

ГЛАВА 8. ИЗМЕРЕНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ СОЛНЕЧНОГО СИЯНИЯ

8.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Термин «солнечное сияние» связан с яркостью солнечного диска, превышающей фон диффузного свечения неба, или, что лучше видно невооруженным глазом, с появлением теней позади освещенных объектов. Как таковой, этот термин больше связан с видимым излучением, а не с излучением в области других длин волн, хотя оба аспекта неотделимы друг от друга. На практике, однако, первая формулировка была получена непосредственно на основе данных сравнительно простого регистратора солнечного сияния Кэмпбелла-Стокса (см. 8.2.3), принцип работы которого основан на обнаружении солнечного сияния, когда солнечный луч, сфокусированный специальными линзами, способен прожечь специальную темную бумажную ленту. Этот регистратор был введен в эксплуатацию на метеорологических станциях еще в 1880 г. и по-прежнему используется на многих пунктах наблюдений. Поскольку отсутствуют международные требования, касающиеся размеров и качества тех частей регистратора, которые фиксируют солнечное сияние, его использование давало различные значения продолжительности солнечного сияния.

Для получения с мировой сети станций однородных данных о продолжительности солнечного сияния ВМО рекомендовала использовать специальный тип регистратора солнечного сияния Кэмпбелла-Стокса, так называемый временный эталон солнечного сияния (ВЭСС) (ВМО, 1962). Усовершенствование, полученное с помощью этого «механического определителя» солнечного сияния, было эффективным только в течение предварительного периода, необходимого для нахождения точного физического определения термина «продолжительность солнечного сияния», которое позволяет конструировать как автоматические регистраторы солнечного сияния, так и, по возможности, более точно аппроксимировать «шкалу» регистратора ВЭСС. В отношении «шкалы» настоятельно рекомендовалось определение порогового значения прямой солнечной радиации, при котором возможно прожигание лент на регистраторах Кэмпбелла-Стокса. Исследования, проведенные на различных станциях, показали, что пороговое значение прямой солнечной радиации для прожигания ленты колеблется между 70 и 280 Вт·м⁻² (Bider, 1958; Baumgartner, 1979). Однако дальнейшие исследования, проведенные во Франции в основном с помощью регистратора ВЭСС, дали среднее значение 120 Вт·м⁻², которое затем было рекомендовано в качестве порога прямой солнечной радиации, чтобы четко определять продолжительность солнечного сияния¹. Что касается разброса тестовых результатов, то он составляет 20 %, и это значение должно включаться в спецификацию приборов. В качестве эталонного датчика для обнаружения порога прямой солнечной радиации был рекомендован пиргелиометр. Для усовершенствования эталона в будущем необходимо, по-видимому, окончательно установить значение угла зрения пиргелиометра (см. настоящий том, глава 7, 7.2 и 7.2.1.3).

8.1.1 Определение

В соответствии с рекомендациями ВМО (2010)² продолжительность солнечного сияния в течение данного периода времени определяется как сумма времени, в течение которого значение прямой солнечной радиации превышает 120 Вт·м⁻².

¹ Рекомендовано КПМН на восьмой сессии (1981 г.) в соответствии с рекомендацией 10 (КПМН-VIII).

² Рекомендовано КПМН на десятой сессии (1989 г.) в соответствии с рекомендацией 16 (КПМН-X).

8.1.2 Единицы и шкалы

Физическая продолжительность солнечного сияния (SD) является временной характеристикой. В качестве единиц измерения используются секунды или часы. Для климатологических целей используются такие термины как «часы в день» или «число часов солнечного сияния в течение дня», а также проценты — для определения, например, «относительной продолжительности солнечного сияния в течение дня», когда SD может быть связана с максимально возможной продолжительностью солнечного сияния (SD_0 и SD_{max} соответственно). Важным дополнением к единицам измерения является период измерения (день, декада, месяц, год и т. д.).

8.1.3 Метеорологические требования

Требования, которые необходимо выполнять, приводятся в настоящем томе, глава 1. Продолжительность солнечного сияния должна измеряться с погрешностью до $\pm 0,1$ ч и с разрешением 0,1 ч.

Поскольку количество и скорость изменения пороговых переходов прямой солнечной радиации обуславливают возможную неопределенность продолжительности солнечного сияния, метеорологические требования к регистраторам солнечного сияния, по существу, коррелируют с климатологическими условиями облачности (WMO, 1985).

В случае безоблачного неба ежечасные значения, полученные при восходе или заходе Солнца, могут (в зависимости от количества пыли) быть ошибочными вследствие плохо заданных пороговых или спектральных зависимостей.

В случае переменной облачности (Cu , Cs) скорость изменения перехода высока, и энергетическая освещенность, измеренная пиргелиометром при облачном небе, обычно ниже $80 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$, что обуславливает пониженные требования к корректировке порога. Однако угол обзора прибора может оказывать влияние на результат измерения продолжительности солнечного сияния, если вблизи Солнца находятся скопления ярких облаков.

Необходима наиболее высокая точность, если облака верхнего и среднего яруса (Ci , As) с небольшими изменениями оптической плотности ослабляют прямое солнечное излучение примерно до $120 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$. Поэтому большое значение придается углу обзора, а также точности корректировки порога.

Требования к регистраторам солнечного сияния в зависимости от местоположения и времени года различаются в соответствии с преобладающими формами облачности. Облачность можно приблизительно описать посредством трех диапазонов относительной продолжительности солнечного сияния в течение дня SD/SD_0 (см. 8.1.2), а именно: «облачное небо», когда $0 \leq SD/SD_0 < 0,3$; «переменная облачность», когда $0,3 \leq SD/SD_0 < 0,7$, и «ясная погода», когда $0,7 \leq SD/SD_0 \leq 1,0$. Результаты измерений в условиях преимущественно облачного неба имеют наибольшие погрешности (обычно самый высокий процент отклонений от эталона).

8.1.3.1 Использование данных о продолжительности солнечного сияния

В первую очередь данные о SD используются для характеристики климата местности, особенно курортных районов. При этом учитывается физиологическое воздействие солнечного света большой интенсивности на самочувствие человека. Эти данные по-прежнему используются некоторыми органами власти на местах для содействия туристическим направлениям.

Описание условий погоды за прошедший период, к примеру за месяц, содержит обычно ежесуточные данные о SD .

Для перечисленных областей применения погрешность около 10 % для средних значений SD представляется приемлемой для периода наблюдений, продолжительностью свыше нескольких десятилетий.

