for Standardization, 2007: *International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology.* Third edition, ISO Guide 99:2007.

Hoehne, W.E., 1971: *Standardizing Functional Tests*. NOAA Technical Memorandum, NWS T&EL-12, United States Department of Commerce, Sterling, Virginia.

Hoehne, W.E., 1972: Standardizng functional tests. *Preprints of the Second Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation*, American Meteorological Society, pp. 161–165.

Hoehne, W.E., 1977: *Progress and Results of Functional Testing*. NOAA Technical Memorandum NWS T&EL-15, United States Department of Commerce, Sterling, Virginia.

National Weather Service, 1980: *Natural Environmental Testing Criteria and Recommended Test Methodologies for a Proposed Standard for National Weather Service Equipment*. United States Department of Commerce, Sterling, Virginia.

National Weather Service, 1984: *NWS Standard Environmental Criteria and Test Procedures*. United States Department of Commerce, Sterling, Virginia.

World Meteorological Organization/International Council of Scientific Unions, 1986: *Revised Instruction Manual on Radiation Instruments and Measurements* (C. Fröhlich and J. London, eds). World Climate Research Programme Publications Series No. 7, WMO/TD-No. 149, Geneva.

World Meteorological Organization, 1989: *Analysis of Instrument Calibration Methods Used by Members* (H. Doering). Instruments and Observing Methods Report No. 45, WMO/TD-No. 310, Geneva.

ГЛАВА 5

ПРОФЕССИОНАЛЬНАЯ ПОДГОТОВКА СПЕЦИАЛИСТОВ ПО ПРИБОРАМ

5.1 ВВЕДЕНИЕ

5.1.1 Общие сведения

Поскольку научная и прикладная метеорология основана на непрерывных сериях измерений с использованием все более усложняющихся приборов и систем, настоящая глава посвящена профессиональной подготовке тех специалистов, которые занимаются планированием, технической конкретизацией, проектированием, установкой, калибровкой, обслуживанием и эксплуатацией метеорологических измерительных приборов и систем дистанционного зондирования. Настоящая глава предназначена для технических руководителей и преподавателей и в не меньшей степени для самих специалистов по приборам, которые хотели бы и далее совершенствоваться в своей профессии.

Профессиональная подготовка квалифицированного персонала имеет чрезвычайно важное значение для обеспечения необходимой и соответствующей технологии во всех странах, с тем чтобы Глобальная система наблюдений ВМО могла своевременно и экономично получать данные единого высокого качества. Однако в настоящее время от специалистов требуются не только технические навыки работы с приборами. Современная метеорология требует таких технических специалистов, которые способны действовать в качестве плановиков и руководителей проектов, обладают знаниями по телесвязи и по обработке данных, могут активно пропагандировать эффективные технические решения и имеют профессиональные навыки в области управления финансовыми средствами и людскими ресурсами. Таким образом, программы профессиональной подготовки квалифицированных специалистов по приборам или инженеров метеорологических измерительных систем должны быть универсальными и предусматривать профессиональный рост личности, обучение навыкам управления и специальным знаниям в области современных технологий.

Во многих странах под эгидой ВМО были созданы региональные учебные центры (РУЦ), многие из которых обеспечивают профессиональную подготовку по различным аспектам оперативной деятельности и управления в области приборов и измерительных систем. Перечень региональных учебных центров приведен в приложении. Аналогичным образом во многих пунктах были созданы региональные центры по приборам (РЦП) и региональные центры по морским приборам (РЦМП), и некоторые из них обеспечивают профессиональную подготовку кадров. Местонахождение и функции этих центров перечислены в приложении 1.А к главе 1 части I и приложении 4.А к главе 4 части II, и кратко рассматриваются в разделах 5.5.1.2 и 5.5.1.3.

5.1.2 Передача технологии

Профессиональная подготовка кадров является жизненно важной частью процесса передачи технологии, представляющего собой эволюционный процесс введения в эксплуатацию новых технических ресурсов с целью повышения качества продукции и снижения оперативных затрат. Для процесса внедрения новых ресурсов и их последующей оперативной эксплуатации и обслуживания требуются и новые профессиональные навыки. Таким образом, человеческий фактор является более важным для создания потенциала, чем технический материал.

Поскольку метеорология является глобальной дисциплиной, то одна из проблем в области передачи технологии состоит в существовании разрыва в технологии между развитыми и развивающимися странами. Разрабатывая стратегии, программы и изыскивая ресурсы для эффективной подготовки кадров, необходимо постоянно иметь в виду такую цель, как содействие развитию самоподдерживающихся технических инфраструктур и создание потенциала людских ресурсов в развивающихся странах.

5.1.3 Приемлемость для всех пользователей метеорологических приборов

В настоящей главе профессиональная подготовка кадров рассматривается главным образом как вопрос, имеющий значение для национальных гидрометеорологических служб. Однако те же принципы применимы и к любым другим организациям, которые проводят метеорологические измерения, независимо от того, обучают ли они сами свой персонал или планируют нанимать на работу квалифицированных специалистов со стороны. Если брать в целом все науки, связанные с наблюдением, то совершенно очевидно, что выгодно готовить

кадры таким образом, чтобы обеспечить стандартность процедур измерения и наиболее эффективное использование и обслуживание оборудования.

5.2 НАДЛЕЖАЩАЯ ПОДГОТОВКА КАДРОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОПЕРАТИВНЫХ ПОТРЕБНОСТЕЙ

5.2.1 Теория и практика

Измерения с использованием измерительных систем зависят от физических принципов (например, от теплового расширения ртути), позволяющих воспринимать переменные параметры атмосферы и затем преобразовывать их в стандартизированную форму, пригодную для пользователя, например в запись на ленте самописца или в электрический сигнал для подачи на автоматическую метеорологическую станцию. Для понимания процесса измерений теоретические основы должны отражать взаимодействие между приборами и теми количественными характеристиками, которые они должны измерять (репрезентативность или «экспозитарность»), а также ошибки приборов и наблюдений, которые имеют место при всех измерениях. Основные данные измерений часто проходят последующую обработку и кодируются более или менее сложными способами, что требует, таким образом, дальнейшего теоретического понимания; в качестве примеров можно назвать приведение значения атмосферного давления к среднему уровню моря и обработку аэрологических данных, полученных при полете радиозонда.

Осуществление измерений также зависит от практических навыков и знания того, каким образом установить и отрегулировать прибор для проведения стандартизированных измерений, как безопасно и аккуратно пользоваться им и как впоследствии провести любые расчеты или кодирование с минимальными ошибками.

Итак, знание теоретических и практических вопросов самым непосредственным образом влияет на получение данных измерений известного качества, поэтому персонал, занимающийся оперативной эксплуатацией и контролем измерительных систем, должен обладать теоретическими знаниями и практическими навыками, которые соответствуют сложности и значимости их работы. Инженеры, проектирующие или обслуживающие сложные измерительные системы, особенно нуждаются в высококлассной теоретической и практической профессиональной подготовке.

5.2.2 Обеспечение соответствия между квалификацией и выполняемыми задачами

Организациям следует обеспечивать такой уровень квалификации, профессиональных навыков и численность персонала или других нанятых работников (и, следовательно, профессиональной подготовки), которые соответствовали бы диапазону задач, поставленных перед ними. Например, профессиональная подготовка, необходимая для снятия показаний температуры воздуха в метеорологической будке Стивенсона, находится в нижней части диапазона необходимых профессиональных навыков, в то время как для понимания, установки, эксплуатации и обслуживания автоматических метеорологических станций, устройств для приема сигналов с метеорологических спутников и радиолокаторов требуется, несомненно, теоретическая и практическая профессиональная подготовка гораздо более высокого уровня.

Следовательно, для оперативных потребностей, найма персонала и обеспечения профессиональной подготовки полезно применять классификационную схему, отражающую различные уровни квалификации. При этом важными отправными точками можно считать национальные уровни квалификации в области технического образования, применяемые в той или иной конкретной стране. Для оказания содействия международному сообществу в деле достижения единого качества метеорологических данных в процессе их получения и обработки, ВМО рекомендует использовать свою классификацию персонала с указанием соответствующих обязанностей, которые он должен компетентно выполнять.

5.2.3 Классификация персонала ВМО

Согласно схеме классификации ВМО[1], существуют две общие категории персонала — специалисты с высшим образованием и техники (WMO, 2002*a*). Для метеорологического и гидрологического персонала эти категории определяются следующим образом: метеоролог и техник-метеоролог и, соответственно, гидролог и техник-гидролог. Рекомендуемая программа для каждого класса персонала включает значительный раздел, посвященный приборам и методам наблюдений, который соответствует степени образования, профессиональной подготовки и обязанностям персонала каждого уровня. В разработанной ВМО классификации персонала

[1] Схема классификации, одобренная Исполнительным Советом ВМО на его пятидесятой сессии (1998 г.) и утвержденная Всемирным метеорологическим конгрессом на его тринадцатой сессии (1999 г.).

приводятся также руководящие инструкции по содержанию работы, квалификации и уровням профессиональной подготовки, необходимым для специалистов по приборам. В разделе 7.3 публикации ВМО (WMO, 2002*a*) приводится пример требований к компетентности персонала, а в другом издании ВМО (WMO, 2002*b*) имеются образцы подробных учебных программ начальной подготовки и специального профессионального обучения метеорологического персонала. Подобные методические руководства позволяют надлежащим образом планировать и интерпретировать программы обучения и учебные курсы; они также помогают определять недостатки в профессиональных навыках и содействуют развитию сбалансированных национальных технических профессиональных ресурсов.

