

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
ГЛАВА 7. ИЗМЕРЕНИЕ РАДИАЦИИ	255
7.1 Общие сведения	255
7.1.1 Определения	255
7.1.2 Единицы и шкалы	256
7.1.2.1 Единицы	256
7.1.2.2 Стандартизация	256
7.1.3 Метеорологические требования	258
7.1.3.1 Данные для составления отчетности	258
7.1.3.2 Погрешность	258
7.1.3.3 Частота проведения наблюдений и регистрация данных	258
7.1.3.4 Время наблюдений	259
7.1.4 Методы измерений	259
7.2 Измерения прямой солнечной радиации	260
7.2.1 Прямая солнечная радиация	261
7.2.1.1 Основные эталонные пиргелиометры	262
7.2.1.2 Вторичные эталонные пиргелиометры	263
7.2.1.3 Полевые и сетевые пиргелиометры	265
7.2.1.4 Калибровка пиргелиометров	265
7.2.2 Экспонирование	266
7.3 Измерение суммарной и рассеянной радиации	266
7.3.1 Калибровка пиранометров	267
7.3.1.1 Поверка по эталонному пиргелиометру и затеняемому эталонному пиранометру	269
7.3.1.2 Поверка по эталонному пиргелиометру	270
7.3.1.3 Поочередная калибровка двух пиранометров с использованием пиргелиометра	271
7.3.1.4 Сравнения с эталонным пиранометром	272
7.3.1.5 Сравнения в лабораторных условиях	272
7.3.1.6 Регулярный контроль калибровочных коэффициентов	273
7.3.2 Характеристики пиранометров	273
7.3.2.1 Установка датчика в горизонтальном положении	273
7.3.2.2 Изменение чувствительности, обусловленное колебаниями температуры окружающей среды	274
7.3.2.3 Изменение чувствительности в зависимости от ориентации	274
7.3.2.4 Изменение чувствительности в зависимости от угла падения солнечных лучей	274
7.3.2.5 Погрешности определения часовых и суточных сумм	275
7.3.3 Установка и техническое обслуживание пиранометров	275
7.3.3.1 Поправки на закрытость горизонта	276
7.3.3.2 Установка пиранометров для измерения суммарной радиации	276
7.3.3.3 Установка пиранометров для измерения рассеянной радиации	277
7.3.3.4 Установка пиранометров для измерения отраженной радиации	278
7.3.3.5 Техническое обслуживание пиранометров	278
7.3.3.6 Установка и техническое обслуживание пиранометров на специальных платформах	278
7.4 Измерение интегральной и длинноволновой радиации	279
7.4.1 Приборы для измерения длинноволновой радиации	279
7.4.2 Приборы для измерения суммарной радиации	281
7.4.3 Калибровка пиргеометров	284
7.4.4 Установка пиррадиометров и пиргеометров	285
7.4.5 Регистрация и преобразование данных	286
7.5 Измерение специальных радиационных параметров	286
7.5.1 Измерение дневной освещенности	286
7.5.1.1 Приборы	287
7.5.1.2 Поверка	288
7.5.1.3 Регистрация и преобразование данных	288
7.6 Измерение ультрафиолетового (УФ) излучения	289
7.6.1 Приборы	292

	<i>Стр.</i>
7.6.1.1 Широкополосные датчики	292
7.6.1.2 Узкополосные датчики	293
7.6.1.3 Спектрорадиометры.....	295
7.6.2 Калибровка.....	296
ПРИЛОЖЕНИЕ 7.A. НОМЕНКЛАТУРА АКТИНОМЕТРИЧЕСКИХ И ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН.....	298
ПРИЛОЖЕНИЕ 7.B. МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ РАДИАЦИОННЫЕ ВЕЛИЧИНЫ, СИМВОЛЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ.....	300
ПРИЛОЖЕНИЕ 7.C. УСТАНОВЛЕННЫЕ ТРЕБОВАНИЯ ДЛЯ МИРОВЫХ, РЕГИОНАЛЬНЫХ И НАЦИОНАЛЬНЫХ РАДИАЦИОННЫХ ЦЕНТРОВ.....	302
ПРИЛОЖЕНИЕ 7.D. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ФОРМУЛЫ.....	306
ПРИЛОЖЕНИЕ 7.E. РАССЕЯННАЯ РАДИАЦИЯ — ПОПРАВКА НА ЗАТЕНЯЮЩЕЕ КОЛЬЦО	309
СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА	311

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. Измерения радиации имеют большое значение для следующих целей:

- a) исследование преобразования энергии в пределах системы Земля — атмосфера и ее 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, уходящей и остаточной 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 применений 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 ВМО (WMO, 1986). В части IV настоящего 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 и неопределенности выражаются в этой главе в виде 66 % доверительного интервала разности с истинным значением величины, которая схожа со среднеквадратическим отклонением совокупности значений. В необходимых случаях указываются особые доверительные интервалы погрешностей, и оценка погрешностей приводится с использованием методов Международной организации по стандартизации (ISO/IEC, 2008/JCGM, 2008). К примеру, 95 % неопределенность означает, что заявленная неопределенность относится к доверительному интервалу в 95 %.

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, «солнечная радиация» 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 — около 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 (CIE, 1987). 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 (IEC, 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, спецификации которых приведены в приложении 7.C. Кроме того, Мировой радиационный центр в Давосе (МРЦ) отвечает 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.

Определение для Международного радиометрического эталона

В прошлом в метеорологии применялись несколько радиационных эталонов или шкал, а именно: эталон Ангстрема 1905 г., Смитсоновская 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:

$$\begin{aligned}\frac{\text{МРЭ}}{\text{Ангстрема} - 1905} &= 1,026 \\ \frac{\text{МРЭ}}{\text{Смитсоновская} - 1913} &= 0,977 \\ \frac{\text{МРЭ}}{\text{МПШ} - 1956} &= 1,022\end{aligned}$$

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

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 взаимное сравнение 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 наблюдений приняла решение¹, 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

¹ Рекомендация Комиссии по приборам и методам наблюдения, принятая на ее одиннадцатой сессии (1994 г.).

в качестве эксперта. Группа должна провести обсуждение предварительных результатов сравнений на основе критериев, определенных МРЦ, дать оценку эталона и рекомендации по обновлению коэффициентов калибровки.

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 ч. Имеется также много потребностей в данных за более короткие периоды — до 1 мин или даже десятков секунд (для некоторых энергетических применений). Часто используются данные о суточных 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, месторасположении в пространстве и во времени, пространственной экспозиции и техническом 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. WMO, 1998). 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 части I, глава 1, приложение 1.E. Требования точности 95 % для энергетической экспозиции за сутки, определенные ВМО для международного обмена, составляют $0,4 \text{ МДж} \cdot \text{м}^{-2}$ для величин $\leq 8 \text{ МДж} \cdot \text{м}^{-2}$ и 5 % для величин $> 8 \text{ МДж} \cdot \text{м}^{-2}$.

7.1.3.3 ***Частота проведения наблюдений и регистрация данных***

Выполнение требований к точности может обеспечиваться путем проведения наблюдений с частотой меньше постоянной времени $1/\tau$ прибора даже в тех случаях, когда данные, подлежащие окончательной регистрации, представляют собой интегральные значения за периоды до 1 ч 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 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, а в других — как истинное солнечное время. Однако для автоматических систем более подходит стандартное или универсальное время, поскольку им легче пользоваться, но оно применимо только в том случае, если приведение данных к истинному солнечному времени 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 (а)–(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 ВМО (WMO, 1986).

Абсолютные радиометры — это приборы с самокалибровкой, т. е. измеряемая энергетическая освещенность заменяется электрической мощностью, которую можно измерить. Однако эта замена, 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 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 как околосолнечная радиация или светлое сияние. Апертура современных приборов соответствует углу полураствора, равному $2,5^\circ$, согласно некоторым моделям, и до около 5° от центра Солнца (что равно $6 \cdot 10^{-3}$ и $2,4 \cdot 10^{-2}$ ср

Таблица 7.1. Актинометрические приборы

Классификация приборов	Измеряемый параметр	Основное использование	Угол зрения (ср) (см. рисунок 7.1)
Абсолютный пиргелиометр	Прямая солнечная радиация	Первичный эталон	5×10^{-3} (половина угла около $2,5^\circ$)
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 $500 \pm 2,5$ нм, $368 \pm 2,5$ нм)	а) Эталон б) Измерения на сети	1×10^{-3} до 1×10^{-2} (полный угол около $2,3^\circ$)
Пиранометр	а) Суммарная (солнечная) радиация б) Рассеянная солнечная радиация с) Отраженная солнечная радиация	а) Рабочий эталон б) Измерения на сети	2π
Спектральный пиранометр	Суммарная (солнечная) радиация в широких спектральных полосах (т. е. со светофильтрами 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

соответственно). Монтаж пиргелиометра должен позволять быструю и точную 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 $2,5^\circ$ ($6 \cdot 10^{-3}$ ср), а угол скоса диафрагмы приемника был равен 1° . Для определения этих углов см. рисунок 7.1.