8.1.3.2 **Корреляция с другими метеорологическими параметрами**

Наиболее значительная корреляция наблюдается между продолжительностью солнечного сияния и суммарной солнечной радиацией G . Эта связь описывается так называемой формулой Ангстрема:

$$G/G_0 = a + b \cdot (SD/SD_0) \quad (8.1)$$

где G/G_0 — так называемый индекс ясности (суммарная солнечная радиация по отношению к ее возможному значению за пределами атмосферы), а SD/SD_0 — относительная продолжительность солнечного сияния (по отношению к ее возможному значению за пределами атмосферы); a и b — константы, которые должны определяться ежемесячно. По данным, полученным на станциях Германии, установлено, что погрешность среднемесячных значений суммарной солнечной радиации, измеряемой с помощью регистратора Кэмпбелла-Стокса, составляет менее 10 % летом и увеличивается до 30 % зимой (Golchert, 1981).

В формуле Ангстрема подразумевается наличие обратной связи между количеством облаков и продолжительностью солнечного сияния. Это не относится к неплотной облачности верхнего яруса и, по-видимому, к облачным полям, не экранирующим Солнце; поэтому степень обратной связи зависит в основном от объема статистических данных (Stanghellini, 1981; Angeli, 1990). Повышение точности данных о SD должно уменьшить разброс статистических результатов, но даже точные данные могут дать достоверные результаты только на статистической основе.

8.1.3.3 **Требования к автоматической регистрации**

Поскольку большинство пунктов наблюдений обеспечено электроэнергией, преимущество регистратора Кэмпбелла-Стокса, состоящее в его автономности, становится не столь существенным. Более того, необходимость ежедневной смены лент приводит к тому, что применение регистраторов Кэмпбелла-Стокса становится проблематичным на АМС или на станциях с ограниченным числом персонала. Другая весомая причина замены регистраторов Кэмпбелла-Стокса на новые автоматизированные методы измерения состоит в желании избежать затрат на визуальные оценки продолжительности солнечного сияния и получать более точные результаты этих оценок на носителях информации, позволяющих осуществлять обработку данных непосредственно на компьютерах.

8.1.4 **Методы измерения**

Ниже кратко описаны методы, используемые для измерения продолжительности солнечного сияния, и соответствующие им типы приборов:

- а) Пиргелиометрический метод. Обнаружение с помощью пиргелиометра переходов прямой солнечной радиации через порог $120 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ (согласно рекомендации 10 (КПМН-VIII)). Значения продолжительности считываются со счетчиков времени, которые приводятся в действие при соответствующих переходах порога в сторону верхних и нижних значений.

Тип прибора: пиргелиометр, соединенный с электронным или компьютерным дискриминатором порога и счетчиком времени.

b) Пиранометрический метод.

- i) Измерение производится с помощью пиранометра суммарной (G) и рассеянной (D) солнечной радиации, для того чтобы получить прямую солнечную радиацию с целью распознавания рекомендуемого ВМО порогового значения, как указано в пункте (a) выше.

Тип прибора: все радиометрические системы из двух встроенных пиранометров и одного затеняющего устройства, соединенные с электронным или компьютерным дискриминатором порога и счетчиком времени.

- ii) Пиранометрический метод измерения суммарной (G) солнечной радиации с целью оценки продолжительности солнечного сияния.

Тип прибора: пиранометр в сочетании с электронным или компьютеризованным устройством, способным выдавать 10 мин средние значения, а также минимальные и максимальные суммарные значения (G) солнечной радиации за тот же 10-минутный интервал, или в альтернативном порядке предоставлять 1-минутные средние значения суммарной (G) солнечной радиации.

- c) Метод прожигания. Пороговый эффект прожигания ленты, вызываемый сфокусированной прямой солнечной радиацией (тепловой эффект поглощенной солнечной энергии). Продолжительность солнечного сияния определяется по следам прожога.

Тип прибора: регистраторы солнечного сияния Кэмпбелла-Стокса, особенно рекомендованный вариант ВЭСС (см. 8.2).

- d) Контрастный метод. Основан на определении различий освещенности в показаниях автономных датчиков, находящихся в различных положениях по отношению к Солнцу, с помощью нормирования выходных сигналов датчиков по значениям сигналов, эквивалентных порогу, рекомендованному ВМО (определяемому на основе сравнения с эталонными значениями SD , как указано в пункте (b)).

Тип прибора: специально сконструированные приемники с набором датчиков (в основном работающих на фотогальванических элементах), соединенные с электронным дискриминатором и счетчиком времени.

- e) Метод сканирования. Основан на распознавании энергетической освещенности, поступающей от непрерывно сканируемых небольших секторов неба, с помощью ее нормирования по эквиваленту порога энергетической освещенности, рекомендованного ВМО (определяемого на основе сравнения с эталонными SD значениями).

Тип прибора: приемные устройства с одним датчиком, оборудованные специальным сканирующим устройством (например, вращающейся диафрагмой или зеркалом) и соединенные с электронным дискриминатором и счетчиком времени.

Методы измерения продолжительности солнечного сияния, описанные в следующих параграфах, являются примерами использования вышеупомянутых принципов. Эти методы и приборы, за исключением переключателя Фостера, участвовали в сравнении автоматических регистраторов продолжительности солнечного сияния, проведенных ВМО в 1988–1989 гг. в Гамбурге, и в сравнении пиранометров и электронных регистраторов продолжительности солнечного сияния, проведенных Региональной ассоциацией VI (РА-VI) в Будапеште в 1984 г. (WMO, 1986).

Описание регистратора солнечного сияния Кэмпбелла-Стокса в 8.2.3 сделано достаточно подробно, поскольку этот прибор по-прежнему широко используется в национальных сетях метеорологических наблюдений, в связи с чем необходимо учитывать

рекомендованные ВМО технические характеристики и правила расчетов (тем не менее, заметим, что этот метод уже не рекомендуется³, поскольку продолжительность яркого солнечного сияния не отмечалась с достаточным постоянством).

Обзор истории создания и развития регистраторов солнечного сияния приведен в работах Coulsen (1975), Hameed и Pittalwala (1989); Sonnetag и Behrens (1992).