5.3 НЕКОТОРЫЕ ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ

5.3.1 Вопросы политики управления

5.3.1.1 Общая схема персонала

Важным моментом является наличие в национальных метеорологических службах общей схемы персонала, в которую были бы включены специалисты по приборам с указанием их роли в планировании, разработке и осуществлении надлежащих и экономически выгодных программ метеорологических наблюдений. В этой схеме все специалисты по приборам должны быть представлены в соответствии с дифференцированными уровнями (WMO, 2002*a*) их квалификации. Должна определяться нехватка тех или иных специалистов и затем приниматься меры для их найма и профессионального обучения.

5.3.1.2 Сохранение персонала

Необходимо принимать все возможные меры для сохранения редких технических специалистов по приборам, обеспечивая интересную для них с технической точки зрения рабочую среду, возможности для карьеры и ставки заработной платы, сопоставимые со ставками других технических специалистов как внутри, так и за пределами метеорологической службы.

5.3.1.3 Развитие кадровых ресурсов

Профессиональное обучение должно входить в общую схему персонала в качестве составной части. Введение новых видов технологии и смена оборудования требуют новых профессиональных знаний и навыков. Вновь нанятые работники нуждаются в профессиональном обучении, соответствующем их предыдущему опыту, а дефицит в специалистах можно преодолеть, расширив профессиональные знания и навыки другого персонала. Такое профессиональное обучение обеспечивает также и возможность для прогрессивного развития карьеры. Целесообразно иметь для каждого сотрудника краткое описание его карьеры, в котором были бы отражены его профессиональная подготовка, квалификация и продвижение по службе; такие сведения могут использоваться отделом по профессиональному обучению для планирования упорядоченного развития кадровых ресурсов.

5.3.1.4 Сбалансированная профессиональная подготовка

Целью национальных программ профессиональной подготовки должна быть сбалансированная подготовка специалистов всех классов, при этом особое внимание следует уделять таким фазам обучения, как профессиональное образование, дополнительное образование и повышение квалификации; такой подход позволяет получать устойчивую техническую инфраструктуру.

5.3.2 Цели и задачи программ профессиональной подготовки

Для получения максимальной отдачи от профессионального обучения чрезвычайно важно наметить общие цели и поставить конкретные задачи, на основе которых затем разрабатывать планы профессионального обучения, учебные программы и планировать расходы. При подготовке специалистов по приборам можно принимать во внимание следующие стратегические цели и задачи.

5.3.2.1 Для руководителей

Обучение управлению при подготовке специалистов по приборам должно предусматривать следующие цели и задачи, среди прочих:

a) повышение и сохранение качества информации в рамках всех программ метеорологических наблюдений;
b) создание для национальных метеорологических и гидрологических служб (НМГС) возможности опираться на свои собственные силы в области профессиональных знаний и навыков, необходимых для эффективного планирования, осуществления программ получения метеорологических данных и достижения результатов, а также возможности организовывать у себя службы эксплуатации измерительных систем, обеспе-

чивающие максимальную надежность, точность и экономию;

c) полное использование капитала, инвестированного в измерительные системы, в рамках их оптимального цикла эксплуатации.

5.3.2.2 Для преподавателей

Схема курсов профессиональной подготовки преподавателей должна преследовать следующие цели:

a) обеспечение сбалансированных программ профессионального обучения, которые отвечали бы конкретным потребностям стран каждого региона в специалистах с разной квалификацией на дифференцированных уровнях;

b) обеспечение эффективной передачи знаний и расширения профессиональных навыков в национальных метеорологических службах благодаря найму преподавателей соответствующей квалификации, хорошим учебным пособиям и средствам и эффективным методам обучения;

c) обеспечение контроля за эффективностью обучения с помощью надлежащих процедур оценки и составления отчетов;

d) обеспечение профессионального обучения при минимальных затратах.

5.3.2.3 Для преподавателей и специалистов по приборам

Общая задача при подготовке специалистов и инженеров по приборам (на дифференцированных уровнях профессиональной квалификации и опыта) заключается в том, чтобы научить их:

a) хорошо разбираться в назначении и правильно оценивать необходимую точность всех инструментальных измерений;

b) понимать и применять принципы правильного размещения защитных ограждений для приборов и самих приборов, с тем чтобы можно было получать ряды репрезентативных, однородных и сопоставимых данных;

c) приобретать профессиональные знания и навыки для проведения установки, регулировки и ремонта и осуществления такого обслуживания, которое обеспечивало бы максимальную надежность, точность и экономию при эксплуатации метеорологических приборов и систем;

d) диагностировать неисправности логически и быстро на основе наблюдаемых признаков и систематически отслеживать и устранять их причины;

e) определять источники ошибок в измерениях и обладать знаниями в области использования эталонов и процедур калибровки в целях сведения систематических ошибок к минимуму;

f) постоянно следить за появлением новых технологий и возможностями их применения и приобретать новые знания и профессиональные навыки путем обучения на специальных курсах и курсах повышения квалификации;

g) планировать и проектировать сети получения данных и управлять бюджетами и техническим персоналом;

h) руководить проектами, в которые вовлечены значительные финансовые, технические и людские ресурсы и которые характеризуются значительной технической сложностью;

i) модифицировать, совершенствовать, проектировать и изготавливать приборы для конкретных целей;

j) проектировать и использовать компьютерные системы, программное обеспечение и системы телесвязи, контролировать измерения, обрабатывать первичные данные измерений, преобразуя их в производные данные, и передавать закодированные сообщения.

5.3.3 Обучение обеспечению качества

Получение метеорологических данных является сложным и дорогостоящим видом деятельности, в который вовлечены людские и материальные ресурсы, средства связи и машинные расчеты. Необходимо стремиться к максимизации отдачи от полученной информации при минимизации финансовых и трудовых затрат, требующихся для такого рода деятельности.

Для получения высококачественных данных необходимо обеспечивать постоянный приток репрезентативных, точных и своевременных данных измерений в национальные центры обработки метеорологических данных при минимальных затратах. На каждом этапе профессионального технического обучения следует обеспечивать глубокое понимание того, каким образом весь персонал может влиять на качество конечного продукта. В рамках дисциплины общего управления качеством (Walton, 1986; Imai, 1986) рассматривается вся связанная с измерениями среда (применения, процедуры, приборы и персонал) с учетом того, насколько каждый из ее элементов может повлиять на качество. В рамках общего управления качеством деятельность по получению данных изучается как система или ряд процессов. Наиболее важные элементы каждого процесса, например временная задержка, подвергаются количественной оценке, и затем определяется, является ли статистически значимой вариация конкретного процесса. Небольшая группа людей, разбирающихся

в конкретном процессе, принимает надлежащие меры для решения задачи по уменьшению вариации процесса и тем самым повышает качество. Все процессы постоянно совершенствуются, и в них постепенно вносятся улучшения.

В публикации ВМО (WMO, 1990) содержится контрольный перечень соответствующих факторов под следующими заголовками:

a) найм и профессиональная подготовка персонала;
b) технические требования, проектирование и модернизация;
c) установка приборов;
d) обслуживание оборудования;
e) калибровка приборов.

Все вышеперечисленные факторы с точки зрения специалиста по приборам влияют на качество данных. Этот перечень может использоваться руководителями для изучения контролируемых ими областей с целью определения слабых мест, преподавателями в ходе проведения занятий по концепциям общего управления качеством и отдельными лицами, которые, зная об этих факторах, могут понять, в каких областях среды измерений они, обладая профессиональными знаниями и навыками, могут внести ценный вклад в общее обеспечение качества данных.

Международная организация по стандартизации (ИСО) планирует официальные системы качества, определенные группой спецификаций ИСО под номером 9000 (ISO, 1994*a*; 1994*b*), в рамках которых организации могут быть официально аттестованы внешними аудиторами на предмет качества процессов их производства и услуг, предоставляемых клиентам. Эти системы качества в очень сильной степени зависят от профессионального обучения методам управления качеством.

5.3.4 Как люди обучаются

5.3.4.1 Среда обучения

Обучение является процессом, который для каждого индивидуума носит очень личностный характер и зависит от его потребностей и интересов. Побуждающим мотивом к обучению у людей служит перспектива получения определенного вознаграждения, например, прибавки к зарплате. Однако сильными стимулами могут быть также и удовлетворение работой, участие в деле, стремление к реализации личных способностей, желание обладать определенной властью или влиянием и одобрение со стороны коллег и руководителей. Такие виды вознаграждения удается получить в результате повышения активности и эффективности при выполнении работы и расширении взаимосвязей с коллегами на рабочих местах.

Обучение — это активный процесс, в ходе которого студент реагирует на среду и активность профессионального образования. Поведение студента изменяется, если он попадает в трудные с интеллектуальной, физической и эмоциональной точек зрения ситуации. Слишком сильная интеллектуальная или эмоциональная нагрузка во время обучения приводит к обратным результатам.

Преподавателям и руководителям следует предпринимать усилия для стимулирования и поощрения к обучению путем создания благоприятного физического и психологического климата и применения таких опыта и методов, которые помогали бы в обучении. Студенты должны чувствовать себя в среде обучения свободно и спокойно, на них не должны воздействовать отвлекающие факторы. „Благоприятный психологический климат» можно создать, стимулируя студентов, используя определенные манеру преподавания и лексику, положительные отзывы о полученных ранее знаниях, не допуская насмешек и поводов для смущения, создавая атмосферу доверия и выбирая определенные методы обучения.