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:

$$E_N = E / R^2 \quad (7.1)$$

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 ISO, 1990a) 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. ISO, 1990a), но они не нашли широкого применения; однако без дополнительных мер по улучшению их характеристик 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:

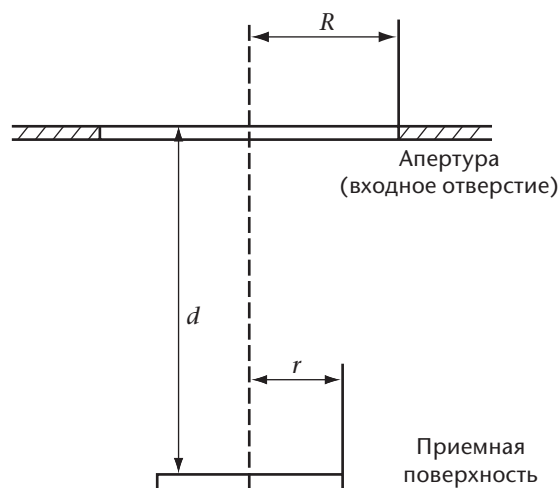


Рисунок 7.1. Схема ограничения поля зрения: половина центрального угла приемника излучения равна арктангенсу R/d ; угол скоса равен арктангенсу $(R-r)/d$.

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 ⁻¹)	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 1 100 Вт·м ⁻²)	0,2	0,5	
Спектральная чувствительность (процент отношения спектрального поглощения к спектральному пропусканию приемной поверхности в спектральном диапазоне 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	%	0,9	1,8
	кДж·м ⁻²	0,56	1
суммы за 1 ч	%	0,7	1,5
	кДж·м ⁻²	21	54
суммы за 1 сутки	%	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.

- приборы правильно установлены в месте наблюдений, эксплуатационный уход за ними обеспечивается согласно рекомендациям, приложенным к прибору;
- показатели ежеминутных и ежечасных наблюдений соответствуют прямой радиации безоблачного неба в солнечный полдень;
- 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 ВМО (WMO, 1986a). 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 $1,5 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}$.

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 оптимального режима, т. е. установить, насколько адекватно происходит электрическая замена. Такая процедура называется определением характеристик прибора.

Для того чтобы абсолютный пиргелиометр (отдельный прибор, а не тип прибора) использовался в качестве основного эталона, он должен удовлетворять следующим условиям:

- а) 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 $2 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ в условиях ясного неба, при которых проводятся калибровки (см. ISO, 1990a). 95 % значений суммарной погрешности какой-либо серии измерений не должны превышать $4 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ для любого измеряемого значения;
- б) каждый отдельный серийный прибор необходимо сравнивать с прибором, снабженным исчерпывающей информацией о его характеристиках; показания сравниваемого прибора не должны показывать отклонения выше указанных в пункте (а);
- в) подробное описание результатов таких сравнений и характеристики этого прибора должны предоставляться по запросу;
- г) 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 $1 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ с доверительной вероятностью 95 %.

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 $1 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ 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.

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°

Приемник 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:

$$E = K \cdot i_L \cdot i_R \quad (7.2)$$

где E — энергетическая освещенность в $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$; K — калибровочная постоянная, определенная сравнением с основным эталоном ($\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{А}^{-2}$); и i_L , i_R — ток в амперах, измеряемый в левой или правой полоске, экспонируемой прямому солнечному лучу соответственно.

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 – 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-индикатора 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 % 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 нацеливания следящей системы на солнце с погрешностью порядка $0,1^\circ$.

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 ЕКО, Erpley, Kipp and 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 вариацию 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, 1990b).

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 ежегодно или раз в 2 года; чем дольше они используются и чем суровее условия их эксплуатации, тем чаще должна проводиться калибровка.

7.2.2 Экспонирование

Для обеспечения непрерывной регистрации данных и снижения погрешностей весьма важно наличие точного следящего за Солнцем устройства, обеспечивающего погрешность слежения $0,2^\circ$ и не подверженного 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 на его внутренней стороне не появлялся конденсат.

7.3 ИЗМЕРЕНИЕ СУММАРНОЙ И РАССЕЯННОЙ РАДИАЦИИ

Солнечная радиация, создаваемая потоками излучения, приходящими из верхней полусферы в пределах телесного угла 2π 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 2π ср на плоскую поверхность в спектральном диапазоне от 300 до 3 000 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 коррозионного действия влажного воздуха (особенно вблизи моря). Приемник радиации должен быть герметично запаян внутри корпуса, или же корпус должен быть легкосъёмным, 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 в публикациях ISO (1990с) и WMO (1998).

В таблице 7.4 (основана на данных из ISO, 1990a) приведены характеристики пиранометров различных уровней качества с погрешностями, которые могут обеспечиваться при наличии отвечающего требованиям оборудования, хорошо обученного персонала и надлежащего контроля качества при соответствующих условиях состояния неба, кратко изложенных в 7.2.1.

7.3.1 Калибровка пиранометров

Калибровка пиранометров заключается в определении одной или более метрологических характеристик, в том числе связанных с условиями эксплуатации:

- a) угловое распределение энергетической освещенности;
- b) методы калибровки;
- 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) изменение характеристик во времени.

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.

Таблица 7.4. Характеристики рабочих пиранометров

Характеристика	Высокий класс ^a	Хороший класс ^b	Средний класс ^c
Время установления выходного сигнала (с точностью 95 %)	< 15 с	< 30 с	< 60 с
Смещение нуля:			
а) реакция на остатки тепловой радиации до 200 Вт·м ⁻²	7 Вт·м ⁻²	15 Вт·м ⁻²	30 Вт·м ⁻²
б) реакция на изменение окружающей температуры 5 К·ч ⁻¹	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 1 000 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 1 000 Вт·м ⁻²)	0,5	1	3
Спектральная чувствительность (процент отношения спектрального поглощения к спектральному пропусканию приемной поверхности в спектральном диапазоне от 300 до 3 000 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 1 000 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:

- а) Близкие к современному передовому уровню; подходят для использования в качестве рабочего эталона; используются только на станциях со специальным оборудованием и персоналом.
- б) Пригодны для производства сетевых измерений.
- с) Пригодны для использования на низкочастотной сети с измерениями средней точности.

Существует множество методов калибровки пиранометров, выполняемых по солнцу или в лабораторных условиях с использованием искусственных источников света, а именно:

- а) путем сравнения с эталонным пиргелиометром, измеряющим прямую солнечную радиацию и с затененным эталонным пиранометром, измеряющим рассеянную радиацию;
- б) путем сравнения с эталонным пиргелиометром по солнцу с использованием съемного затеняющего экрана для пиранометра;
- с) 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 откалиброванным вне лаборатории;
- f) в лабораторных условиях с помощью интегрирующей камеры, имитирующей рассеянную радиацию неба, путем сравнения с эталонным пиранометром такого же типа, предварительно откалиброванным вне лаборатории.

Существуют и другие методы, но чаще всего используются методы, указанные в (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 пары идентичных стандартных пиранометров в идентичных конфигурациях. Игнорирование этих сдвигов и различий может существенно исказить результаты.

Считается, что метод (c) дает весьма хорошие результаты без использования откалиброванного 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) результирующей плотностью потока длинноволновой радиации, поступающей из атмосферы к измерительному прибору.

Предпочтение следует отдавать калибровке пиранометра в обычном рабочем положении.

При калибровке по солнцу высота солнца должна определяться или рассчитываться до ближайшего значения с шагом $0,01^\circ$ за этот период от истинного солнечного времени (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 рассчитывается по формуле:

$$E \cdot \sin h + V_s k_s = V \cdot k \quad (7.3)$$

или

$$k = (E \sin h + V_s k_s) / V \quad (7.4)$$

где E — прямая солнечная радиация, измеренная с помощью пиргелиометра ($\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$); 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, ($\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{мкВ}^{-1}$); k_s — калибровочный коэффициент затененного эталонного пиранометра ($\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{мкВ}^{-1}$). 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 (1993), подобен методу, описанному в предыдущем разделе, с той лишь разницей, что суммарная радиация 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 уравнивания теплового и длинноволнового излучения стеклянного колпака; в основном достаточно примерно $10 \times 1/e$ постоянной времени термпары.