8.2 ПРИБОРЫ И ДАТЧИКИ

8.2.1 Пиргелиометрический метод

8.2.1.1 Общие сведения

Данный метод разработан на основе определения солнечного сияния, принятого ВМО (см. 8.1.1), и поэтому рекомендуется для получения эталонных значений продолжительности солнечного сияния. Метод предполагает использование защищенного от погодных условий пиргелиометра и надежного устройства для слежения за движением солнца, предназначенного для автоматического или, в крайнем случае, полуавтоматического наведения пиргелиометра на солнце. Этот метод можно модифицировать, выбрав пиргелиометр, в котором угол обзора влияет на энергетическую освещенность, измеряемую в то время, когда облака закрывают солнце.

Контроль за порогом солнечного сияния осуществляется непрерывным сопоставлением показаний на выходе пиргелиометра с пороговым эквивалентным напряжением $V_{th} = 120 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot R \text{ мкВ} \cdot \text{Вт}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$, которое рассчитывается по чувствительности пиргелиометра R . Порог перехода определяется, если $\Delta V = V - V_{th}$ меняет знак. Подключенный счетчик времени срабатывает при $\Delta V > 0$.

8.2.1.2 Источники погрешностей

Пока еще не разработаны единые требования для угла обзора. Большие различия между показаниями двух пиргелиометров с различными углами обзора возможны, особенно когда солнце окружено облаками (см. настоящий том, глава 7, 7.2 и 7.2.1.3). Более того, типичные погрешности пиргелиометров, а именно: влияние наклона, температурная зависимость, нелинейность и смещение нуля — зависят от класса пиргелиометра. Более значительные погрешности появляются при неточном нацеливании прибора на солнце, а также когда входное защитное окно залито дождем или покрыто снегом.

8.2.2 Пиранометрический метод

8.2.2.1 Общие сведения

Пиранометрический метод получения данных о продолжительности солнечного сияния основан на фундаментальной взаимосвязи между прямой (I), суммарной (G) и рассеянной (D) солнечной радиацией:

$$I \cdot \cos \zeta = G - D \quad (8.2)$$

где ζ – зенитный угол солнца; $I \cdot \cos \zeta$ – горизонтальная составляющая I . Для того чтобы точно выполнить условия применения уравнения 8.2, угол затенения пиранометра при измерении D должен быть равным углу обзора пиргелиометра (см. настоящий том, глава 7). Кроме того, спектральные диапазоны, а также постоянные времени пиргелиометра и пиранометра должны быть по возможности одинаковыми.

³ См. рекомендацию 10 (КПМН-VIII).

При отсутствии нацеленного на солнце пиргелиометра, но при наличии полученных с помощью компьютера данных G и D , измеренных пиранометрами, принятый в ВМО численный критерий солнечного сияния может быть выражен, согласно уравнению 8.2, с помощью формулы

$$(G - D)/\cos \zeta > 120 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \quad (8.3)$$

которая может использоваться применительно к мгновенным отсчетам.

Модификации этого метода на различных станциях сводятся прежде всего к следующему:

- а) выбор пиранометра;
- б) применение затеняющего устройства (теневое кольцо или затеняющий диск с устройством слежения за солнцем) с соответствующей геометрией затенения (угол затенения);
- в) корректировка с учетом потерь, обусловленных затеняющим кольцом.

В качестве специальной модификации следует упомянуть замену критерия в уравнении 8.3 на статистически полученную формулу параметризации (для того чтобы избежать определения зенитного угла солнца) для применения в более простых системах сбора данных (Sonntag and Behrens, 1992).

Для определения продолжительности солнечного сияния при измерении только одним пиранометром могут применяться другие алгоритмы, основанные на других допущениях.

Метод Слоба и Монна (Slob and Monna, 1991) основан на двух допущениях в отношении связи между радиацией и облачностью, как показано ниже:

- а) довольно точное вычисление возможной суммарной радиации на поверхности Земли, основанное на расчетном значении «заатмосферной радиации» (G_0), принимая во внимание ее угасание в атмосфере. Ослабляющий фактор зависит от высоты солнца h и мутности атмосферы T . Соотношение между измеренной суммарной радиацией и таким образом рассчитанной радиацией при ясном небе является хорошей мерой наличия облаков;
- б) очевидное различие между минимальным и максимальным значениями суммарной радиации, измеренной по 10-минутным интервалам, предполагает временное закрытие солнца облаками. С другой стороны, отсутствие такого различия свидетельствует об отсутствии радиации или непрерывной радиации в течение 10-минутного интервала (а именно, $SD = 0$ или $SD = 10$ мин).

Основанный на этих предположениях алгоритм может быть использован (Slob and Monna, 1991) для расчета суточных SD продолжительности солнечного сияния из сумм за 10-минутные SD . В пределах этого алгоритма SD определяется по 10-минутным интервалам с наличием солнечного сияния (а именно, $SD_{10} = f \cdot 10$ минут, где f — часть интервала с солнечным сиянием, $0 \leq f \leq 1$). Ослабляющий фактор, главным образом, зависит от оптического пути солнечного излучения, проходящего через атмосферу. Поскольку этот путь зависит от высоты солнца, $h = 90^\circ - z$, алгоритм разграничивает 3 временные зоны. Хотя в основном $f = 0$ или $f = 1$, особое внимание уделено $0 < f < 1$. Этот алгоритм приведен в приложении 8.A. Неопределенность расчетов составляет около 0,6 ч для дневных сумм, хотя недавние работы (Hinssen and Knap, 2007; WMO, 2012) показали, что расширенная погрешность ($k = 2$) в отношении суточных данных может превосходить 1 ч.

Карпентрасский метод исходит из возможности параметризации и расчета по 1-минутным интервалам порогового значения (G_{thr}) радиации G как функции наиболее распространенных в данной местности условий мутности атмосферы и высоты

солнца (h). Соответствующий алгоритм этого метода приводится в приложении 8.В. Максимальная расширенная погрешность ($k = 2$) в отношении суточных данных составляет приблизительно 0,7 ч (WMO, 2012).

Применение карпентрасского метода может быть оптимизировано благодаря использованию 1-минутных средних суммарных показателей и прямых показателей радиации (используемых как ориентир) в течение нескольких следующих друг за другом лет (не менее четырех), что позволяет определить коэффициенты для параметризации 1-минутного порогового показателя G_{thr} для конкретных мест. Это минимизирует общую относительную ошибку в отношении дневных показателей SD , рассчитанных по карпентрасскому методу за длительный период времени (годы) посредством использования суммарной разницы SD , а также позволяет оценить максимальную погрешность карпентрасского метода (Morel et al., 2012).