5.3.4.2 Важные принципы

Следующие принципы играют важную роль в деле профессиональной подготовки:

a) *готовность*: обучение проходит быстрее, если студент готов к нему, заинтересован и желает учиться;
b) *цели*: цели профессионального обучения (включая нормы качества) должны быть ясны как для ответственных за обучение, так и для обучающихся;
c) *активное участие*: обучение проходит более эффективно, если студенты активно вырабатывают решения и самостоятельно выполняют задания, а не пассивно воспринимают готовые ответы или просто наблюдают за практической работой других;
d) *ассоциативность*: обучение должно быть привязано к прошлому опыту с учетом сходства и различий;
e) *темпы обучения*: темпы профессионального обучения должны соответствовать индивидуальным возможностям каждого обучающегося (подтвержденным с помощью тестирования); вместо одного продолжительного курса предпочтительнее делить процесс обучения на несколько коротких этапов в целях лучшего запоминания материала;

f) *закрепление знаний*: полезные упражнения и повторение помогают усвоить новые знания;
g) *интенсивность*: интенсивные, яркие или волнующие впечатления захватывают воображение и способствуют более глубокому усвоению знаний;
h) *эффективность*: впечатления, которые доставляют удовлетворение обучающимся, предпочтительнее при обучении, чем ощущения неловкости или раздражения. Одобрение поощряет к обучению;
i) *поддержка*: наставник обучающихся должен оказывать полномасштабную поддержку процессу обучения и иметь возможность поддерживать и укреплять этот процесс;
j) *планирование и оценка*: процесс обучения должен планироваться, осуществляться и оцениваться систематически в контексте организационных потребностей.

5.3.4.3 Многообразие методов

Студенты в группе обучаются с разной скоростью. Одни методы профессионального обучения (см. раздел 5.4) подходят некоторым индивидуумам в большей степени, чем другие, и имеют разную эффективность при различных обстоятельствах. Использование всего многообразия методов и средств обучения поможет ускорить обучение в группе.

Исследования (Moss, 1987) показывают, что усвоение нами знаний происходит с помощью следующих органов чувств:

a) зрение (83 %);
b) слух (11 %);
c) другие органы чувств (6 %).

Однако лучше всего мы обучаемся, когда выполняем реальные задания. Ниже указаны методы или средства обучения в порядке снижения их эффективности:

a) реальный опыт;
b) моделируемый практический опыт;
c) наглядные показы и обсуждения;
d) физические модели и тексты;
e) фильмы, видеофильмы и компьютерная анимация;
f) графики, диаграммы и фотографии;
g) печатные тексты;
h) лекции.

Эти методы, несомненно, могут использоваться в различных сочетаниях. При хорошей лекции могут применяться и некоторые другие методы.

Традиционные методы образования в основном опираются на произнесенное и напечатанное слово, в то время как все свидетельствует о том, что гораздо более эффективным является практический опыт.

В ходе профессионального обучения специалистов по приборам может использоваться широкий ряд учебных методов и средств. Теоретические аспекты измерений и проектирования приборов преподаются в форме лекций, содержащих тексты и формулы, а также как вспомогательные средства графики и диаграммы. Практические навыки по эксплуатации, обслуживанию и калибровке измерительных систем и в конечном итоге практический опыт работы с эксплуатируемыми системами можно получить благодаря использованию фотографий с текстами, фильмов или видеозаписей с показом ручной регулировки, моделей, которые можно разбирать, демонстрационных показов. Могут быть проимитированы также рискованные или опасные практические ситуации или способы использования.

5.3.5 Развитие профессионализма персонала

Группе инженеров, работающих с системами метеорологических приборов, нужны люди, которые не только обладают техническими знаниями и навыками, но и широко образованны и могут хорошо говорить и писать. Хорошо развитые навыки личного общения необходимы для осуществления поддержки и разработки обоснования технических программ и, в особенности, при работе на руководящих постах. Квалифицированные инженерно-технические работники должны получить такую профессиональную подготовку, которая позволяла бы им играть значимую роль при принятии решений, влияющих на развитие их метеорологической службы.

Наметилась такая тенденция, что персонал, хорошо разбирающийся в точных науках и владеющий практическими ручными навыками работы, в меньшей степени владеет устными и письменными лингвистическими навыками. В ходе ежегодного обзора эффективности работы своих сотрудников руководителям следует определять возможности расширения сотрудниками своих профессиональных знаний и навыков путем прохождения специальных курсов, например, по обучению выступлениям перед публикой, ведению переговоров, составлению писем и отчетов или уверенной манере общения. Некоторой части персонала может потребоваться помощь в изучении второго языка, с тем чтобы они могли продолжить свое профессиональное обучение.

5.3.6 Обучение навыкам руководства

Хорошие управленческие навыки являются важным компонентом инженерно-технической деятельности. Среди таких навыков планирование рабочего времени; стимулирование, контроль и оценка эффективности работы персонала (включая аспект профессиональной подготовки); управление проектами (оценка ресурсов, бюджетов, сроков, персонала и материалов, а также составление временных графиков); решение проблем; управление качеством и хорошие навыки устного и письменного общения. Специалистов по приборам, обладающих способностями к управлению, следует выявлять на соответствующем этапе их карьеры и направлять на обучение навыкам руководства.

Современный руководитель может иметь в своем распоряжении персональный компьютер и, следовательно, должен уметь пользоваться пакетами офисного и инженерно-технического программного обеспечения, применяющимися, к примеру, для обработки текстов, создания электронных таблиц, работы с базами данных, проведения статистического анализа с графиками, составления технической документации, построения блок-схем и управления проектами. Обучение использованию этих инструментов может в значительной мере помочь в повышении личной производительности труда.

5.3.7 Обучение в течение всей жизни

5.3.7.1 Три этапа профессиональной подготовки

Предполагается, что в течение всей своей трудовой деятельности специалисты по приборам должны периодически уделять внимание повышению своей квалификации как посредством организованных занятий, так и за счёт обучения на рабочих местах или путем самообразования. Можно определить три следующих этапа профессиональной подготовки:

a) этап постепенного получения профессионального образования, когда обучающийся приобретает общие теоретические и практические знания на дифференцированных уровнях;
b) этап получения дополнительного образования, когда в дополнение к профессиональному образованию изучаются конкретные методы и оборудование;
c) этап повышения квалификации, когда через несколько лет после завершения официального профессионального обучения специалисту необходимо повысить квалификацию и обновить свои знания с учётом современных методов и оборудования.

5.3.7.2 Профессиональная подготовка

На этапе получения технического образования и профессиональной подготовки специалисты по приборам, как правило, обучаются частично в каком-либо техническом институте вне службы и частично в учебном заведении НМГС, где они проходят основной курс по метеорологическим приборам. Следует отметить, что техническое или инженерное образование могут иметь специалисты обоих уровней классификации персонала ВМО.

5.3.7.3 Специальная профессиональная подготовка

Этап дополнительного профессионального обучения начинается через несколько лет, когда специалисту требуется пройти курсы по эксплуатации конкретных систем, например автоматических метеорологических станций или радиолокаторов, или по таким дисциплинам, как компьютерное программное обеспечение или наука управления. При этом для профессиональной подготовки в основном используются внешние ресурсы, включая спонсируемые ВМО учебные мероприятия.

5.3.7.4 Повышение квалификации

По мере роста карьеры специалиста по приборам периодически возникает потребность обучения на курсах повышения квалификации, с тем чтобы ознакомиться с достижениями в области приборного обеспечения и технологии, а также на других дополнительных курсах.

Все эти этапы подразумевают последовательное движение вперед. Каждый учебный курс предполагает наличие у обучаемых некоторой предшествующей профессиональной подготовки, на которой можно строить дальнейшее обучение.

5.4 ПРОЦЕСС ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБУЧЕНИЯ

5.4.1 Роль преподавателя

Большинство специалистов по приборам время от времени принимают на себя важную и приносящую удовлетворение роль преподавателя, а для некоторых из них преподавание становится основной работой со специализацией в определенной области знаний. Все преподаватели должны понимать, какими качествами должен обладать хороший преподаватель.

Хороший преподаватель заинтересован в качественных результатах своей работы, обладает обширными знаниями в конкретных областях и хорошо развитыми навыками общения. Он или она должны сочувствовать студентам и быть терпеливыми и выдержанными, готовыми к поощрению и выражению похвалы, гибкими и обладать хорошо развитым воображением, а также уметь применять на практике множество методов обучения.

Хорошие преподаватели должны четко определять цели и умело планировать и подготавливать учебные курсы. Они должны уметь правильно вести регистрацию учебных рекомендаций, программ обучения, оценок за курсы, проведенных занятий и полученных результатов, а также выделяемых средств и произведенных расходов. Они должны стремиться получать большую отдачу от своего труда и быть готовыми к изменению своего подхода. Предполагается, что они должны также постоянно учиться сами.