Разность между репрезентативными выходными сигналами затененного и незатененного пиранометра обусловлена вертикальной составляющей прямой солнечной радиации E , измеренной пиргелиометром. Таким образом:

$$E \cdot \sin h = (V_{\text{un}} - V_s) \cdot k \quad (7.5)$$

или

$$k = (E \cdot \sin h) / (V_{\text{un}} - V_s) \quad (7.6)$$

где E — прямая солнечная радиация, измеренная пиргелиометром ($\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$); 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 ($\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{мкВ}^{-1}$), представляющий собой величину, обратную чувствительности ($\text{мкВ} \cdot \text{Вт}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$).

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 измерениях суммарной и рассеянной радиации, выполняемых одним и тем же пиранометром, нулевые показания различаются несущественно, в уравнении 7.6 учитывать их нет необходимости.

7.3.1.3 **Поочередная калибровка двух пиранометров с использованием пиргелиометра**

Этот способ использует те же самые приборы, что описаны в разделе 7.3.1.1, но только используется пиргелиометр для обеспечения откалиброванных данных о радиации (E) и два пиранометра, которые требуется калибровать (Forga, 1996). По этому способу два калибруемых пиранометра поочередно затеняются и освещаются солнцем аналогично уравнению 7.3. В ходе проведения серии снимаются несколько групп отсчетов, каждая из которых выполняется в следующем порядке: в первой группе 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}). При обработке делается допущение, что для каждого пиранометра калибровочные коэффициенты рассеянной радиации (k_d) и суммарной радиации (k_g) являются одинаковыми и коэффициент калибровки пиранометра А выражается формулой:

$$k_A = k_{gA} = k_{dA} \quad (7.7)$$

при аналогичном допущении для коэффициентов пиранометра В. Тогда для времени t_0 в первоначальный период измененный вариант уравнения 7.3 является следующим:

$$E(t_0) \sin(h(t_0)) = k_A V_{gA}(t_0) - k_B V_{dB}(t_0) \quad (7.8)$$

Для времени t_1 во втором периоде, когда пиранометры меняются местами:

$$E(t_1) \sin(h(t_1)) = k_B V_{gB}(t_1) - k_A V_{dA}(t_1) \quad (7.9)$$

Поскольку единственными неизвестными в уравнениях 7.8 и 7.9 являются k_A и k_B , их можно получить для показателей 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 пиранометров 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 эталонным пиранометром**

Как указано в ISO (1992), 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 $k = R \cdot k_r$, 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 0,5–1,0 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 калибруемые 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 $\pm 0,5\%$. 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 производится регистрация также и прямой солнечной радиации, то анализируются две записи, как изложено 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 показаний 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 или 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 откалибровать 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 7.4 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 7.4 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 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 нормативно-технической документации станции на графике закрытости горизонта должны быть нанесены все мешающие объекты, а также указаны их угловые и линейные размеры.

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 нормативно-технической документации 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 местоположения станции 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 установке пиранометров на судах, вышках и буйах. Установка пиранометров на этих платформах затруднена и не всегда безопасна. 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 отдельных записей суммарной и рассеянной радиации. Методика предусматривает, чтобы первой корректировалась рассеянная радиация, а затем – суммарная. Оценивается не часть затененного неба, а исходящая от этой части неба часть радиации. Поскольку рассеянная радиация от части неба ниже 5° составляет менее 1 % от рассеянной радиации, ее обычно можно пренебречь. Особое внимание уделяется экранирующим предметам с угловыми размерами 10° и более, а также и тем, которые могут преграждать 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:

$$\Delta E_{\text{sky}} = \pi^{-1} \int_{\phi} \int_{\theta} \sin \theta \cos \theta d\theta d\phi \quad (7.10)$$

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 редуцирующий 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 термодатчиков (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 меди с медью. 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 следящего устройства за солнцем, 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.Е.

Одним из существенных источников погрешностей в данных рассеянной радиации является нулевой сигнал пиранометра. В условиях безоблачного неба нулевой сигнал у некоторых моделей приборов эквивалентен $5\text{--}10 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ 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 осаджений 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 установки.

Особое внимание следует уделять установке пиранометров тех систем, которые затруднительно обслуживать, в целях обеспечения надежности результатов наблюдений. Поэтому желательно предусмотреть своеобразную страховку в виде установки дублирующих систем измерений в определенных критически важных 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 суммарной. Большинство пиргеометров исключают коротковолновую 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.

Поток длинноволновой радиации L^- , измеряемый 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:

$$L^- = L^* + \sigma T_s^4 \quad (7.11)$$

где σ — постоянная Стефана-Больцмана ($5,670 4 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$); T_s — температура приемной поверхности пиргеометра (К); L^- — энергетическая освещенность, либо измеряемая с помощью эталонного пиргеометра, либо вычисляемая по температуре черной полости над верхним приемником ($\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$); L^* — радиация, измеренная приемником ($\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$). Измерение коротковолновой составляющей пиррадиометром проводится в соответствии с описанием 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 7.5.

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 уравнение 7.11:

$$L^- = L^* + k_2 \sigma T_s^4 + k_3 \sigma (T_d^4 - T_s^4) \quad (7.12)$$

где k_2 учитывает характеристики излучения термопары и неопределенности в измерении температуры холодной поверхности термопары; k_3 — чувствительность купола приемника к длинноволновой радиации ($\text{мкВ}/(\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2})$); и T_d — температура приемника (К).

Суммарный радиационный поток, измеренный приемником L^* , определяется формулой:

$$L^* = U/C (1 + k_1 \sigma T_s^4) \quad (7.13)$$

где C — чувствительность приемника ($\text{мкВ}/(\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2})$), k_1 — остаточный температурный коэффициент приемника. Хотя последние современные пиргеометры имеют компоновку электрической схемы с учетом температурной поправки, реализованную в их приемниках для того, чтобы k_1 был близок к нулю (как описано в разделе 7.3.2.2), все ещё рекомендуется задавать k_1 определением характеристик в лабораторных условиях, как это описывается в разделе 7.4.3.

В сравнениях, проведенных за последнее время, участвовали приборы аналогичной конструкции в разнообразных сочетаниях измерений. Такие исследования показали, что при соблюдении тщательной поверки потоки радиации, измеряемые ночью, согласуются с погрешностью в пределах $\pm 1 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$. 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 до $\pm 2 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ посредством затенения прибора, подобно тому, как это делается при измерении рассеянной солнечной радиации, вентиляции прибора, согласно рекомендациям ИСО (ISO, 1990a), 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, полученных от Всемирной группы по инфракрасным стандартам пиргеометров (ВИСГ) ВРЦ Давос.

7.4.2 Приборы для измерения суммарной радиации

Одной из проблем приборов для измерения суммарной 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. Поэтому рекомендованным методом для измерения суммарной радиации является выполнение одновременных раздельных измерений коротко- и длинноволновой радиации с использованием пиранометра и пиргеометра соответственно.

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 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, в этом случае используются эмпирические формулы для коррекции влияния ветра;
- b) определение влияния ветра с использованием электрического нагрева;
- c) стабилизация влияния ветра с помощью искусственной вентиляции;
- d) устранение влияния ветра путем защиты датчика от ветра.

Длинноволновый компонент пиррадиометров описывается уравнением 7.11.

В таблице 7.5 приводятся источники погрешностей, возникающих в ходе пиррадиометрических измерений, и предлагаются способы их определения.

Таблица 7.5. Источники погрешностей при измерениях пиррадиометрами

Источник погрешности	Характер влияния на пиррадиометры		Влияние на результат измерения	Способ определения характеристик
	с входным окном	без входного окна		
Влияние защиты	Спектральные характеристики пропускания	Нет	а) Изменение спектральной характеристики калибровки б) Уменьшение радиации на приемнике, обусловленное коротковолновым рассеянием в защитном окне (зависит от его толщины) в) Старение и другие изменения приемника	а) Определение спектрального ослабления защиты б) Определение влияния рассеянной радиации или эффекта при изменениях угла падения радиации в) Спектральный анализ: сравнение 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 гидрометеоров (дождь, снег, изморозь и др.) и дымки	Вариации спектрального пропускания плюс нерадиационный 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 приемной поверхности		Изменение калибровочного коэффициента а) Как функция спектральной чувствительности б) Как функция величины и азимута приходящей радиации в) Как функция влияния температуры	а) Спектрофотометрический анализ калибровки поглощающей поверхности б) 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

<i>Источник погрешности</i>	<i>Характер влияния на пирradiометры</i>		<i>Влияние на результат измерения</i>	<i>Способ определения характеристик</i>
	<i>с входным окном</i>	<i>без входного окна</i>		
Эффект асимметрии	a)	Различия теплопоглощения и отражения между приемниками, обращенными вверх и вниз	a)	Влияние на постоянную времени прибора
	b)	Различия вентиляции приемников, обращенных вверх и вниз	b)	Погрешность определения калибровочного коэффициента обоих приемников
	c)	Контроль и регулировка расположения поверхностей		

Трудно определить точность, достижимую на практике. Сравнения пиррадиометров различных конструкций, установленных в разных местах, дают результаты, показывающие различия в данных 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 суммарной радиации достигается путем отдельных измерений коротковолновой и длинноволновой составляющих радиации, и этот метод рекомендуется для проведения измерений пиррадиометрами. Коротковолновую радиацию можно измерять с использованием методик, указанных в разделах 7.2 и 7.3, а длинноволновую радиацию можно измерять пиргеометрами.