8.2.2.2 **Источники погрешностей**

Согласно уравнению 8.3, погрешности при измерениях суммарной и рассеянной солнечной радиации ведут к увеличению погрешности определения прямой солнечной радиации, которая существенно увеличивается с увеличением зенитного угла солнца. Поэтому для уменьшения погрешностей результатов важно точно вводить поправки на экранирование участков неба тенью кольцом (WMO, 1984a) и выбирать высококачественный пиранометр.

8.2.3 **Регистратор солнечного сияния Кэмпбелла-Стокса (метод прожигания)**

Основной составной частью регистратора солнечного сияния Кэмпбелла-Стокса является стеклянный шар, устанавливаемый в центре сферического сегмента, диаметр которого позволяет солнечным лучам, проходящим через этот шар, фокусироваться строго на ленту, вставленную в пазы сферического сегмента. Способ крепления шара зависит от того, в каких широтах (полярных, умеренных, тропических) используется прибор. Для получения хороших результатов сферический сегмент и шар должны быть сделаны с высокой точностью, а крепление следует выполнять таким образом, чтобы шар располагался точно по центру. В сферическом сегменте имеются три пары перекрывающихся друг друга пазов (одна пара для обоих равноденствий) для лент, используемых в различные времена года; при этом форма и длина лент выбираются в соответствии с требованиями геометрии оптики системы. Следует отметить, что проблема, связанная с началом прожога при различных условиях облачности, свидетельствует о том, что этот прибор, также как и любой другой, работающий по такому же принципу, не обеспечивает измерений истинной продолжительности солнечного сияния.

В таблице ниже приведены основные технические характеристики и требования к регистратору солнечного сияния Кэмпбелла-Стокса класса ВЭСС.

8.2.3.1 **Настройка**

При установке регистратора следует провести следующие корректировки:

- a) основание должно быть установлено горизонтально, строго по уровню;
- b) установка сферического сегмента должна быть проведена таким образом, чтобы центральная линия ленты равноденствия совпадала с небесным экватором (это можно сделать с помощью шкалы широт, нанесенной на опоре сегмента);
- c) вертикальная плоскость, проходящая через центр шара, и отметка полудня на сферическом сегменте должны лежать в плоскости географического меридиана (установка «север-юг»).

**Технические характеристики регистратора солнечного сияния Кэмпбелла-Стокса
(класс ВЭСС)**

<i>Стеклянный шар</i>	<i>Сферический сегмент</i>	<i>Ленты для записи</i>
Форма: постоянная	Материал: пушечная бронза или другой металл с эквивалентной прочностью	Материал: картон хорошего качества, в незначительной степени подверженный действию влаги
Диаметр: 10 см	Радиус: 73 мм	Ширина: точно в пределах 0,3 мм
Цвет: очень слабый или бесцветный	Дополнительные технические характеристики:	Толщина: $0,4 \pm 0,05$ мм Воздействие влаги: в пределах 2%
Показатель преломления: $1,52 \pm 0,02$	а) центральная линия полудня гравировается поперек внутренней поверхности	Цвет: темный, однородный, невосприимчивый к рассеянному дневному свету
Фокусное расстояние: 75 мм для натриевого «D» света	б) корректировка горизонтального наклона производится в соответствии с широтой	Шкала: часовые линии черного цвета
	с) двойное основание для регулировки уровня и азимута	

Для того чтобы проверить, соответствует ли установка регистратора требованию пункта (с), необходимо наблюдать отражение солнца во время истинного полудня для данной местности: если прибор отрегулирован правильно, то отражение должно падать на отметку полудня сферического сегмента или ленты.

8.2.3.2 Оценка данных

Для получения сравнимых результатов по регистраторам Кэмпбелла-Стокса очень важно выполнять нижеследующие указания по обработке данных ВЭСС. Суммарная дневная продолжительность яркого солнечного сияния определяется следующим образом: по краю ленты одинакового изгиба отмечаются отрезки, длины которых соответствуют следу прожога; далее с точностью до ближайшей десятой доли часа измеряется суммарная длина имеющихся на ленте отрезков прожога. Оценку данных следует производить, руководствуясь следующим:

- если след прожога отчетлив и имеет закруглённые концы, то его длину на каждом конце следует уменьшить на величину, равную половине радиуса изгиба конца следа; это будет соответствовать уменьшению общей длины каждого следа на 0,1 ч;
- если след прожога имеет круглую форму, то измеряемая длина должна быть равна половине диаметра следа. Если в день регистрируется более одного закруглённого следа, то этого достаточно, чтобы считать два или три следа эквивалентом 0,1 ч солнечного сияния; четыре, пять, шесть следов — эквивалентом 0,2 ч солнечного сияния и т. д. с шагом 0,1 ч;
- если след представляет собой сплошную линию, следует измерять всю ее длину, даже тогда, когда лента только слегка обесцвечена;
- если отчетливый след прожога в ходе времени сокращается по ширине, по крайней мере, на одну треть, то из суммарной длины для каждого такого сокращения следует вычесть величину, равную 0,1 ч. При этом максимально вычитаемая величина не должна превышать половины общей длины следа.

Для анализа случайных и систематических ошибок, допущенных при оценке данных о продолжительности солнечного сияния, а также с целью обеспечения объективности результатов при сравнении приборов рекомендуется, чтобы оценку данных каждого сравниваемого прибора производили последовательно и независимо два или более специалистов в этой области.

8.2.3.3 **Специальные модификации прибора**

Так как стандартный регистратор солнечного сияния Кэмпбелла-Стокса полностью не фиксирует солнечное сияние за летние месяцы на станциях, расположенных на широтах выше 65° , в некоторых странах используются модифицированные версии прибора.

Один из вариантов предусматривает использование двух регистраторов Кэмпбелла-Стокса, установленных один возле другого, при этом один из них установлен обычным образом, а другой направлен на север.

В суровых климатических условиях, возможно, существует необходимость подогрева прибора во избежание обмерзания и конденсации влаги на стеклянном шаре. Сравнение показаний подогреваемых и не подогреваемых приборов показало, что, например, в условиях климата Северной Европы не подогреваемый прибор не регистрирует около 1 % среднемесячной продолжительности солнечного сияния летом и около 5–10 % зимой по сравнению с подогреваемым.

8.2.3.4 **Источники погрешностей**

Погрешности данного регистратора обусловлены, главным образом, зависимостью образования прожогов от температуры и влажности ленты, а также эффектом усиленного прожога, особенно в случае разорванных облаков (Ikeda et al., 1986).