5.4.2 Анализ задачи

Специалист по приборам должен быть подготовлен к тому, чтобы осуществлять множество повторяющихся или сложных задач при установке, эксплуатации и калибровке приборов, а иногда и при их изготовлении. С целью определения порядка выполнения той или иной работы можно применять формуляр, который преподаватель может использовать для анализа задачи, а обучающийся — в качестве карты контроля. Прежде всего в этот формуляр записываются цель работы и стандартные требования к ее выполнению. Работа подразделяется на логические этапы или стадии приемлемого объема. Формуляр может представлять собой таблицу, колонки которой озаглавлены, например, как этапы, методы, меры и обоснования:

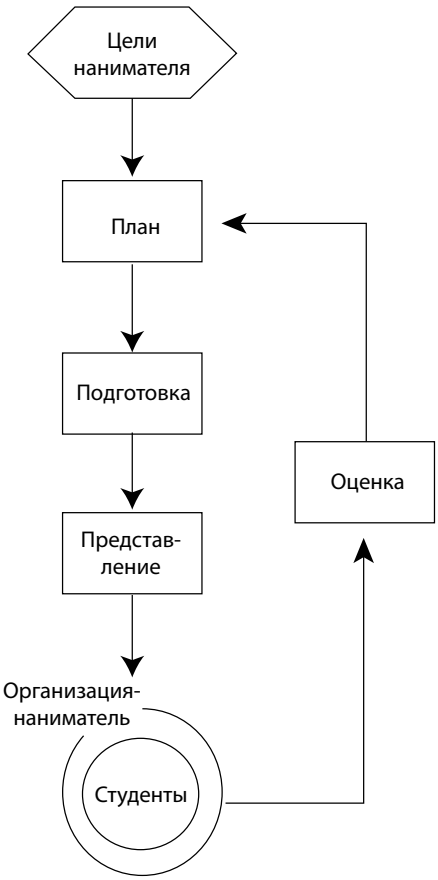
a) этапы (что следует сделать): они должны быть пронумерованы и снабжены кратким описанием задания каждого этапа, начиная с глагола в неопределенной форме;
b) методы (каким способом выполнять задачу): указываются используемый метод и оборудование или необходимые профессиональные навыки;
c) меры (требуемые нормы): включает предписание о качестве, ссылку на статью в спецификации, контрольную проверку или реальную меру измерения;
d) обоснование (почему это необходимо выполнить): краткое разъяснение целей каждого этапа.

Хорошим визуальным средством отображения связи отдельных этапов со всей задачей может служить блок-схема, особенно когда порядок выполнения этапов имеет важное значение или когда существуют различные промежуточные операции в общей процедуре.

5.4.3 Планирование процесса профессионального обучения

Процесс профессионального обучения, как показано на размещённом напротив рисунке, состоит из четырех этапов:

a) планирование:
   i) провести обзор целей обучения, определенных организацией-нанимателем или органом, устанавливающим нормативы (например, ВМО);
   ii) провести анализ особенностей изучаемого материала, задачи или уровня знаний, являющихся предметом данного процесса обучения;
   iii) провести обзор характеристик студентов: уровня их квалификации, опыта работы, языковых возможностей, определённых проблем;
   iv) провести оценку необходимого уровня профессиональной подготовки (Кому из студентов потребуется уделить особое внимание?);



Этапы процесса профессионального обучения

v) определить цели процесса обучения (Какие должны быть результаты? Каким образом их можно измерить?);

b) подготовительная работа:
   i) выбрать содержание курса: собрать информацию, организовать ее в логической последовательности;
   ii) определить методы и средства обучения: обеспечить соответствие каждой конкретной теме для того, чтобы создать и поддерживать интерес к обучению (см. Раздел 5.4.5);
   iii) подготовить план учебного процесса: составить подробный план с указанием сроков для каждого вида деятельности;
   iv) спланировать оценку результатов: какая информация требуется и как ее собрать? Выбрать метод и подготовить вопросы или задания;

c) осуществление:
   i) проводить занятия как указано в плане процесса обучения;
   ii) поощрять активное обучение и участие студентов в работе;
   iii) использовать все многообразие методов;
   iv) использовать наглядные показы и вспомогательные визуальные средства;

d) оценка:
   i) провести запланированную оценку выполнения поставленных целей;
   ii) суммировать результаты;
   iii) провести обзор всего процесса обучения для оценки его эффективности;
   iv) рассмотреть вопрос о возможных улучшениях содержания и процесса проведения занятий;
   v) зафиксировать сделанные выводы;
   vi) учесть отзывы прошедших курс студентов при планировании следующего учебного процесса.

Процесс профессионального обучения будет более эффективным, если тщательно и систематически прорабатывать все эти этапы.

5.4.4 Эффективность профессионального обучения

5.4.4.1 Целенаправленное профессиональное обучение

Учитывая ограниченность ресурсов, выделяемых на профессиональное обучение, для обеспечения его максимальной эффективности следует предпринимать действительно значительные усилия. Учебные занятия и средства должны быть направлены на повышение отдачи от обучения нужного персонала в оптимальные сроки. Так, например, обучение за слишком короткие сроки может оказаться просто потерей ресурсов, направление управляющего персонала на курсы для технического обслуживающего персонала было бы нецелесообразным, точно так же, как бессмысленно обучать людей за 12 месяцев до того, как они получат доступ к новой технологии.

Возможности и методы профессионального обучения следует выбирать так, чтобы они наилучшим образом соответствовали требованиям в отношении тех знаний и навыков, которые необходимо передать обучаемым, а также личностному профилю обучаемых с учетом их образовательного уровня и национальных особенностей. Для обеспечения максимальной эффективности необходимо проводить оценку результатов профессионального обучения.

5.4.4.2 Оценка профессионального обучения

Оценка — это процесс получения определенной информации и предоставления ее тем лицам и органам, которые в дальнейшем могут оказать влияние на процесс профессионального обучения. В зависимости от того, каким из нижеперечисленных организаций и категорий лиц необходима такая информация, могут применяться несколько подходов к оценке результатов обучения:

a) ВМО. Данная организация заинтересована в повышении качества данных, собираемых в рамках Глобальной системы наблюдений. Она разрабатывает программы профессионального обучения, создает фонды и использует услуги экспертов, главным образом для повышения квалификации персонала в развивающихся странах;
b) национальная метеорологическая служба. Любой национальной метеорологической службе необходимы качественные метеорологические данные, и поэтому она заинтересована в повышении общего потенциала подразделения, занимающегося получением данных и конкретными задачами по эксплуатации приборов при некоторых ограничениях численности персонала. Она заинтересована в эффективном использовании бюджета и экономичности расходов при осуществлении программ профессионального обучения;
c) департамент профессионального обучения или региональный учебный центр. Каждый департамент профессионального

обучения или региональный учебный центр заинтересован в разработке таких программ профессионального обучения, которые были бы направлены на достижение установленных целей в рамках согласованного бюджета. Их преподаватели должны знать, насколько эффективны применяемые ими методы для достижения этих целей и каким образом их можно усовершенствовать;

d) руководители в инженерно-технических областях. Подобного рода руководители заинтересованы в получении таких рабочих навыков, которые позволяли бы им надлежащим образом выполнять свои функции в зонах ответственности без потери времени или материальных средств;

e) обучающиеся. Все обучающиеся заинтересованы в получении удовлетворения от своей работы и соответствующих вознаграждений, что приходит с повышением уровня компетентности. Они хотят, чтобы учебные курсы отвечали их потребностям и ожиданиям.

Таким образом, эффективность процесса профессионального обучения должна оцениваться на нескольких уровнях. Национальные и региональные учебные центры могут проводить оценку своих программ как ежегодно, так и один раз в три года, сравнивая количество обучавшихся на различных курсах и уровень знаний при сдаче экзаменов в сопоставлении с размером бюджетных средств и целями, поставленными в начале каждого периода обучения. Преподавателям необходимо проводить оценку адекватности и эффективности содержания и методов преподавания их предметов.

5.4.4.3 Виды оценки

Виды оценки включают следующее:

a) отчет о профессиональном обучении. Данный отчёт не является попыткой оценить эффективность, а представляет собой фактическое сообщение о, например, видах и количестве проведенных курсов, их датах и продолжительности, числе обучавшихся, получивших профессиональную подготовку и повысивших свою квалификацию, и об общей стоимости этого обучения. В некоторых случаях требуется отчет об оценке способностей конкретного студента;

b) оценка ответной реакции. Служит для определения того, каким образом обучающиеся реагируют на программу обучения. Она может быть в форме напечатанного вопросника, в который обучающиеся в конце курса ставят очки, соответствующие их мнениям об адекватности, содержании, методах, учебных пособиях, работе преподавателей и администрации. Однако такой метод оценки не может улучшить то обучение, которое они уже прошли. Поэтому необходимо в течение каждого курса профессионального обучения регулярно проводить обзоры и узнавать мнения студентов в ходе обсуждений в группах. Это позволит преподавателю обнаруживать любые возникающие в процессе обучения проблемы или узнавать об индивидуальных потребностях студентов и затем принимать надлежащие меры;

c) оценка знаний. Служит для определения тех новых знаний и профессиональных навыков, которые обучавшийся получил в процессе профессиональной подготовки; при этом, объём полученных новых знаний лучше всего определять методом сравнения с уровнем знаний, продемонстрированным при тестировании перед началом обучения. Для проверки знаний обучающихся можно разработать различные формы письменных тестов (эссе, вопросы, подразумевающие краткие ответы, вопросы типа „правильно или неправильно», вопросы с возможностью выбора ответа из нескольких вариантов, построение диаграмм или блок-схем). Обучающиеся могут на практике проверить и оценить свои знания. Профессиональные навыки лучше всего проверяются путем постановки какой-либо конкретной задачи или путем наблюдения во время профессионального обучения на рабочих местах (WMO, 1990). Лица, оценивающие знания, могут пользоваться контрольным перечнем действий и навыков (формуляр наблюдений), которые необходимы для выполнения той или иной конкретной задачи;

d) оценка эффективности. Позволяет определить, как изменилась эффективность работы обучавшегося через некоторое время после прохождения им профессионального обучения; при этом, новый уровень эффективности работы обучавшегося лучше всего определять методом сравнения с уровнем эффективности, продемонстрированным им при тестировании перед началом обучения. Такая оценка может проводиться работодателем с использованием, например, формуляра наблюдений по меньшей мере в течение шести недель после окончания обучения. Учебное заведение также может провести эту оценку, послав вопросники как работодателю, так и лицу, прошедшему обучение;

e) оценка влияния обучения. Служит для определения эффективности обучения путем выяснения того, какие изменения произошли в какой-либо организации или рабочей

группе. Для проведения этой оценки может потребоваться предварительное планирование, а также сбор базисных данных до начала конкретного курса профессионального обучения и после него. В качестве некоторых видов оценки можно назвать следующие: неправильные данные и отсутствие ряда данных в метеорологических сводках, период времени, необходимый для установки оборудования, и стоимость установки оборудования.