В таблице 7.6 приведены характеристики пиррадиометров различных уровней точности, а также погрешности, которые можно ожидать при проведении измерений с их помощью.

Таблица 7.6. Характеристики находящихся в эксплуатации пиррадиометров

<i>Характеристика</i>	<i>Высокий класс качества^a</i>	<i>Хороший класс качества^b</i>	<i>Средний класс качества^c</i>
Порог чувствительности ($\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$)	1	5	10
Стабильность (изменение в год в % от полной шкалы)	2 %	5 %	10 %
Косинусная погрешность при высоте солнца 10°	3 %	7 %	15 %
Азимутальная погрешность при высоте солнца 10° (отклонение от среднего, дополнительно к косинусной)	3 %	5 %	10 %
Температурная зависимость (в диапазоне от -20°C до 40°C) (отклонение от среднего)	1 %	2 %	5 %
Нелинейность (отклонение от среднего)	0,5 %	2 %	5 %
Различия в спектральной чувствительности, полученной интегрально для области длиннее 200 нм для диапазона от 300 до 75 000 нм	2 %	5 %	10 %

Примечания:

- a Близкие к современному передовому уровню; используются только на станциях со специализированным оборудованием и квалифицированным персоналом.
- b Пригодны для сетевых измерений.
- c Пригодны для использования на недорогой сети с измерениями средней точности.

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 от суммарного радиационного потока на выходе прибора (на основании уравнения 7.11) определяется по формуле:

$$V = L^* \cdot K \text{ or } K = V/L^* \quad (7.14)$$

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 изменяющихся потоках. Пиргеометры должны также периодически проходить контроль на предмет изменения пропускания коротковолновой радиации.

Симметрия балансомеров требует регулярной проверки. Она 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).

В большинстве случаев невозможно измерить напрямую отраженную солнечную радиацию и уходящую длинноволновую радиацию на уровне земной поверхности, поэтому для получения восходящих компонентов пиррадиометры или пиранометры и пиргеометры обычно устанавливают на определенной высоте от поверхности земли. Таким способом можно измерить всю радиацию, приходящую от поверхности под датчиком. Для этих приборов, имеющих угол обзора 2π ср и установленных на высоте 2 м над поверхностью земли, 90 % всей измеренной радиации приходит от поверхности диаметром 12 м (это число составляет 95 % — для поверхности диаметром 17,5 м и 99 % — для 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, и 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 СПЕЦИАЛЬНЫХ РАДИАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ

7.5.1 Измерение дневной освещенности

Освещенность создается на поверхности потоком лучистой энергии в спектральном диапазоне, 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 7.7. Световая эффективность определяется соотношением между плотностью излучения ($\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$) и излучательностью (лм). Она является функцией

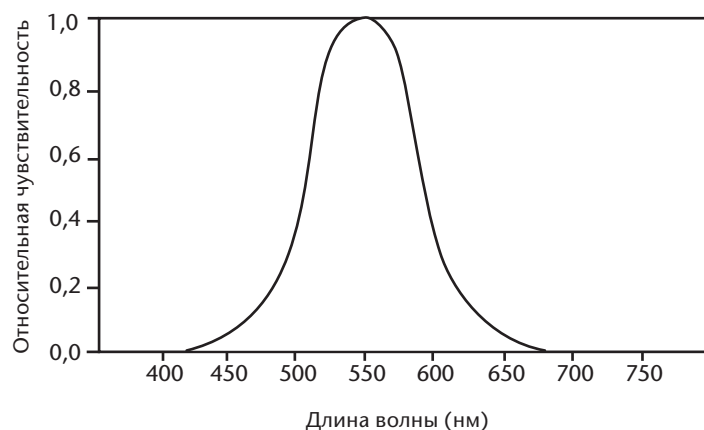


Рисунок 7.2. Относительная спектральная чувствительность $V(\lambda)$ человеческого глаза для дневного зрения.

Таблица 7.7. Значения относительной спектральной световой чувствительности человеческого глаза (единица при длине волны максимальной чувствительности)

Длина волны (нм)	Относительная чувствительность $V(\lambda)$	Длина волны (нм)	Относительная чувствительность $V(\lambda)$
380	0,00004	590	0,757
390	0,00012	600	0,631
400	0,0004	610	0,503
410	0,0012	620	0,381
420	0,0040	630	0,265
430	0,0116	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		

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):

$$\Phi_v = K_m \int_{380}^{780} \Phi(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (7.15)$$

где Φ_v — освещенность (лм·м⁻² или лк); $\Phi(\lambda)$ — спектральный лучевой поток (Вт·м⁻²·нм⁻¹); $V(\lambda)$ — чувствительность человеческого глаза; K_m — константа, соотносящая световые параметры с радиационными. Таким образом, 99 % видимой радиации лежит в диапазоне 400–730 нм.

Параметры и единицы световых переменных приводятся в приложении 7.А.

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 (CIE, 1994), в котором описаны рекомендованная практика установки оборудования, характеристики приборов, процедуры сбора данных и контроль качества на первом начальном уровне.

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 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Кроме того, он должен вентилироваться для предотвращения конденсации и/или нарастания льда на внешней поверхности приемника. Как правило, люксметр должен быть способен измерять освещенность в диапазоне 1–20 000 лк. В этом диапазоне погрешности должны оставаться в пределах, указанных в таблице 7.8. Эти значения основаны на рекомендациях МКО (CIE, 1987) в отношении погрешностей высококачественных люксметров, специально предназначенных для измерения дневной освещенности на открытом воздухе.

Таблица 7.8. Характеристики люксметров

<i>Параметр</i>	<i>Погрешность, %</i>
$V(\lambda)$, 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	$0,1\text{ K}^{-1}$
Нелинейность	0,2
Время срабатывания	0,1 с

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 $2,85^{\circ}$ и углом скоса диафрагм приемника излучения менее $1,76^{\circ}$.

7.5.1.2 Поверка

Поверка люксметров должна проводиться по стандартному люксметру типа А согласно процедурам, рекомендованным МКО (ICE, 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;
- b) прямую солнечную освещенность;
- c) яркость неба в телесных углах в границах $0,08$ ср (примерно $10^\circ \cdot 10^\circ$) 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) и изменения других параметров, таких как облачность и аэрозоли. 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. Обычно¹ оно менее биологически активно, и его интенсивность у поверхности Земли не изменяется значительно 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 от длины волны. Частым проявлением его биологической активности является эритемный эффект, т. е. в какой степени это излучение вызывает покраснение 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 в спектральном составе ультрафиолетовой энергетической освещенности ($\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{нм}^{-1}$) в диапазоне между 290 и 325 нм на 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.

¹ Спектр воздействия фотосинтеза на фитопланктон, к примеру, представляет собой важный компонент в УФ-А.

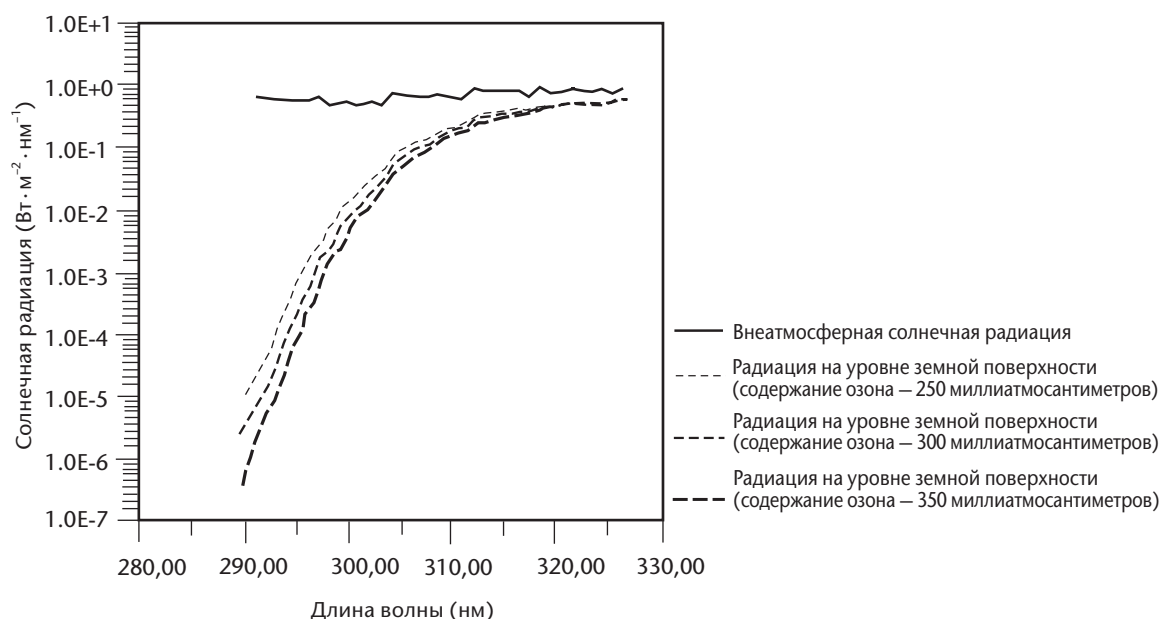


Рисунок 7.3. Результаты моделирования, иллюстрирующие воздействие повышения уровней содержания озона на прохождение УФ-радиации сквозь атмосферу.