Значения, полученные в утренние часы в средних и высоких широтах, часто обусловлены обмерзанием или отпотеванием стеклянного шара.

8.2.4 **Приборы для оценки контраста**

Регистратор солнечного сияния Фостера — это электронно-оптическое устройство, которое было введено в эксплуатацию на наблюдательных сетях в США в 1953 г. (Foster and Foskett, 1953). Прибор состоит из двух селеновых фотоэлементов, один из которых защищен от прямого солнечного излучения затеняющим кольцом. Элементы соединены таким образом, что при отсутствии прямой солнечной радиации никакого сигнала не поступает. Регистратор приводится в действие, когда прямая солнечная радиация превышает примерно $85 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ (Hameed and Pittalwala, 1989). Положение защитного кольца требует корректировки только четыре раза в год для учета сезонных изменений движения солнца по небосводу.

8.2.5 **Приборы для оценки контраста и сканирующие приборы**

8.2.5.1 **Общие сведения**

Несколько различных моделей электронно-оптических датчиков, а именно датчиков для оценки контраста и сканирующих приборов (см., к примеру WMO, 1984b) прошли сравнение автоматических регистраторов продолжительности солнечного сияния, организованное ВМО и проведенное в Региональном радиационном центре Региональной ассоциации VI в Гамбурге (Германия) в период с 1988 по 1989 гг. Отчет об этих испытаниях содержит детальные описания всех протестированных приборов и датчиков.

8.2.5.2 *Источники погрешностей*

Распределение облачности на небосклоне или солнечное излучение, отраженное от окружающих объектов, могут влиять на результаты, поскольку применяются различные методы оценки контраста и сравнительно большие углы обзора у используемых элементов конструкции. Кремниевые фотогальванические элементы без фильтров обычно максимально чувствительны в спектре, близком к инфракрасному, поэтому полученные результаты зависят от спектрального состава прямой солнечной радиации.

Поскольку сравнительно небольшой прямоугольный обзор таких приборов отличается в большей или меньшей степени от циркулярно-симметричного угла эталонного пиргелиометра, наличие облаков вокруг солнца может вызвать отклонения от показаний эталона.

Так как угол обзора является небольшим, некачественная стеклянная защита может служить особым источником погрешностей. Помимо погрешностей определения высоты солнца, следует учитывать погрешности спектральной характеристики датчиков. В настоящее время принято считать, что только один выпускаемый регистратор, в котором использован пироэлектрический приемник, не подвержен спектральным эффектам.

8.3 **УСТАНОВКА ПРИЕМНИКОВ СОЛНЕЧНОГО СИЯНИЯ**

Для правильной установки приемников солнечного света необходимо руководствоваться следующими тремя положениями:

- a) приемники должны быть жестко укреплены на неподвижной опоре. Это требование необязательно для датчиков SONI (WMO, 1984b), которые предназначены для установки на буйях;
- b) местоположение приемника в любое время года должно быть открыто солнцу в течение всего периода, когда зенитный угол солнца более 3° над горизонтом. Эта рекомендация может быть изменена в следующих случаях:
 - i) при отсутствии другого места для установки, когда наличие небольших антенн или других затеняющих объектов с небольшими угловыми размерами (не более 2°) допустимо. В таком случае местоположение, высота и угловой размер объектов должны быть четко описаны, а потенциальные уменьшения измеренной продолжительности солнечного сияния (в часах) в особые часы и дни должны определяться с помощью астрономических расчетов видимой траектории солнца;
 - ii) в горных районах (например в долинах) естественные препятствия должны рассматриваться как фактор локального климата и должны четко описываться, как указано выше.
- c) На месте установки не должно быть поверхностей, отражающих значительное количество прямой солнечной радиации на приемник, поскольку отраженная солнечная радиация в основном может влиять на результаты измерений контраста. Для исключения таких помех близлежащие поверхности не должны быть окрашены белой либо блестящей краской, их следует очищать от снега или затенять.

Корректировка оси приемника описана выше. Для некоторых приемников рекомендуется изменять наклон оси в зависимости от сезона.

Классификация выбора места для наземных станций приземных наблюдений (см. настоящий том, глава 1, приложение 1.D) предоставляет дополнительные руководящие указания по выбору места и размещению приемников солнечного сияния в рамках выбранного места в целях повышения репрезентативности.

8.4 ОБЩИЕ ИСТОЧНИКИ ПОГРЕШНОСТЕЙ

Погрешности в оценках продолжительности солнечного сияния, полученных с помощью различных приборов и методов, указываются в виде отклонений от эталонных значений, принятых ВМО для погодных условий Гамбурга (Германия) в 1988–1989 гг.

Однако эталонные значения также в некоторой степени содержат погрешности, обусловленные погрешностями калибровки используемого пиргелиометра и размерами его центрального угла (зависимость от ореола). Для единичных значений необходимо, кроме того, учитывать постоянную времени приборов.

Общими источниками погрешностей являются:

- a) калибровка регистратора (корректировка порогового эквивалента прямой солнечной радиации (см. 8.5));
- b) типичная реакция чувствительности регистратора на изменения метеорологических условий (например, температуры, облачности, пыли) и положения солнца (например, неточность ориентации, солнечный спектр);
- c) неправильная установка и неустойчивость основных элементов конструкции приборов;
- d) упрощенная или ошибочная оценка измеренных величин;
- e) неточности отсчета времени;
- f) загрязнение и отложение конденсата на оптической и чувствительной поверхностях прибора;
- g) низкий уровень технического обслуживания.

8.5 КАЛИБРОВКА

До описания некоторых методов калибровки целесообразно сделать несколько общих замечаний:

- a) отсутствует стандартизированный метод калибровки приемников SD ;
- b) при калибровке на открытом воздухе для получения эталонных данных следует использовать пиргелиометрический метод;
- c) ввиду наличия конструктивных различий приемников SD и эталонного прибора, а также естественной изменчивости условий измерений, результаты калибровки следует получать путем длительных сравнений (в течение нескольких месяцев);
- d) обычно калибровка приемников SD требует специальных методов для того, чтобы отрегулировать их пороговое значение (с помощью электроники для электрооптических приборов, с помощью программного обеспечения для пиранометрических систем);
- e) для электрооптических приборов с аналоговым выходным устройством период калибровки может быть сравнительно непродолжительным;
- f) лабораторный метод (с использованием лампы) рекомендуется, прежде всего, для регулярной проверки устойчивой работы полевых приборов.