5.4.4.4 Профессиональная подготовка преподавателей

Преподаватели также нуждаются в постоянном обучении, с тем чтобы быть в курсе новых достижений технологии, знакомиться с новыми методами и средствами обучения и получать возможность свежим взглядом посмотреть на свою работу. В ежегодном бюджете НМГС следует предусматривать средства на профессиональное обучение преподавательского состава НМГС, возможно, в порядке ротации.

В качестве некоторых вариантов можно назвать: самообразование; краткосрочные курсы (включая навыки преподавания), проводимые техническими институтами; направление на обучение для повышения квалификации; посещения производственных цехов изготовителей метеорологического оборудования; посещения и работа в качестве командированных специалистов в других НМГС и РЦП, а также участие в организованных ВМО и другими организациями учебных и технических конференциях.

5.4.5 Методы и средства обучения

В приведенном ниже перечне лишь кратко излагаются методы обучения, которые могут служить в качестве памятки, и возможности их применения (более подробные сведения можно найти во многих других источниках, таких, как работы Moss (1987) и Craig (1987)):

a) конкретное исследование:
   i) перед отдельными лицами или группой лиц ставится конкретная проблема из реальной жизни или проект развития, которые они должны исследовать;
   ii) для представления полученных результатов можно предложить использовать официальную документацию, применяемую в реальной ситуации;

b) лекции в классе:
   i) этот метод лучше всего подходит для понимания информации, усваиваемой наилучшим образом в устной и письменной форме: базисные знания, теоретические идеи, расчеты, процедуры;
   ii) очень полезными дополнительными средствами при этом могут служить визуальные средства и отдельные печатные материалы, раздаваемые присутствующим;
   iii) следует предусматривать достаточно времени для ответов на вопросы и проведение обсуждений;
   iv) лекции можно рассматривать как слишком пассивный метод обучения;

c) обучение с использованием компьютеров:
   i) при проведении такого обучения используется способность персонального компьютера хранить большое число текстов и изображений, запрограммированных в последовательности, пригодной для обучения, часто с некоторыми элементами интерактивного выбора студентами на основе использования перечней, содержащихся в меню, и клавишей для осуществления выбора на экране;
   ii) логические условия и структуры ветвления и замкнутых циклов в программе моделируют процессы обучения с выбором той темы для изучения, которая отвечает потребностям конкретного студента, с представлением нужной информации, с проверкой понимания материала студентом на основе выбора им вариантов ответов и с направлением ему обратно проверенного материала; и так до тех пор, пока не будет получен правильный ответ;
   iii) некоторые компьютерные языки, например ToolBook для персональных компьютеров типа IBM PC и HyperCard для компьютеров Macintosh, разработаны специально для составления и представления интерактивных курсов профессионального обучения в рамках так называемой гиперсреды;
   iv) в современных системах используются экраны с цветной графикой, и на них могут быть представлены графики и диаграммы, статические изображения и короткие движущиеся последовательности, при этом графический интерфейс пользователя используется для улучшения интерактивной связи между студентом и программой;
   v) на компьютере могут быть промоделированы полномасштабные системы метеорологических приборов, например система аэрологического зондирования;

vi) сложные системы могут включать плеер DVD либо лазерных видеодисков или наборы CD-ROM, на которых постоянно хранится значительное количество текстовой информации и последовательности движущихся изображений;

vii) затраты на разработку программного обеспечения и капитальные затраты на системы обучения с использованием компьютеров могут быть разными, от умеренных до очень значительных; такие системы постепенно приходят на смену учебным вспомогательным средствам, основанным на использовании мультимедиа и видео;

d) курсы заочного обучения:

i) обычно курсы такого типа представляют собой уроки с упражнениями или заданиями, которые периодически посылаются студентам по почте;

ii) преподаватель выставляет отметки за выполненные задания и возвращает их студентам вместе со следующими уроками;

iii) иногда студенты могут обсуждать возникшие трудности со своим преподавателем по телефону;

iv) некоторые курсы могут предусматривать использование аудио- или видеопленок или компьютерных дисков при условии, что студенты имеют доступ к нужному оборудованию;

v) в конце таких курсов могут быть организованы экзамены в учебном центре;

e) наглядные методы:

i) преподаватель демонстрирует различные технические приемы в лаборатории или в рабочей ситуации;

ii) такие наглядные показы необходимы для первоначального обучения процедурам ручного обслуживания и калибровки;

iii) студентам должна быть обеспечена возможность самим осуществить изучаемые процедуры и задать вопросы;

f) дистанционное обучение:

i) студенты проходят курс профессионального обучения, находясь в местах своего проживания, в отдалении от учебного центра и преподавателя, и, как правило, частично в течение рабочего дня и в свободное от работы время;

ii) такое обучение может производиться на индивидуальной или групповой основе;

iii) некоторые учебные заведения специализируются на предоставлении услуг по дистанционному обучению;

iv) дистанционное обучение в настоящем разделе представлено заочными курсами, телевизионными лекциями и дистанционным обучением с использованием средств телесвязи;

g) дистанционное обучение с использованием средств телесвязи:

i) класс студентов связан с помощью специального телефонного оборудования с находящимся на расстоянии преподавателем. Они изучают печатные тексты. Каждый студент имеет микрофон, который позволяет ему вступать в дискуссии, вести диалог вопрос — ответ. При этом могут использоваться любые надежные средства связи, включая спутники; очевидно, однако, что может возникнуть вопрос о затратах на связь;

ii) в более сложных и дорогостоящих системах каждый студент имеет компьютер, соединенный посредством компьютерной сети с компьютерами других студентов и с компьютером находящегося на расстоянии преподавателя; или преподаватель ведет обучение из специальной телевизионной студии и появляется на телевизионном экране в находящейся на расстоянии классной комнате, в которой также установлены телекамера и микрофоны, позволяющие преподавателю видеть и слышать студентов;

h) упражнения и задания:

i) упражнения и задания часто следуют за лекцией или наглядным показом;

ii) они носят обязательный характер, с тем чтобы студенты могли активно усваивать и применять новые знания;

iii) задание может включать как научно-исследовательскую работу, так и выполнение практических задач;

i) наглядные экспонаты:

i) они представляют собой специально подготовленные визуально воспроизводимые материалы и модели, которые студенты могут изучать;

ii) их полезно использовать для воссоздания общей ситуации в тех случаях, когда реальная ситуация является сложной или реальная среда находится на значительном удалении от мест обучения;

j) обучение в полевых условиях и посещения:
   i) обучающиеся проводят наблюдения и изучают измерительные системы в полевых условиях, что особенно полезно во время установки, обслуживания или калибровки приборов;
   ii) посещения цехов изготовителей метеорологического оборудования и других метеорологических служб необходимы для расширения технических знаний специалистов;

k) обсуждение/решение задач в группах:
   i) класс подразделяется на небольшие группы, состоящие из четырех—шести человек;
   ii) руководитель группы должен обеспечивать активное участие всех обучающихся;
   iii) высказанные идеи записываются или регистрируются на доске, которую видит вся группа;
   iv) на первом этапе коллективной „мозговой» атаки, все высказанные идеи принимаются без какой-либо критики; затем группа изучает каждую идею подробно и классифицирует ее по степени полезности;

l) ротация на рабочих местах/командировки:
   i) согласно учебному расписанию, студенты выполняют различные задачи в рамках разнообразных обязанностей, часто под контролем разных преподавателей или руководителей, с тем чтобы они могли приобрести как можно больше опыта работы;
   ii) студенты могут быть командированы на какой-то фиксированный срок в другой департамент, компанию-изготовитель приборов или в другую метеорологическую службу для приобретения опыта работы, который нельзя получить в их департаменте или службе;
   iii) студенты, направляемые в командировки по международной линии, должны быть очень способными и, как правило, иметь поддержку в рамках двусторонних соглашений или по линии стипендий;

m) программы мультимедиа:
   i) в данных программах используются диапозитивы для проецирования, видеоленты и компьютерные диски типа DVD и CD-ROM;
   ii) для них требуется доступ к дорогостоящему оборудованию, которое должно быть совместимым с медиа;
   iii) их можно использовать для проведения классных или индивидуальных занятий;
   iv) эти программы должны включать упражнения, вопросы и темы для обсуждений;
   v) в том, что касается обеспечения в области метеорологических приборов, имеется ограниченное количество материалов;