Окружающие поверхности также оказывает значительное воздействие из-за многократного отражения. Это особенно относится к подстилающей поверхности, покрытой снегом.

Трудности в стандартизации измерений ультрафиолетового излучения обусловлены разнообразием областей, в которых они используются (WMO, 2003, 2011). 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. Стандарты нужны для сопоставления данных наблюдений, обеспечения их качества и контроля качества измерений, для архивации данных, а также для увязывания измерений с сообществами пользователей (WMO, 2003).

Были разработаны руководства и стандартные процедуры по методам определения характеристик и калибровке широкополосных приборов, спектрометрических УФ-излучения и радиометров с фильтром УФ-излучения, используемых для измерения УФ-диапазона солнечного излучения (см. WMO 1996, 1999a, 1999b, 2001, 2008, 2010a). Были также разработаны руководства и стандартные процедуры для размещенных на сети спектрометрических приборов (WMO, 2010b), хотя пока они не доступны на коммерческой основе в больших количествах. Применение рекомендуемых процедур для обеспечения качества данных на станциях размещения приборов измерения солнечной радиации в УФ-диапазоне обеспечит создание ценной базы данных различных диапазонов 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, 1993, 2001, 2003, 2010a, 2010b, 2011). Для суммарного спектрального излучения УФ-В диапазона требования зависят от цели. Спецификации для менее требовательных целей изложены в таблице 7.9 (WMO, 2001).

Таблица 7.9. Требования Программы ГСА к измерениям суммарной спектральной энергетической освещенности в диапазоне УФ-В

Характеристика	Требования
Косинусная ошибка ^a	a) $< \pm 10\%$ для углов падения луча $< 60^\circ$ b) $< \pm 10\%$ для интегрированного изотропного излучения
Минимальный спектральный диапазон	290–325 нм ^b
Ширина полосы пропускания (ПШПМ — полная ширина на половине максимума)	< 1 нм
Прецизионность длины волны	$< \pm 0,05$ нм
Точность настройки длины волны	$< \pm 0,1$ нм
Аппаратная функция	$< 10^{-3}$ максимального удаления в 2,5 ПШПМ от центра
Интервал длин волн дискредитации	$< \text{ПШПМ}$
Максимальная энергетическая освещенность	$> 1 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{нм}^{-1}$ на 325 нм и, в случае необходимости, $= 2 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{нм}^{-1}$ на 400 нм (полуденный максимум)
Порог обнаружения	$< 5 \cdot 10^{-5} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{нм}^{-1}$ (для соотношения сигнал-шум) (ССШ) = 1 при 1 нм ПШПМ)
Диффузный свет	$< 5 \cdot 10^{-4} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{нм}^{-1}$, когда прибор обращен к Солнцу при минимальном солнечном зенитном расстоянии
Температура прибора	Наблюдается и остается достаточно стабильной для обеспечения общей стабильности работы прибора
Время отклика	< 10 мин для каждого спектра, например для облегчения сопоставления с моделями
Общая погрешность калибровки ^c	$< \pm 10\%$ (если не ограничено порогом обнаружения)
Дата и время сканирования	Зарегистрированное с каждым спектром таким образом, что синхронизация по времени известна в пределах 10 с на каждой длине волны
Необходимые вспомогательные измерения	Прямая средняя спектральная освещенность или рассеянная спектральная освещенность Общее содержание озона в столбе атмосферы, например полученное по измерениям прямой средней спектральной освещенности Эритемно взвешенная освещенность, измеренная широкополосным радиометром Атмосферное давление Количество облачности Освещенность, измеренная люксометром Прямая освещенность при измерении нормально падающего луча пиргелиометром Видимость

Характеристика	Требования
Периодичность получения данных	По крайней мере одно сканирование в час и дополнительное сканирование в астрономический полдень для данной местности

Примечания:

- a Меньшие по величине косинусные ошибки были бы крайне желательны, но это нереально для большинства используемых сейчас приборов.
- b Общая неопределенность калибровки выражается уровнем доверия 95 % и включает в себя все неопределенности, связанные с калибровкой освещенности (например неопределенность для стандартных ламп, перенос неопределенностей, совмещенные неопределенности во время калибровки, дрейф нуля прибора между калибровками). Более подробно эти вопросы рассмотрены в работах Bernhard and Seckmeyer (1999), Cordero et. al. (2008) и Cordero et. al. (2013).
- c Желательно распространение на диапазон с большей длиной волны для становления УФ-климатологии в отношении биологических применений (см. WMO, 2001, 2010b).

Ниже для общей информации приведено описание типов приборов, которое поможет выбрать необходимые измерительные приборы.

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 интегрирования в дискретных участках спектра УФ-А и/или УФ-В. Третий класс приборов представляет собой спектрорадиометры, которыми последовательно или одновременно измеряют радиацию в предварительно определенных спектральных полосах.

7.6.1.1 Широкополосные датчики

Большая часть широкополосных датчиков, но не все, предназначена 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 et al. (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 не зеленого 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 спектральных 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 $0,5\% \text{ K}^{-1}$, а его кривая спектральной чувствительности смещается в сторону более 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

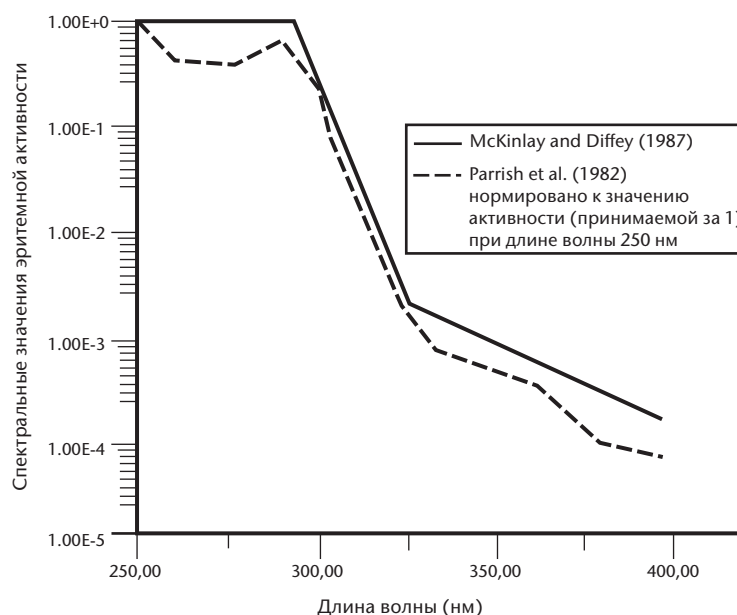


Рисунок 7.4. Эритемные кривые.

Источник: Parrish et al. (1982) and McKinlay and Diffey (1987)

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 (полная ширина на половине максимума) 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.

В основном техническое обслуживание таких приборов заключается в обеспечении чистоты наружных колпачков, горизонтальности прибора, поддержании надлежащего функционирования осушителя (если предусматривается) и системы термостабилизации. Контроль качества и обеспечение качества, а также тщательное обслуживание должны выполняться хорошо подготовленным персоналом.

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 (WMO, 2010a).