8.5.1 Методы калибровки

8.5.1.1 Сравнение данных о продолжительности солнечного сияния

Эталонные значения продолжительности солнечного сияния SD_{ref} должны измеряться одновременно со значениями калибруемого приемника SD_{cal} . В качестве эталонного прибора следует использовать пиргелиометр, имеющий устройство слежения за солнцем и соединенный с определителем порога прямой солнечной радиации (см. 8.1.4). Как вариант, можно использовать регулярно калибруемый регистратор солнечного сияния выбранной точности. Поскольку требования к точности порога прямой солнечной радиации, измеряемой приемником, зависят от метеорологических условий (см. 8.1.3), результаты сравнений должны определяться статистически на основе длинных рядов данных измерений.

Если этот метод применяется ко всему ряду данных за определенный период (с типичными условиями облачности), то первый результат калибровки представляет собой соотношение $q_{tot} = \Sigma_{tot} SD_{ref} / \Sigma_{tot} SD_{cal}$.

Для $q > 1$ или $q < 1$ напряжение, эквивалентное пороговому значению, должно быть соответственно отрегулировано к более низким или высоким значениям. Поскольку число необходимых корректировок слабо коррелируется с q_{tot} , необходимы дополнительные периоды последовательных сравнений для того, чтобы постепенно оценить подход к идеальному порогу посредством аппроксимирования $q_{tot} = 1$. Для средних широт Европы продолжительность всего периода калибровки может составлять от 3 до 6 месяцев. Поэтому технические устройства для калибровки сетевых приемников должны предусматривать возможность калибровки одновременно нескольких приемников. (Применение q_{tot} в качестве поправочного коэффициента для величины ΣSD дает надежные результаты только в том случае, если при измерении облачные условия будут такими же, как и в период проведения калибровки. В противном случае использовать данный метод не рекомендуется).

Если описываемый метод калибровки применяется к рядам данных, которые выбираются в соответствии со специальными условиями измерений (облачность, угол высоты солнца, относительная продолжительность солнечного сияния и т. д.), то можно, например, статистически определить факторы $q_{sel} = \Sigma_{sel} SD_{ref} / \Sigma_{sel} SD_{cal}$ для различных видов облачности и использовать их для корректировки рядов данных, для которых четко указана облачность.

С другой стороны, корректировка порогового эквивалентного напряжения особенно рекомендуется, если величины q_{sel} рассматриваются в плохих для калибровки условиях облачности (например, облачность типа Ci, As). Повторная процедура для валидации корректировки также необходима. В зависимости от погоды сравнение может проводиться в течение нескольких недель или месяцев.

8.5.1.2 Сравнение аналоговых сигналов

Этот метод применяется только для приемников SD , имеющих аналоговый выход, линейно реагирующий на поступление прямой солнечной радиации, по крайней мере в диапазоне менее $500 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$. Сравнение значений эталонной прямой солнечной радиации, измеряемой пиргелиометром и одновременно измеряемой аналоговым прибором, должно проводиться при безоблачном небе или в другие периоды времени при значениях прямой солнечной радиации менее $500 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$, незначительно меняющихся во времени.

Анализ линейной связи такого комплекта данных дает наилучшую линию регрессии, по которой можно получить пороговое эквивалентное напряжение для $120 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$. Если результат калибровки отклоняется от напряжения, указанного в сертификате, более чем на $\pm 20 \%$, то порог приемника должен быть отрегулирован на новое значение.

Для приемников с ярко выраженной спектральной чувствительностью полученные данные при низких углах высоты солнца и при значениях прямой солнечной радиации около $120 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ должны быть исключены из анализа ввиду их спектральной нелинейности, если не представляет интереса пороговое напряжение при восходе и заходе солнца. Пороговое эквивалентное напряжение должно экстраполироваться от более высоких значений прямой солнечной радиации.

8.5.1.3 **Метод определения среднего эффективного порога солнечной радиации (MEIT)**

Так называемый метод MEIT основан на определении солнечной радиации I_m по средним ежечасно измеренным значениям прямой солнечной радиации для калибруемого приемника.

В соответствии с этим методом сперва определяют ежечасные значения продолжительности солнечного сияния $SD_{ref}(h_k, I(n))$ по данным контролируемых компьютером пиргелиометрических измерений для часов h_k и по фиктивным значениям пороговой солнечной радиации $I(n)$, последовательно задаваемым в диапазоне от 60 до $240 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ (последнее означает, что $I(n) = (60 + n) \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ при $n = 0, 1, 2, \dots, 180$). Затем оценивают ежечасные значения $SD(h_k)$ на основе данных измерений приемником радиации; полученные таким образом ежечасные оценки сравнивают с $SD_{ref}(h_k, I(n))$ для того, чтобы найти такое $n = n_k$, для которого $SD(h_k)$ равно $SD_{ref}(h_k, I(n))$. Найденное таким образом $I(n_k)$ соответствует среднечасовому эффективному порогу солнечной радиации для сроков h_k : $I_m(h_k) = (60 + n_k) \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$. Если n_k не найдено непосредственно, его необходимо определить интерполяцией между соседними значениями.

И, наконец, последним шагом является регулировка порогового эквивалентного напряжения регистратора, если относительное отклонение между средним значением MEIT (значением I_m) и идеальным порогом $120 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ составляет более $\pm 20 \%$. Среднее значение MEIT должно представлять собой, например, среднемесячное значение вследствие большого разброса отклонений ежечасных значений MEIT.

Этот метод неприменим в часы с быстрой сменой пороговых значений; средний градиент за час должен быть менее $5 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Значения MEIT не являются репрезентативными для всего комплекта данных за период калибровки.

8.5.2 **Метод калибровки в лаборатории**

Поскольку в лаборатории моделировать распределение потоков прямого и рассеянного солнечного излучения довольно сложно, можно рекомендовать только «резервную калибровку», которая применима для приемников SD с регулируемым пороговым эквивалентным напряжением. Лабораторное контрольное оборудование должно включать стабилизированный источник радиации (желательно со спектром, близким к солнечному) и стенд для точной локальной регулировки приемника SD , а также тщательно откалиброванный по солнцу приемник SD , который используется в качестве эталонного. Эталонный и калибруемый приемники должны быть одной и той же модели.