n) обучение „один на один»:
   i) преподаватель работает с одним студентом, который нуждается в профессиональной подготовке в какой-либо конкретной области;
   ii) данный метод может применяться для обучения как отстающих, так и успевающих студентов;

o) обучение на рабочих местах:
   i) это чрезвычайно важный компонент процесса обучения, при котором обучающийся учится применять приобретенные теоретические знания и навыки для решения самых разных задач и проблем, с которыми приходится сталкиваться специалисту. Все профессиональные навыки усваиваются наилучшим образом на практике;
   ii) некоторые виды профессионального обучения лучше всего проводить непосредственно на рабочих местах после необходимых разъяснений и предупреждений. К ним относятся все те профессиональные действия, которые требуют очень умелого обращения с приборами и для обучения которым потребовалось бы воспроизводить соответствующие условия или оборудование в лаборатории или мастерской, что связано со значительными трудностями и финансовыми затратами. В качестве примеров можно назвать действия по установке оборудования, некоторые операции по обслуживанию и сложные виды калибровки;
   iii) данный вид профессионального обучения позволяет использовать имеющиеся людские ресурсы и оборудование и не требует организации поездок, привлечения специальных преподавателей или использования специальных помещений; этот вид обучения соответствует местным потребностям. Он особенно уместен в тех случаях, когда потребность в практических навыках значительно перевешивает потребность в теоретической подготовке, как, например, в случае профессиональной подготовки техников;

iv) риски при этом заключаются в том, что из-за отсутствия других методов подготовка на рабочих местах может рассматриваться как „естественный» метод подготовки, в то время как для формирования высококвалифицированных специалистов требуется более сложная профессиональная подготовка, включающая значительный теоретический компонент; что к обучению могут быть привлечены обучающиеся с посредственными способностями; что это обучение может носить слишком узкий характер и при этом могут возникать значительные проблемы в профессиональных знаниях или навыках; и что эффективность обучения в этом случае нельзя объективно оценить;

v) успех профессионального обучения на рабочих местах обуславливается наличием следующих компонентов:
   a. плана профессионального обучения, определяющего те профессиональные навыки, которые должны быть получены;
   b. содержания работы, охватывающего необходимую область;
   c. руководителя работы, являющегося хорошим преподавателем, разбирающимся в данной теме, с хорошим стилем преподавания, терпеливого и умеющего стимулировать обучающихся;
   d. надлежащей теоретической подготовки, являющейся основой для практической подготовки;
   e. дневника работы обучающегося, в котором он мог бы регистрировать полученные знания и навыки;
   f. регулярного обзора руководителем профессионального обучения достигнутых успехов;
   g. объективной оценки приобретенных знаний и навыков (путем наблюдения или тестирования);

p) профессиональное обучение по принципу совместных действий:
   i) данный вид профессионального обучения дает возможность студентам активно взаимодействовать в ходе учебного процесса, делиться знаниями и опытом;
   ii) студенты объединяются в команды или группы и выбирают своих лидеров;
   iii) данный вид профессионального обучения используется для выработки идей, решения задач, составления планов, разработки проектов и осуществления профессиональной подготовки руководящего персонала;

q) обучение по принципу равного участия:
   i) данный вид обучения зависит от того, проходили ли студенты ранее совместное обучение и подготовку;
   ii) в небольших группах студенты по очереди принимают на себя роль преподавателя, в то время как остальные студенты учатся и задают вопросы;

r) запрограммированное обучение:
   i) данный вид обучения полезен для студентов, находящихся вдали от преподавателей или учебных заведений;
   ii) студенты работают индивидуально, каждый своим темпом, используя структурированные тексты, мультимедиа или курсы с использованием компьютеров;
   iii) каждый этап обучения предусматривает самопроверку и исправление ошибок перед переходом к следующей теме;
   iv) подготовка учебных материалов является дорогостоящим мероприятием, и поэтому варианты курсов могут быть ограничены.

Хорошее преподавание имеет гораздо большее значение, чем дорогостоящие учебные средства.

5.4.6 Телевизионные лекции

Некоторые учебные заведения, которые обеспечивают в основном внеаудиторные занятия, читают лекции своим студентам-заочникам путем вещания по специальному телевизионному каналу либо в определенные периоды времени по какому-либо коммерческому каналу.

5.4.7 Видеопрограммы

Видеопрограммы являются хорошим средством профессионального обучения, что подтверждается следующими фактами:

a) видеопрограммы являются хорошим средством для регистрации и неоднократного наглядного показа процедур, когда доступ к измерительным системам и услугам квалифицированного преподавателя ограничен;
b) в таких программах могут быть предусмотрены паузы для постановки вопросов, которые необходимо обсудить;
c) для получения наилучших результатов видеопрограммы можно использовать совместно с дополнительными печатными текстами и обсуждениями в группах;
d) несмотря на то, что профессионально сделанные видеопрограммы стоят дорого, и

количество материалов по метеорологическим приборам ограничено, полезные технические видеоматериалы для местного использования при небольших затратах на оборудование могут быть подготовлены и любителями; при этом важно тщательно спланировать действия и затем добавить звуковую дорожку.

5.5 РЕСУРСЫ ДЛЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБУЧЕНИЯ

Руководители и преподаватели должны знать не только о тех ресурсах профессионального обучения, о которых говорилось в предыдущем разделе, но также и о других доступных для них источниках информации и руководящих материалах, о внешних возможностях, которые могут быть использованы для профессионального обучения, об учебных заведениях, которые могут дополнить их работу и, конечно, о финансовых ресурсах, которые могут быть использованы для поддержки всей деятельности по профессиональному обучению.

5.5.1 Учебные заведения для профессиональной подготовки

5.5.1.1 Национальные учебные заведения для обучения и подготовки кадров

Если рассматривать ситуацию в целом, то НМГС не могут обеспечить полномасштабное техническое образование и профессиональную подготовку специалистов по приборам и поэтому в той или иной степени будут зависеть от внешних образовательных учреждений, дающих основное и дополнительное профессиональное образование, а также обеспечивающих повышение квалификации в области передовой технологии. Руководителям метеорологического инженерно-технического персонала необходимо знакомиться с учебными планами и курсами их национальных учебных заведений, с тем чтобы иметь возможность рекомендовать своему персоналу соответствующие курсы для базисного образования и профессиональной подготовки. В документах ВМО (WMO, 2002*a*; 2002*b*) рекомендуются те учебные программы, которые необходимы для специалистов по приборам различных классов.

Когда в качестве специалистов по приборам нанимаются квалифицированные инженеры не из числа сотрудников НМГС, желательно, чтобы их квалификация была подтверждена признанным национальным высшим учебным заведением. Тогда они должны дополнительно пройти профессиональное обучение в области метеорологии и освоить характерные для этой науки методы измерений и соответствующее приборное обеспечение.

5.5.1.2 Роль региональных центров ВМО по приборам в подготовке кадров

По рекомендации КПМН[2], несколько региональных ассоциаций ВМО создали РЦП с целью поддержания учебных стандартов и обеспечения консультаций. Круг обязанностей и местонахождение этих центров приведены в приложении 1.А главы 1 части I.

Подразумевается, что РЦП должны быть центрами экспертизы типов, характеристик, эффективности работы, применений и калибровки приборов. Эти центры будут располагать технической библиотекой по научным и практическим аспектам использования приборов, лабораторными помещениями и демонстрационным оборудованием и хранить у себя комплект стандартных приборов с калибровками, соответствующими международным стандартам. Эти центры должны предоставлять информацию, консультации и помощь странам — членам своих регионов.

По мере возможности эти центры будут объединяться с региональными центрами по радиации и будут размещаться в РУЦ или поблизости от них в целях совместного использования знаний и опыта экспертов и соответствующих ресурсов.

Одна из особых задач РЦП — это помощь в организации региональных учебных семинаров или рабочих групп по обслуживанию, сравнению и калибровке метеорологических приборов, а также предоставление соответствующих средств и консультаций экспертов.

РЦП должны стремиться спонсировать лучшие методы обучения и обеспечивать доступ к таким учебным ресурсам и средствам, которые могут дополнить ресурсы НМГС. Для поддержания своей эффективности центрам необходимо будет обеспечивать постоянную профессиональную переподготовку своих экспертов, с тем чтобы они знакомились с самыми последними достижениями в области технологий и методов обучения.

Могут осуществляться меры поощрения изготовителей метеорологических измерительных систем, с тем чтобы они спонсировали проходящие в РЦП учебные сессии.

---

[2] Рекомендовано девятой сессией Комиссии по приборам и методам наблюдений (1985 г.) в рамках Рекомендации 19 (КПМН-IX).

5.5.1.3 Роль региональных центров ВМО-МОК по морским приборам (РЦМП) в подготовке кадров

По рекомендации СКОММ была создана сеть РЦМП с целью поддержания учебных стандартов и обеспечения консультаций по измерениям, осуществляемым в сфере морской метеорологии[3] и прочих смежных сферах океанографической науки. Круг обязанностей и местонахождение этих центров приведены в приложении 4.A главы 4 части II.

Подразумевается, что РЦМП должны быть центрами экспертизы типов, характеристик, эффективности работы, применений и калибровки приборов. Эти центры будут располагать технической библиотекой по научным и практическим аспектам использования приборов, лабораторными помещениями и демонстрационным оборудованием и хранить у себя комплект стандартных приборов с калибровками, соответствующими международным стандартам. Эти центры должны предоставлять информацию, консультации и помощь странам — членам своих регионов.