У этих датчиков для получения информации об участке УФ-диапазонов 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, хотя желательно иметь больше, чем один фильтр. Спецификации, необходимые для этого типа прибора (WMO, 2010a) приведены в таблице 7.10. 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

Таблица 7.10. Требования к измерениям суммарной узкополосной освещенности в УФ-В диапазоне

<i>Характеристика</i>	<i>Требования</i>
Диффузный свет, включая чувствительность к видимому и инфракрасному диапазонам радиации	< 1 % вклад в сигнал с длиной волны за пределами 2,5 ПШПМ для солнечного зенитного расстояния менее 70°
Стабильность в пределах диапазона времени по шкале времени до одного года	Изменение сигнала: Используется в настоящее время: лучше 5 % Желательно: 2 %
Минимальное количество каналов	По крайней мере один канал с центральной длиной волны < 310 нм и минимум один с центральной длиной волны > 330 нм
Максимальная энергетическая освещенность	Сигнал прибора не должен поглощаться при уровнях радиации, присутствующих в естественных условиях на поверхности Земли
Порог обнаружения	ССШ (соотношение сигнал-шум) = 3 для энергетической освещенности при солнечном зенитном расстоянии 80° и общем содержании озона в столбе атмосферного воздуха, равном 300 ед. по шкале Добсона
Температура прибора	Наблюдается и остается достаточно стабильной для обеспечения общей стабильности работы прибора
Время отклика	< 1 с
Время мультиплексирования	< 1 с
Точность определения времени	Лучше чем ± 10 с
Периодичность регистрации данных	≤ 1 мин
Выравнивание прибора	< 0,2°
Неопределенность калибровки	< 10 % (если не ограничено порогом обнаружения)

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 °С. 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 производить точные измерения низких уровней энергетической освещенности, особенно в области более коротких волн.

Изготовители приборов с количеством светофильтров более одного часто рекомендуют методы восстановления полного УФ-спектра и определения биологически эффективных доз для различных рабочих спектров, количества озона в столбе атмосферного воздуха и затухания в облаках с помощью моделируемых соотношений, определяемых в пределах измеренных длин волн (WMO, 2010a). Приборы, работающие на одной длине волны, используются также как вспомогательные для обеспечения временного 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 $0,012 \text{ нм K}^{-1}$ для очень узкополосных фильтров (менее 1 нм).

Обслуживание простых приборов с одним фильтром 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 выпускаемых промышленностью 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 (WMO, 2001) чаще всего используется фотоэлектронный умножитель. В некоторых, менее дорогих приборах используется фотодиод или цепи приборов с зарядовой связью (WMO, 2010b), позволяющие одновременно измерять весь спектральный диапазон, представляющий интерес. 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 $2,0 \text{ нм}$. 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-спектра и части видимой ($290\text{--}450 \text{ нм}$) 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 штатных операторов высокой квалификации, 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, 1999a, 1999b, 2001, 2008, 2010a, 2010b) и опубликованы в соответствующей научной литературе. Спектрорадиометры должны поверяться по стандартным лампам, которые были поверены в лабораториях национальных стандартов. 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 США 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 суточных 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 от 5 % до 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 измеряемого и спектрального состава света эталонной лампы;
 - ii) значительными изменениями спектрального состава измеряемого УФ-В излучения с изменениями зенитного угла 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 к большему. Неточное измерение расстояния между лампой и калибруемым прибором может также привести к погрешности порядка 1 %, поскольку величина потока обратно пропорциональна квадрату расстояния между источником и приемником. Webb et al. (1994) описывают различные аспекты возникновения погрешности, связанные с использованием эталонных ламп при калибровке УФ-спектрорадиометров.

Проблемы, связанные с широкополосными приборами, возникают ввиду: а) сложного набора светофильтров, используемых для выделения эритемной радиации из приходящей солнечной; б) 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. Различные методы калибровки широкополосных приборов описаны в публикации WMO (2008).

Детекторы-ловушки могли бы успешно использоваться в узкополосных датчиках, но до настоящего времени они 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. Различные методы калибровки узкополосных датчиков, а также их преимущества и недостатки описаны в публикации WMO (2010a).

Спектрорадиометры должны калиброваться в том же положении, в котором они будут находиться при проведении измерений, поскольку многие спектрорадиометры подвергаются неблагоприятному воздействию изменений положения в пространстве. Калибровка спектрорадиометра должна также включать в себя проверку точности выборки выделения участков длины волны монохроматором, проверку на любые изменения в юстировке внутренней оптики и ее чистоты, а также проверку электронного оборудования. Необходимо дать описание выделенной полосы, например, путем сканирования с помощью гелий-кадмиевого лазера ($\lambda = 325$ нм), причем только один раз, поскольку её характеристики обычно не меняются со временем.

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 установленному графику. Источники излучения, используемые для калибровки, должны гарантировать соответствие калибровки абсолютным стандартам радиации, находящимся в 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 квалификацией и опытом работы сотрудников и имеющейся на станции документацией, содержащей указания и процедуры, подобные опубликованным ВМО (WMO, 1996, 1999a, 1999b, 2001, 2008, 2010a, 2010b). В дополнение к абсолютным калибровкам приборов весьма целесообразно проводить сличения источников, используемых для калибровки, 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 измерения	Соотношение	Примечания
Энергия электромагнитного излучения	$Q, (W)$	Дж = Вт·с	–	–
Поток излучения	$\Phi, (P)$	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, приходящий на единицу поверхности
Сила потока излучения поверхностью	L	Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹	$L = \frac{d^2\Phi}{d\Omega \cdot dA \cdot \cos\theta}$	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 суммарной радиации за суточный интервал времени
Сила излучения	I	Вт·ср ⁻¹	$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$	Может использоваться для потока излучения «точечного источника»

2) Фотометрические величины

Наименование	Символ	Единица измерения
Световая энергия	Q_v	лм·с
Световой поток	Φ_v	лм
Светность	M_v	лм·м ⁻²
Освещенность	E_v	лм·м ⁻² = лк
Световая экспозиция	H_v	лм·м ⁻² ·с = лк·с
Сила света	I_v	лм·ср ⁻¹ = кд
Яркость	L_v	лм·м ⁻² ·ср ⁻¹ = кд м ⁻²
Плотность светового потока	$(M_v; E_v)$	лм·м ⁻²

3) Оптические характеристики

Наименование	Символ	Определение	Примечания
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.В. МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ РАДИАЦИОННЫЕ ВЕЛИЧИНЫ, СИМВОЛЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Параметр	Символ	Уравнение	Определения и замечания	Единицы измерения
Нисходящая радиация	$\Phi_{\downarrow}^a$	$\Phi_{\downarrow} = \Phi_g\downarrow + \Phi_r\downarrow$	Нисходящий поток излучения	Вт
	$Q_{\downarrow}$	$Q_{\downarrow} = Q_g\downarrow + Q_r\downarrow$	Нисходящая энергия излучения	Дж·(Вт·с)
	$M_{\downarrow}$	$M_{\downarrow} = M_g\downarrow + M_r\downarrow$	Нисходящая энергетическая светимость ^b	Вт·м ⁻²
	$E_{\downarrow}$	$E_{\downarrow} = E_g\downarrow + E_r\downarrow$	Нисходящая энергетическая освещенность	Вт·м ⁻²
	$L_{\downarrow}$	$L_{\downarrow} = L_g\downarrow + L_r\downarrow$	Нисходящая энергетическая яркость	Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹
	$H_{\downarrow}$	$H_{\downarrow} = H_g\downarrow + H_r\downarrow$ (g = суммарная) (l = длинноволновая)	Нисходящая энергетическая экспозиция для заданного интервала времени	Дж·м ⁻² на интервал времени
Восходящая радиация	$\Phi_{\uparrow}^a$	$\Phi_{\uparrow} = \Phi_r\uparrow + \Phi_l\uparrow$	Восходящий поток излучения	Вт
	$Q_{\uparrow}$	$Q_{\uparrow} = Q_r\uparrow + Q_l\uparrow$	Восходящая энергия излучения	Дж·(Вт·с)
	$M_{\uparrow}$	$M_{\uparrow} = M_r\uparrow + M_l\uparrow$	Восходящая энергетическая светимость	Вт·м ⁻²
	$E_{\uparrow}$	$E_{\uparrow} = E_r\uparrow + E_l\uparrow$	Восходящая энергетическая освещенность	Вт·м ⁻²
	$L_{\uparrow}$	$L_{\uparrow} = L_r\uparrow + L_l\uparrow$	Восходящая энергетическая яркость	Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹
	$H_{\uparrow}$	$H_{\uparrow} = H_r\uparrow + H_l\uparrow$	Восходящая энергетическая экспозиция для заданного интервала времени	Дж·м ⁻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)	$\Phi_d\downarrow$		Индекс d = рассеянная	Как для нисходящей радиации
	$Q_d\downarrow$			
	$M_d\downarrow$			
	$E_d\downarrow$			
	$L_d\downarrow$			
	$H_d\downarrow$			