В начале проведения испытаний эталонный приемник устанавливается на пути пучка света лампы таким образом, чтобы аналоговое устройство вывода или обычный «переключатель солнечного сияния» показывали $120 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$. Затем на месте эталонного устройства устанавливается проверяемое устройство, пороговое напряжение которого должно быть отрегулировано, чтобы активизировать переключение или получить эквивалент $120 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$. Повторные результаты должны быть проверены путем дальнейших поочередных замен приборов.

8.6 ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ

В техническое обслуживание обычно включается следующее:

- a) Очистка. Ежедневная очистка входных окон всех приемников, особенно сканирующих устройств с небольшими углами обзора. Приборы без устройств защиты от росы и инея в дни их появления должны проверяться более одного раза в день.
- b) Контроль. Ежедневный контроль касается проверки вращения сканирующих частей, а также проверки значений получаемых данных.
- c) Смена лент. В регистраторе солнечного сияния Кэмпбелла-Стокса ежедневно следует заменять ленту; в других устройствах соответствующие носители данных также должны регулярно заменяться.
- d) Корректировка. Корректировки необходимы, если сезонное изменение наклона приемника рекомендуется фирмой-изготовителем, а также после сильных штормов.

Техническое обслуживание специальных узлов приемников и систем для сбора данных должно производиться квалифицированными техниками или инженерами, как предусмотрено в инструкциях.

ПРИЛОЖЕНИЕ 8.А. АЛГОРИТМ ВЫЧИСЛЕНИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ СОЛНЕЧНОГО СИЯНИЯ НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЙ ПРЯМОЙ СУММАРНОЙ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ

(См. Slob and Monna, 1991)

Определение суточных значений SD основано на суммировании f данных 10-минутных интервалов, а именно $SD = \sum SD_{10'}$, где $SD_{10'} = f \leq 10$ мин. На практике $f = 0$ (нет солнечного сияния, все затянуто облаками) или 1 (солнечное сияние, ясное небо), но особое внимание интервалу $0 < f < 1$ (частичное солнечное сияние, частично облачное небо). Вследствие корреляции между SD и суммарной радиацией на горизонтальной поверхности, зависящей от высоты солнца (h), различие устанавливается в первую очередь в отношении $\sin(h)$.

Используются следующие переменные:

- h высота солнца, градусы
- G суммарная радиация на горизонтальной поверхности, Вт·м⁻²
- I прямая солнечная радиация на поверхности, перпендикулярной направлению солнца, Вт·м⁻²
- D рассеянная солнечная радиация на горизонтальной поверхности, Вт·м⁻²
- T_L мутность атмосферы (безразмерная величина)

Для измеренных значений G принимается:

- G среднее значение 10-минутных данных о суммарной радиации
- G_{min} минимальное значение суммарной радиации из измеренных за 10-минутные интервалы
- G_{max} максимальное значение суммарной радиации из измеренных за 10-минутные интервалы ($G_{min} \leq G \leq G_{max}$)

Используемые уравнения:

- $G_0 = I_0 \sin(h)$, $I_0 = 1\,367$ Вт·м⁻² (для «внеземной» радиации)
- $I = I_0 \exp(-T_L / (0,9 + 9,4 \sin(h)))$, $I_0 = 1\,367$ Вт·м⁻²
- $c = (G - D) / (I \sin(h))$, где
 - $T_L = 4$ и
 - $D = 1,2 G_{min}$, если $(1,2 G_{min} < 0,4)$ и
 - $D = 0,4$

Высота солнца	$\sin(h) < 0,1$, $h < 5,7^\circ$	$0,1 \leq \sin(h) \leq 0,3$, $5,7^\circ \leq h \leq 17,5^\circ$	$\sin(h) \geq 0,3$, $h \geq 17,5^\circ$						
Другие критерии	Нет других решающих критериев	При $G/G_0 \leq \{0,2 + \sin(h)/3 + \exp(-T_L / (0,9 + 9,4 \sin(h)))\}$ когда $T_L = 6$?		При $G_{max}/G_0 < 0,4$?					
				If “yes”	If “no”				
					При $G_{min}/G_0 > \{0,3 + \exp(-T_L / (0,9 + 9,4 \sin(h)))\}$ когда $T_L = 10$?				
		Если «да»	Если «нет»	Если «да»	Если «нет»				
					При $G_{max}/G_0 > \{0,3 + \exp(-T_L / (0,9 + 9,4 \sin(h)))\}$ и $G_{max} - G_{min} < 0,1 G_0$ когда $T_L = 10$?				
Итог	$f = 0$	$f = 0$	$f = 1$	$f = 0$	$f = 1$	$f = 1$	Если «да»		
							$c < 0$	$0 \leq c \leq 1$	$c > 1$
							$f = 0$	$f = c$	$f = 1$

ПРИЛОЖЕНИЕ 8.В. АЛГОРИТМ ВЫЧИСЛЕНИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ СОЛНЕЧНОГО СИЯНИЯ НА ОСНОВЕ 1-МИНУТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ СУММАРНОЙ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ

(Карпентрасский метод; см. WMO, 1998, 2012)

Этот метод, разработанный Региональным радиационным центром ВМО в Карпентрасе (Франция) и описанный Oliviéri (WMO, 1998), включает в себя алгоритм для расчета значений SD каждую минуту посредством измерения 1-минутных средних значений суммарной солнечной радиации (G) по сравнению с пороговым значением (G_{thr}), которое параметризуется двумя коэффициентами (A , B) и высотой солнца h (в частности, $\sin(h)$).

Используются следующие переменные:

h Угловая высота солнца в градусах (см. настоящий том, глава 7, приложение 7.D)

G Суммарная радиация на горизонтальной поверхности $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ (каждую 1 с, 1 мин усредненно)

Используемые уравнения:

$$G_{thr} = F_c \times \text{Mod}$$

$$\text{Mod} = 1\,080 (\sin(h))^{1,25}$$

$$F_c = A + B \cos(2\pi d/365),$$

где Mod представляет суммарную солнечную радиацию, полученную в образцовый безоблачный день (ясное небо и среднее значение мутности); F_c представляет коэффициент, эмпирическое значение которого близко к 0,7; тогда как d является номером дня в годовой последовательности.

Фактор F_c , который, как правило, варьируется между 0,5 и 0,8, зависит от климатических условий на местности, тогда как коэффициенты A , B могут быть эмпирически вычислены путем продолжительного сравнения SD и пиргелиометрических измерений (Morel et al., 2012). Как альтернатива, наличие расположенных близко или, что еще лучше, расположенных вместе приборов для измерения мутности атмосферы позволяет с большей точностью определять фактор F_c . Наблюдения показали изменчивость коэффициентов A и B в зависимости от широты (B тяготеет к отрицательным значениям в южном полушарии, тогда как значение A снижается вместе со значением широты).