РЦМП будет оказывать помощь в организации региональных учебных семинаров или рабочих групп по обслуживанию, сравнению и калибровке морских метеорологических и океанографических приборов, а также предоставлять соответствующие средства и консультации экспертов.

РЦМП должны стремиться спонсировать лучшие методы обучения и обеспечивать доступ к учебным ресурсам и средствам. Для поддержания своей эффективности эти центры обеспечат проведение постоянной профессиональной переподготовки своих экспертов, с тем чтобы они могли ознакомиться с новинками в области методов обучения и самыми последними достижениями в сфере технологий.

Могут осуществляться меры поощрения изготовителей морских метеорологических и океанографических измерительных систем, с тем чтобы они спонсировали проходящие в РЦМП учебные сессии.

5.5.2 Ресурсы ВМО для подготовки кадров

5.5.2.1 Программы ВМО для профессионального обучения и подготовки кадров

В документы ВМО (WMO, 2002*a*; 2002*b*) включены учебные программы для специализации в области метеорологических приборов и метеорологической телесвязи. Эти программы для профессионального обучения и подготовки кадров носят рекомендательный характер и должны интерпретироваться в свете национальных потребностей и стандартов технического образования.

5.5.2.2 Обзор потребностей в подготовке кадров, проводимый ВМО

ВМО периодически проводит обзор потребностей в подготовке кадров по регионам, классам и метеорологическим специальностям. Это позволяет определить и распределить виды учебных мероприятий, спонсируемых ВМО, в течение четырехлетнего периода. Важно, чтобы страны-члены предоставляли полную оценку своих потребностей в специалистах по приборам, с тем чтобы ВМО в своей деятельности по профессиональному обучению могла учитывать реальные потребности.

5.5.2.3 Публикации ВМО в области образования и подготовки кадров

Эти публикации содержат полезную информацию для специалистов по приборам и их руководителей. Публикация ВМО (WMO, 1986) представляет собой двухтомный сборник лекций по метеорологическим приборам для профессиональной подготовки техников, который может использоваться как для занятий в классе, так и для индивидуального изучения.

5.5.2.4 Учебная библиотека ВМО

Эта библиотека выпускает каталог (WMO, 1983) учебных публикаций, аудиовизуальных средств и компьютерных дискет, часть из которых можно брать для пользования в библиотеке или приобретать через ВМО.

5.5.2.5 Публикации ВМО по приборам и методам наблюдений

Эти публикации, включая отчеты рабочих групп и докладчиков КПМН, отчеты о взаимных сравнениях приборов и прочие подобные документы, являются ценными техническими средствами для специалистов по приборам, которые могут обучаться по ним или использовать их в качестве справочных материалов.

5.5.2.6 Возможности для специального профессионального обучения, спонсируемого ВМО

Руководители инженерно-технических групп должны постоянно интересоваться тем, о каких

[3] Рекомендовано третьей сессией Совместной технической комиссии ВМО-МОК по океанографии и морской метеорологии (2009 г.) в рамках Рекомендации 1 (СКОММ-III).

возможностях технического профессионального обучения объявила ВМО, поддерживая контакты со своим департаментом по подготовке кадров и с лицами в своей службе, получающими корреспонденцию о следующих возможностях:

a) поездки экспертов/передвижные семинары/рабочие группы: время от времени КПМН организует поездку одного из экспертов, который проводит специальные учебные курсы, семинары или рабочие группы в нескольких странах-членах, расположенных, как правило, в одном и том же регионе. Альтернативный вариант подразумевает, что эксперт проводит учебные мероприятия в РЦП или РУЦ, а студенты региона приезжают в эти центры. Цель при этом состоит в том, чтобы студент получил наилучшие знания при наименьших общих затратах, принимая во внимание местные условия;

b) стипендии: ВМО в рамках своей программы по техническому сотрудничеству предоставляет стипендии для профессиональной подготовки кадров. Финансовые средства поступают из нескольких источников, включая Программу развития Организации Объединенных Наций, Программу добровольного сотрудничества, целевые фонды ВМО, регулярный бюджет ВМО и другие программы двусторонней помощи. Краткосрочные (менее чем на 12 месяцев) или долгосрочные (на несколько лет) стипендии, предоставляются для получения образования или профессиональной подготовки в университетах, учебных институтах или специально в РУЦ ВМО и для таких категорий, как курсы для получения университетского диплома, постдипломное образование, обучение в высшем учебном заведении без получения диплома, специализированные учебные курсы, профессиональное обучение на рабочих местах и техническое профессиональное обучение для эксплуатации и обслуживания оборудования. Запросы на стипендии от частных лиц не принимаются. Подобные запросы должны быть одобрены постоянными представителями при ВМО тех стран, в которых проживают кандидаты. При этом должны быть четко определены виды профессионального обучения и соответствующие приоритеты. Поскольку для организации учебной программы того или иного кандидата требуется в среднем восемь месяцев, что связано с необходимостью проведения сложных консультаций между Секретариатом, страной-донором и страной-получателем, заявки на стипендию следует присылать задолго до начала предполагаемого периода обучения. Это всего лишь краткое изложение условий. Более полную информацию и формуляр для назначения кандидатов можно получить в Секретариате ВМО. Условия носят строгий характер, и требуется предоставлять полный комплект документации с заявками на стипендию.

5.5.3 ДРУГИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ДЛЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ

5.5.3.1 Техническое профессиональное обучение в других странах

Кроме стипендий ВМО, можно воспользоваться также и услугами агентств в некоторых странах, предлагающих замечательные программы профессиональной подготовки, которые могут быть составлены в соответствии с требованиями конкретного кандидата. Специалистам по приборам следует наводить справки о таких возможностях либо в других странах, либо в агентствах, являющихся представителями в их собственных странах.

5.5.3.2 Профессиональное обучение, обеспечиваемое изготовителями оборудования

Данный вид обучения включает в себя следующее:

a) покупку новой системы получения данных: все контракты на поставку крупных систем получения данных (включая программы, финансируемые донорами) должны содержать надлежащие условия о профессиональном обучении местного персонала процедурам эксплуатации и обслуживания таких систем. Представители метеорологической службы, получающие оборудование, должны хорошо представлять себе, каким должно быть это обучение, и в ходе переговоров должны выдвигать свои требования. Хотя обучение персонала методам использования новой системы осуществляется, как правило, на стадии ввода этой системы в эксплуатацию, целесообразно проводить еще один курс обучения после шести месяцев эксплуатации или когда возникнут серьезные проблемы с обслуживанием;

b) приемку на предприятии-изготовителе/установку/ввод в эксплуатацию: работа, связанная с внедрением какого-либо крупного устройства для получения данных, например станции приема сообщений со спутников или радиолокатора, обеспечивает уникальную возможность для обучающихся оказывать помощь в этой работе и знакомиться со строгими техническими требованиями.

Проверка при приемке оборудования — это процесс применения согласованных тестов для

конкретной системы, помогающий удостовериться в том, что выполнены все спецификации до того, как данная система принята покупателем и вывезена с предприятия-изготовителя.

Во время установки оборудования инженеры поставщика зачастую работают совместно с инженерами покупателя.

При установке той или иной системы может возникнуть необходимость в совместном участии и других служб, таких, как службы эксплуатации зданий, энергоснабжения, телесвязи и обработки данных.

Ввод в эксплуатацию — это процесс проведения согласованных тестов уже установленного оборудования, позволяющий удостовериться в том, что оно удовлетворяет всем указанным оперативным требованиям.

Возможность организации профессионального обучения на двусторонней основе возникает тогда, когда одна страна, устанавливающая и вводящая в эксплуатацию какую-либо крупную измерительную систему, приглашает обучающихся из другой страны для того, чтобы они наблюдали за этим процессом и оказывали помощь в установке оборудования.

5.5.3.3 Международные научные программы

В тех случаях, когда в рамках таких международных программ, как Всемирная климатическая программа, Программа по атмосферным исследованиям и окружающей среде, Программа по тропическим циклонам или Программа исследований глобальной атмосферы и тропической зоны океанов, проводятся крупномасштабные эксперименты, для местных специалистов по приборам открываются возможности для совместной работы со старшими коллегами в рамках программы измерений и, следовательно, возможности для приобретения ценного профессионального опыта.

5.5.3.4 Международные взаимные сравнения приборов, спонсируемые Комиссией по приборам и методам наблюдений

Время от времени КПМН выбирает какие-либо конкретные виды метеорологических измерений как предмет для изучения с целью развития соответствующих знаний. Приборы различного производства и приборы, представляемые странами-членами, сравниваются в стандартных условиях с использованием средств принимающей страны. Организационный комитет планирует такие взаимные сравнения и затем в своих отчетах описывает характеристики и эффективность приборов.

Если специалисты по приборам примут участие в таких мероприятиях, то они получат пользу от ознакомления с некоторыми из следующих видов деятельности: экспериментальное проектирование, размещение приборов, оперативные методы, отбор данных, получение данных, обработка данных, анализ и интерпретация результатов. Если проведение взаимных сравнений можно организовать в РЦП, то следует рассмотреть возможность организации параллельно специальных курсов профессионального обучения.