Параметр	Символ	Уравнение	Определения и замечания	Единицы измерения
Восходящая/ 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	$\Phi_r\uparrow$ $Q_r\uparrow$ $M_r\uparrow$ $E_r\uparrow$ $L_r\uparrow$ $H_r\uparrow$		Индекс r = отраженная (можно использовать индексы s (зеркальная) и d (рассеянная), если необходимо, подчеркнуть различие между этими двумя компонентами)	Как для нисходящей радиации
Результирующая радиация (радиационный баланс)	Φ^* Q^* M^* E^* L^* H^*	$\Phi^* = \Phi\downarrow - \Phi\uparrow$ $Q^* = Q\downarrow - Q\uparrow$ $M^* = M\downarrow - M\uparrow$ $E^* = E\downarrow - E\uparrow$ $L^* = L\downarrow - L\uparrow$ $H^* = H\downarrow - H\uparrow$	Для каждого индекса, если рассматривается только коротковолновая или длинноволновая остаточная радиация	Как для нисходящей радиации
Прямая солнечная радиация	E	$E = E_0\tau$ $\tau = e^{-\delta/\cos\theta_\odot}$	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

Примечания:

- Вместо символов $\downarrow$ или $\uparrow$ можно использовать «-» и «+» (например, $\Phi^+ = \Phi\uparrow$).
- 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 $F = \Phi/\text{площадь}$, хотя он не очень рекомендуется.
- В случае наклонных поверхностей $\theta_\odot$ — угол между нормалью к поверхности и направлением на солнце.

ПРИЛОЖЕНИЕ 7.С. УСТАНОВЛЕННЫЕ ТРЕБОВАНИЯ ДЛЯ МИРОВЫХ, РЕГИОНАЛЬНЫХ И НАЦИОНАЛЬНЫХ РАДИАЦИОННЫХ ЦЕНТРОВ

Мировые радиационные центры

Мировые радиационные центры были назначены 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:

- a) хранить и поддерживать в рабочем состоянии группу приборов, состоящую по крайней мере из трех стабильных абсолютных пиргелиометров, 95 % погрешности которых составляют менее $1 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ при сопоставлении с Мировым радиометрическим эталоном при стабильных, безоблачных погодных условиях и прямой энергетической освещенности выше $700 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$; при этом предполагается, что 95 % любого отдельного измерения прямой солнечной энергетической освещенности будет находиться в пределах $4 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ 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) персонал 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 поверочного 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 разработки, способствующие 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:

- 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) каждые пять лет проходить оценку, проводимую международным агентством или экспертами КПМН.

Региональные радиационные центры

Региональный радиационный центр создается региональной ассоциацией как центр внутрирегионального сравнения радиационных приборов в рамках Региона и поддержания 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 приборов, состоящую, по крайней мере, из трех стабильных пиргелиометров с 95 % погрешностью, составляющей менее $1 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ в сопоставлении с группой международных эталонов при стабильных безоблачных погодных условиях и прямой энергетической освещенности выше $700 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$; при этом предполагается, что 95 % любого отдельного измерения прямой солнечной энергетической освещенности будет находиться в пределах $6 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ энергетической освещенности;
- b) не реже одного раза в пять лет один из радиометров должен сравниваться согласно санкции КПМН/ВМО 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 повторную калибровку 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 исследований в области радиации;
- g) оценка его работы должна проводиться национальным или международным агентством либо 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 менее $4 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ и сопоставимой с региональной реализацией мирового радиометрического эталона при стабильных, безоблачных погодных условиях и прямой энергетической

освещенности выше $700 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$; при этом предполагается, что 95 % любого отдельного измерения прямой солнечной энергетической освещенности будет находиться в пределах $20 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ 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 функционирования 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 повторную калибровку в одном из региональных радиационных центров;
- d) иметь необходимое оборудование и аппаратуру или доступ к ним для проверки характеристик приборов, используемых на национальной сети станций;
- e) состав сотрудников центра должен сохранять преемственность и включать высококвалифицированных специалистов с большим опытом исследований в области 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 другим органом, национальный радиационный центр должен поддерживать с ним тесную связь.

Список мировых и региональных радиационных центров

Мировые радиационные центры

Давос	(Швейцария)
Санкт-Петербург (см. Примечание)	(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)
Токио	(Япония)

Регион III (Южная Америка):

Буэнос-Айрес	(Аргентина)
Сантьяго	(Чили)
Уаяо	(Перу)

Регион IV (Северная Америка, 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)
Тулуза/Карпантра	(Франция)
Уккле	(Бельгия)
Линденберг	(Германия)

Примечание: действует, главным образом, как Мировой центр радиационных данных в рамках Стратегического плана Глобальной службы атмосферы.

ПРИЛОЖЕНИЕ 7.D. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ФОРМУЛЫ

Общие сведения

Все астрономические данные могут быть получены из таблиц в морских астрономических ежегодниках или из таблиц эфемерид. Однако для практических нужд используются приближенные формулы. Michalsky (1988a, 1988b) 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 (ВВ) (например, часы + минуты/60 + число часов по Гринвичу);
- d) широта в градусах (северная положительная);
- e) долгота в градусах (восточная положительная).

Для определения юлианской даты (JD) *Astronomical Almanac* устанавливает текущий юлианский день от первого юлианского дня, назначенного на полдень 1 января 2000 г. по всемирному времени (ВВ). Этот юлианский день равен 2 451 545,0. Юлианскую дату (JD) можно определить по формуле:

$$JD = 2\,432\,917,5 + \text{delta} \cdot 365 + \text{leap} + \text{day} + \text{hour}/24$$

где:

delta = год – 1949;

leap = високосность = целая часть от (delta/4)

Константа 2 432 917,5 — 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) = $280,460 + 0,985\,647\,4 \cdot n$ ($0 \leq L < 360^\circ$);
- c) g (средняя аномалия) = $357,528 + 0,985\,600\,3 \cdot n$ ($0 \leq g < 360^\circ$);
- d) l (эклиптическая долгота) = $L + 1,915 \cdot \sin(g) + 0,020 \cdot \sin(2g)$ ($0 \leq l < 360^\circ$);
- e) ep (отклонение от эклиптики) = $23,439 - 0,000\,000\,4 \cdot n$ (градусы).

Следует отметить, что в спецификациях указано, 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:

$$\begin{aligned}\tan(ra) &= \cos(ep) \cdot \sin(l) / \cos(l) \\ \sin(dec) &= \sin(ep) \cdot \sin(l)\end{aligned}$$

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):

$$\text{GMST} = 6,697\,375 + 0,065\,709\,824\,2 \cdot n + \text{hour}(\text{UT})$$

где: $0 \leq \text{GMST} < 24\text{h}$

$$\text{LMST} = \text{GMST} + (\text{east longitude}) / (15^\circ \text{h}^{-1})$$

На основании LMST рассчитывается часовой угол (ha) (ha и ra — в градусах):

$$ha = 15 \cdot \text{LMST} - ra \quad (-12 \leq ha < 12\text{h})$$

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:

$$\sin(el) = \sin(dec) \cdot \sin(lat) + \cos(dec) \cdot \cos(lat) \cdot \cos(ha)$$

и

$$\begin{aligned}\sin(az) &= -\cos(dec) \cdot \sin(ha) / \cos(el) \\ \cos(az) &= (\sin(dec) - \sin(el) \cdot \sin(lat)) / (\cos(el) \cdot \cos(lat))\end{aligned}$$

где азимут меряется 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:

- а) простое уравнение рефракции r для зенитных углов $< 75^\circ$:

$$r = 0^\circ,004\,52\,P \tan z / (273 + T)$$

где z — дистанция зенита в градусах; P — давление в гектопаскалях и T — температура в $^\circ\text{C}$.

- б) для зенитных углов больше 75° и высоты меньше 15° рекомендуется следующая аппроксимация:

$$r = \frac{P(0,159\,4 + 0,019\,6a + 0,000\,02a^2)}{\left[(273 + T)(1 + 0,505a + 0,084\,5a^2)\right]}$$

где a — высота ($90^\circ - z$), $h = el + r$ 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 $\pm 3,3\%$ 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) является отношением массы атмосферы вдоль наклонного пути к массе атмосферы по вертикали; таким образом, относительная масса атмосферы является нормирующим множителем. В плоскопараллельной структуре непреломляющей атмосферы m равняется $1/\sin h_0$ или $1/\cos z_0$.

Местное истинное время

Среднее солнечное время, на котором основано наше гражданское (поясное) 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 в 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.Е. 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 et al. (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 суток, может быть выражена следующим образом:

$$D_v \approx \frac{b}{r} \cos^3 \delta \int_{t_{\text{rise}}}^{t_{\text{set}}} L(t) \cdot \sin h_{\odot}(t) dt$$

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, $t_{\text{rise}} = -t_{\text{set}}$ и $\cos t_{\text{rise}} = -\tan \Phi \cdot \tan \delta$); $L(t)$ — светимость атмосферы в течение дня; $h_{\odot}$ — высота солнца.