Алгоритм применяется каждую минуту и может быть выражен следующим образом:

Высота солнца	$h < 3^\circ$	$h \geq 3^\circ$	
Критерии	Нет решений	При $G \geq G_{thr}$?	
		Если «да»	Если «нет»
Итог	$SD = 0$ мин	$SD = 1$ мин	$SD = 0$ мин

Высота солнца должна рассчитываться каждую минуту одновременно с часовым углом солнца, прямым восхождением и геоцентрическим склонением в соответствии с астрономическими формулами, приведенными в настоящем томе, глава 7, приложение 7.D.

Фильтрация данных ($h \geq 3^\circ$) применяется перед проведением основной проверки и позволяет фильтровать ошибки, связанные с несовершенством модели, высотой солнца (низкие высоты) и атмосферной рефракцией. Допускается отклонение 3° над горизонтом в отношении требования, согласно которому приемники SD должны непрерывно располагаться с видом на солнце в любое время года. Ошибки, вызванные фильтрацией данных по h , приводят к небольшому занижению, которое в связи с систематическим

характером таких ошибок может быть скорректировано после продолжительного периода измерений. Сравнение этого метода с другими методами и со справочными данными по SD приводится в публикации ВМО (WMO, 2012).

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

- Всемирная метеорологическая организация, 1962: *Сокращенный окончательный отчет третьей сессии Комиссии по приборам и методам наблюдений* (ВМО-№ 116, R.P. 48). Женева.
- , 1982: *Сокращенный окончательный отчет восьмой сессии Комиссии по приборам и методам наблюдений* (ВМО-№ 590). Женева.
- , 1990: *Сокращенный окончательный отчет десятой сессии Комиссии по приборам и методам наблюдений* (ВМО-№ 727). Женева.
- , 2015 (обновлено в 2017 г.): *Наставление по Глобальной системе наблюдений* (ВМО-№ 544), том I. Женева.
- Angell, J.K., 1990: Variation in United States cloudiness and sunshine duration between 1950 and the drought year of 1988. *Journal of Climate*, 3:296–308.
- Baumgartner, T., 1979: Die Schwellenintensität des Sonnenscheinautographen Campbell-Stokes an wolkenlosen Tagen. *Arbeitsberichte der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt*, No. 84, Zürich.
- Bider, M., 1958: Über die Genauigkeit der Registrierungen des Sonnenscheinautographen Campbell-Stokes. *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie*, Serie B, 9(2):199–230.
- Coulson, K.L., 1975: *Solar and Terrestrial Radiation. Methods and Measurements*. Academic Press, New York, pp. 215–233.
- Dyson, P., 2003: *Investigation of the Uncertainty of Sunshine Duration in the Solar and Terrestrial Radiation Network*. Instrument Test Report 674, Commonwealth Bureau of Meteorology.
- Foster, N.B. and L.W. Foscett, 1953: A photoelectric sunshine recorder. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 34:212–215.
- Golchert, H.J., 1981: Mittlere Monatliche Global-strahlungsverteilungen in der Bundesrepublik Deutschland. *Meteorologische Rundschau*, 34:143–151.
- Hameed, S. and I. Pittalwala, 1989: An investigation of the instrumental effects on the historical sunshine record of the United States. *Journal of Climate*, 2:101–104.
- Hinssen, Y.B.L. and W.H. Knap, 2007: Comparison of pyranometric and pyrliometric methods for the determination of sunshine duration. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 24(5):835–846.
- Ikeda, K., T. Aoshima and Y. Miyake, 1986: Development of a new sunshine-duration meter. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 64(6):987–993.
- Jaenicke, R. and F. Kasten, 1978: Estimation of atmospheric turbidity from the burned traces of the Campbell-Stokes sunshine recorder. *Applied Optics*, 17:2617–2621.
- Morel, J.P., E. Vuerich, J. Oliviéri and S. Mevel, 2012: Sunshine duration measurements using the Carpentras method. Baseline Surface Radiation Network meeting, Postdam, Germany, 1–3 August 2012.
- Painter, H.E., 1981: The performance of a Campbell-Stokes sunshine recorder compared with a simultaneous record of normal incidence irradiance. *The Meteorological Magazine*, 110:102–109.
- Slob, W.H. and W.A.A. Monna, 1991: *Bepaling van een directe en diffuse straling en van zonneschijnduur uit 10-minuutwaarden van de globale straling*. KNMI TR136, de Bilt.
- Sonntag, D. and K. Behrens, 1992: Ermittlung der Sonnenscheindauer aus pyranometrisch gemessenen Bestrahlungsstärken der Global- und Himmelsstrahlung. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes*, No. 181.
- Stanghellini, C., 1981: A simple method for evaluating sunshine duration by cloudiness observations. *Journal of Applied Meteorology*, 20:320–323.
- World Meteorological Organization, 1984a: Diffuse solar radiation measured by the shade ring method improved by a new correction formula (K. Dehne). Paper presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Cost-effective Meteorological Observations (TECEMO). Instruments and Observing Methods Report No. 15. Geneva.
- , 1984b: A new sunshine duration sensor (P. Lindner). Paper presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Cost-effective Meteorological Observations (TECEMO). Instruments and Observing Methods Report No. 15. Geneva.
- , 1985: Dependence on threshold solar irradiance of measured sunshine duration (K. Dehne). Paper presented at the Third WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-III). Instruments and Observing Methods Report No. 22 (WMO/TD-No. 50). Geneva.
- , 1986: *Radiation and Sunshine Duration Measurements: Comparison of Pyranometers and Electronic Sunshine Duration Recorders of RA VI* (G. Major). Instruments and Observing Methods Report No. 16 (WMO/TD-No. 146). Geneva.

- , 1998: Sunshine duration measurement using a pyranometer (J.C. Oliviéri). Paper presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-98). Instruments and Observing Methods Report No. 70 (WMO/TD-No. 877). Geneva.
- , 2012: Updating and development of methods for worldwide accurate measurements of sunshine duration (E. Vuerich, J.P. Morel, S. Mevel, J. Oliviéri). Paper presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2012). Instruments and Observing Methods Report No. 109. Geneva.
-