5.5.4 Затраты на подготовку кадров, предусматриваемые в бюджете

В каждой НМГС департамент инженерно-технического метеорологического обслуживания или метеорологических приборов должен предусматривать надлежащую и четко определенную сумму для профессиональной подготовки персонала в своем годовом бюджете, относящемся к общей схеме персонала службы. Ведь затраты средств происходят и в случае недостаточной профессиональной подготовки персонала: ошибки, аварии, потеря времени и материалов, разочарование и быстрая сменяемость персонала — все это приводит к плохому качеству данных и метеорологической продукции.

5.5.4.1 Экономическая эффективность

Деятельность по профессиональной подготовке кадров требует значительных затрат, а имеющиеся ресурсы практически всегда ограничены. Поэтому необходимо определять и сравнивать суммы затрат на различные виды профессионального обучения, а затем прослеживать за экономической эффективностью всех видов учебной деятельности и принимать соответствующие решения. В целом вложение средств НМГС в профессиональное обучение персонала всегда должно рассматриваться как ценный вклад в обеспечение деятельности этой организации.

5.5.4.2 Прямые и косвенные затраты

Затраты могут быть подразделены на прямые затраты на проведение определенных курсов профессионального обучения и на косвенные или накладные расходы на обеспечение учебных средств. Можно заранее определить, какая доля накладных расходов и прямых оперативных затрат должна приходиться на каждый вид деятельности по профессиональному обучению. Если учебные средства используются для многих видов деятельности в течение всего года, то доля косвенных расходов, приходящаяся на один вид деятельности, будет

низкой и тогда считается, что эти средства используются эффективно.

Прямые оперативные расходы могут включать: затраты на деловые поездки обучающихся и преподавателей, на жилье, питание и суточные расходы, плату за курсы и вознаграждение преподавателей, затраты на персонал ВМО, расходные материалы для оценки знаний студентов и проведение специальных курсов, а также расходы, связанные с обеспечением условий для обучающихся во внерабочее время.

К категории косвенных или накладных расходов можно отнести расходы, связанные с оплатой помещений в учебном центре (классные комнаты, мастерские и лаборатории), затраты на оборудование и текущие затраты, заработную плату преподавателей и административного персонала, административные расходы ВМО, затраты на подготовку учебных материалов (новых проектов курсов, конспектов со справочной информацией, аудиовизуальных материалов) и затраты на все расходные материалы, используемые в процессе обучения.

В целом общие затраты на различные виды обучения можно представить в порядке возрастания, от самых низких до самых высоких, приблизительно следующим образом (в зависимости от эффективности использования ресурсов):

a) профессиональное обучение на рабочих местах;
b) заочные курсы;
c) аудиовизуальные курсы;
d) командировки экспертов/передвижные семинары, курсы на местах;
e) национальные курсы, когда участники съезжаются в один центр;
f) обучение с использованием компьютеров (высокие первоначальные затраты на оборудование);
g) региональные курсы, на которых обучаются студенты из других стран;
h) обучение по долгосрочным стипендиям;
i) региональные курсы в специально оборудованном учебном центре.

ПРИЛОЖЕНИЕ

РЕГИОНАЛЬНЫЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ УЧЕБНЫЕ ЦЕНТРЫ

Страна	*Название центра*	*Регион ВМО*
Алжир	Гидрометеорологический учебный и научно-исследовательский институт (ГУНИИ), Оран	I
Ангола[a]	Региональный учебный центр, Мулемба	I
Египет	Региональный учебный центр, Каир	I
Кения[b]	Учебный и научно-исследовательский метеорологический институт, Найроби, и факультет метеорологии, Университет Найроби, Найроби	I
Мадагаскар	Высшая политехническая школа Антананариву, Университет Антананариву, Антананариву	I
Нигер	Африканская школа метеорологии и гражданской авиации (АШМГА), Ниамей, и Региональный учебный центр по агрометеорологии и оперативной гидрологии и их применениям (АГРГИМЕТ), Ниамей	I
Нигерия[b]	Метеорологический научно-исследовательский и учебный институт, Лагос, и факультет метеорологии, Федеральный технологический университет, Акуре	I
Китай[b]	Наньцзинский метеорологический институт, Наньцзин и Учебный центр Китайской метеорологической администрации, Пекин	II
Индия[b]	Учебный центр по телесвязи и радиометеорологии, Нью-Дели и Управление профессиональной подготовки, Пуна	II
Иран (Исламская Республика)	Учебный центр повышения квалификации в области метеорологических наук, Тегеран	II
Ирак	Региональный учебный центр, Багдад	II
Узбекистан	Гидрометеорологический техникум, Ташкент	II
Аргентина[b]	Факультет атмосферной науки, Университет Буэнос-Айреса, Буэнос-Айрес, и Управление образования и подготовки кадров Национальной метеорологической службы, Буэнос-Айрес	III
Бразилия	Факультет метеорологии, Федеральный университет Пары, Белен	III
Венесуэла	Факультет метеорологии и гидрологии, Центральный университет Венесуэлы, Каракас	III
Барбадос[b]	Карибский институт метеорологии и гидрологии, Бриджтаун, и Университет Вест-Индии, Бриджтаун	IV
Коста-Рика	Отделение физики атмосферы, Физическая школа, Университет Коста-Рики, Сан-Хосе	IV
Филиппины[b]	Факультет метеорологии и океанографии, Университет Филиппин, и Учебный центр Управления атмосферной, геофизической и астрономической служб Филиппин (ПАГАСА), Кезон-Сити	V
Израиль	Постдипломный учебный центр по прикладной метеорологии, Бет Даган	VI
Италия[b]	Международная школа по метеорологии Средиземноморья, Эриче, Сицилия, и Институт агрометеорологии и анализа окружающей среды в интересах сельского хозяйства, Флоренция	VI
Российская Федерация[b]	Институт повышения квалификации и Московский гидрометеорологический колледж, Москва, и Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург	VI
Турция	Анатолийская метеорологическая техническая высшая школа, Анкара	VI

a В настоящее время проводятся работы по повторному открытию РУЦ Ангола.

b В данных центрах имеется университетский компонент.

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Всемирная Метеорологическая Организация, 1989: *Руководство по Глобальной системе наблюдений.* ВМО-№ 488, Женева.

Craig, R.L. (ed.), 1987: *Training and Development Handbook: A Guide to Human Resource Development.* McGraw-Hill, New York.

Imai, M., 1986: Kaizen: *The Key to Japan's Competitive Success. Random House*, New York.

International Organization for Standardization, 1994*a*: *Quality Management and Quality Assurance Standards* – Part 1: *Guidelines for Selection and Use.* ISO 9000–1; 1994, Geneva.

International Organization for Standardization, 1994*b*: *Quality Management and Quality System Elements – Part 1: Guidelines.* ISO 9004-1; 1994, Geneva

Moss, G., 1987: *The Trainer's Handbook.* Ministry of Agriculture and Fisheries, New Zealand.

Walton, M., 1986: *The Deming Management Method.* Putnam Publishing, New York.

World Meteorological Organization, 1983: *Catalogue of Meteorological Training Publications and Audiovisual Aids.* Third edition, Education and Training Programme Report No. 4, WMO/TD-No. 124, Geneva.

World Meteorological Organization, 1986: *Compendium of Lecture Notes on Meteorological Instruments for Training Class III and Class IV Meteorological Personnel* (D.A. Simidchiev). WMO-No. 622, Geneva.

World Meteorological Organization, 1990: *Guidance for the Education and Training of Instrument Specialists* (R.A. Pannett). Education and Training Programme Report No. 8, WMO/TD-No. 413, Geneva.

World Meteorological Organization, 2002a: *Guidelines for the Education and Training of Personnel in Meteorology and Operational Hydrology.* Volume I: Meteorology. Fourth edition, WMO-No. 258, Geneva.

World Meteorological Organization, 2002b: *Initial Formation and Specialisation of Meteorological Personnel: Detailed Syllabus Examples.* WMO/TD-No. 1101, Geneva.

ПРИЛОЖЕНИЕ

СПИСОК ЛИЦ, СОДЕЙСТВОВАВШИХ ПОДГОТОВКЕ РУКОВОДСТВА

Artz, R. (United States)

Ball, G. (Australia)

Behrens, K. (Germany)

Bonnin, G.M. (United States)

Bower, C.A. (United States)

Canterford, R. (Australia)

Childs, B. (United States)

Claude, H. (Germany)

Crum, T. (United States)

Dombrowsky, R. (United States)

Edwards, M. (South Africa)

Evans, R.D. (United States)

Feister, E. (Germany)

Forgan, B.W. (Australia)

Hilger, D. (United States)

Holleman, I. (Netherlands)

Hoogendijk, K. (Netherlands)

Johnson, M. (United States)

Klapheck, K.-H. (Germany)

Klausen, J. (Switzerland)

Koehler, U. (Germany)

Ledent, T. (Belgium)

Luke, R. (United States)

Nash, J. (United Kingdom)

Oke, T. (Canada)

Painting, D.J. (United Kingdom)

Pannett, R.A. (New Zealand)

Qiu Qixian (China)

Rudel, E. (Austria)

Saffle, R. (United States)

Schmidlin, F.J. (United States)

Sevruk, B. (Switzerland)

Srivastava, S.K. (India)

Steinbrecht, W. (Germany)

Stickland, J. (Australia)

Stringer, R. (Australia)

Sturgeon, M.C. (United States)

Thomas, R.D. (United States)

Van der Meulen, J.P. (Netherlands)

Vanicek, K. (Czech Republic)

Wieringa, J. (Netherlands)

Winkler, P. (Germany)

Zahumensky, I. (Slovakia)

Zhou Weixin (China)

P-OBS_111350

www.wmo.int