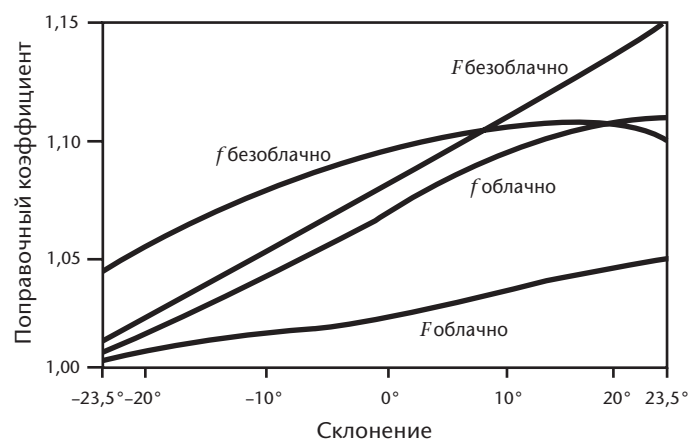
С помощью этого уравнения и при определенных допущениях относительно светимости атмосферы можно определить поправочный коэффициент f :

$$f = \frac{1}{1 - \frac{D_v}{D}}$$

где D — рассеянная радиация незатененного неба. На рисунке ниже 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:

$$\frac{D_v}{D_{\text{overcast}}} = \frac{b}{r} \cos^3 \delta (t_{\text{set}} - t_{\text{rise}}) \cdot \sin \Phi \cdot \sin \delta + \cos \Phi \cdot \cos \delta \cdot (\sin t_{\text{set}} - \sin t_{\text{rise}})$$

где δ — склонение солнца; Φ — географическая широта; t_{rise} и t_{set} — часовой угол соответственно на восходе и закате солнца (подробнее см. выше).



Сравнение рассчитанных и определенных эмпирически поправочных коэффициентов для затеняющего кольца, причем $b/r = 0,169$; f — вычисленная кривая и F — эмпирическая кривая.

Источник: Dehne (1980)

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

- 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.
- Bernhard, G. and G. Seckmeyer, 1999: Uncertainty of measurements of spectral solar UV irradiance. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 104(D12):14321–14345.
- 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*, 16:1854–1861.
- Cordero R.R., G. Seckmeyer, A. Damiani, F. Labbe and D. Laroze, 2013: Monte Carlo-based uncertainties of surface UV estimates from models and from spectroradiometers. *Metrologia*, 50(5):L1–L5.
- Cordero R.R., G. Seckmeyer, D. Pissulla, L. DaSilva and F. Labbe, 2008: Uncertainty evaluation of spectral UV irradiance measurements. *Measurement Science and Technology*, 19(4):1–15.
- Dehne, K., 1980: Vorschlag zur standardisierten Reduktion der Daten verschiedener nationaler Himmelsstrahlungs-Messnetze. *Annalen der Meteorologie* (Neue Folge), 16:57–59.
- Drummond, A.J., 1956: On the measurement of sky radiation. *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie*, Serie B, 7:413–436.
- Forgan, B.W., 1996: A new method for calibrating reference and field pyranometers. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 13:638–645.
- 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*, 29:448–460.
- International Commission on Illumination, 1987: *Methods of Characterizing Illuminance Meters and Luminance Meters*, CIE 69-1987. Vienna.
- , 1994: *Guide to Recommended Practice of Daylight Measurement*, CIE 108-1994. Vienna.
- International Electrotechnical Commission, 1987: *International Electrotechnical Vocabulary*, Chapter 845: Lighting, IEC 60050-845. Geneva.
- International Organization for Standardization, 1990a: *Solar Energy – Specification and Classification of Instruments for Measuring Hemispherical Solar and Direct Solar Radiation*, ISO 9060:1990. Geneva.
- , 1990b: *Solar Energy – Calibration of Field Pyrheliometers by Comparison to a Reference Pyrheliometer*, ISO 9059:1990. Geneva.
- , 1990c: *Solar Energy – Field Pyranometers – Recommended Practice for Use*, ISO/TR 9901:1990. Geneva.
- , 1992: *Solar Energy – Calibration of Field Pyranometers by Comparison to a Reference Pyranometer*, ISO 9847:1992. Geneva.
- , 1993: *Solar Energy – Calibration of a Pyranometer Using a Pyrheliometer*, ISO 9846:1993. Geneva.
- International Organization for Standardization/International Electrotechnical Commission, 2008: *Uncertainty of Measurement – Part 3: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, ISO/IEC Guide 98-3:2008, Incl. Suppl. 1:2008/Cor 1:2009, Suppl. 1:2008, Suppl. 2:2011. Geneva. (equivalent to: Joint Committee for Guides in Metrology, 2008: *Evaluation of Measurement Data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, JCGM 100:2008, Corrected in 2010).
- Kerr, J.B. and T.C. McElroy, 1993: Evidence for large upward trends of ultraviolet-B radiation linked to ozone depletion. *Science*, 262:1032–1034.
- Le Baron, B.A., W.A. Peterson and I. Dirmhirn, 1980: Corrections for diffuse irradiance measured with shadowbands. *Solar Energy*, 25:1–13.
- McKinlay, A.F. and B.L. Diffey, 1987: A reference action spectrum for ultraviolet induced erythema in human skin. In: *Human Exposure to Ultraviolet Radiation: Risks and Regulations* (W.F. Passchier and B.F.M. Bosnjakovic, eds.), Elsevier, Amsterdam, pp. 83–87.
- Michalsky, J.J., 1988a: The astronomical almanac's algorithm for approximate solar position (1950–2050). *Solar Energy*, 40(3):227–235.
- , 1988b: Errata. The astronomical almanac's algorithm for approximate solar position (1950–2050). *Solar Energy*, 41(1):113.
- Parrish, J.A., K.F. Jaenicke and R.R. Anderson, 1982: Erythema and melanogenesis action spectra of normal human skin. *Photochemistry and Photobiology*, 36:187–191.
- 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 NO₂ in the UV and visible region (200–700 nm) at 298 K. *Journal of Photochemistry and Photobiology, A: Chemistry*, 40:195–217.
- 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*, 8:709–762.
- Webb, A.R., B.G. Gardiner, M. Blumthaler and P. Foster, 1994: A laboratory investigation of two ultraviolet spectroradiometers. *Photochemistry and Photobiology*, 60(1):84–90.
- World Meteorological Organization, 1986: *Revised Instruction Manual on Radiation Instruments and Measurements*. World Climate Research Programme Publications Series No. 7 (WMO/TD-No. 149). Geneva.
- , 1993: *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.
- , 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.
- , 1998: *Baseline Surface Radiation Network (BSRN): Operations Manual* (WMO/TD-No. 879). Geneva.
- , 1999a: *Guidelines for Site Quality Control of UV Monitoring*. Global Atmosphere Watch Report No. 126 (WMO/TD-No. 884). Geneva.
- , 1999b: *Report of the LAP/COST/WMO Intercomparison of Erythral Radiometers* (Thessaloniki, Greece, 13–23 September 1999). Global Atmosphere Watch Report No. 141 (WMO/TD-No. 1051). Geneva.
- , 2001: *Instruments to Measure Solar Ultraviolet Radiation. Part 1: Spectral Instruments*. Global Atmosphere Watch Report No. 125 (WMO/TD-No. 1066). Geneva.
- , 2003: *Quality Assurance in Monitoring Solar Ultraviolet Radiation: the State of the Art*. Global Atmosphere Watch Report No. 146 (WMO/TD-No. 1180). Geneva.
- , 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.
- , 2008: *Instruments to Measure Solar Ultraviolet Radiation – Part 2: Broadband Instruments Measuring Erythemally Weighted Solar Irradiance*. Global Atmosphere Watch Report No. 164 (WMO/TD-No. 1289). Geneva.
- , 2010a: *Instruments to Measure Solar Ultraviolet Radiation – Part 3: Multi-channel Filter Instruments*. Global Atmosphere Watch Report No. 190 (WMO/TD-No. 1537). Geneva.
- , 2010b: *Instruments to Measure Solar Ultraviolet Radiation – Part 4: Array Spectroradiometers*. Global Atmosphere Watch Report No. 191 (WMO/TD-No. 1538). Geneva.
- , 2011: *Data Quality Objectives (DQO) for Solar Ultraviolet Radiation Measurements – Part I* (Addendum to *Quality Assurance in Monitoring Solar Ultraviolet Radiation: State of the Art*, GAW Report No. 146). Global Atmosphere Watch Report No. 198. Geneva.
-