

Многоэлементный ориентированный измеритель характеристик солнечного излучения

С.В. Зуев*

*Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
634021, г. Томск, пр. Академический, 10/3*

Поступила в редакцию 21.02.2019 г.

Приводится описание принципа работы многоэлементного ориентированного измерителя характеристик солнечного излучения, не имеющего подвижных элементов и способного определять суммарную, прямую и рассеянную радиацию и продолжительность солнечного сияния.

Ключевые слова: суммарная солнечная радиация, прямая солнечная радиация, рассеянная солнечная радиация, пиранометр; total solar irradiance, direct solar irradiance, diffuse solar irradiance, pyranometer.

Введение

Энергия Солнца — это основной источник, определяющий многообразные процессы в атмосфере и на земной поверхности. Более 99% солнечной радиации сосредоточено в коротковолновой области спектра от 0,3 до 4 мкм [1], поэтому особое значение имеют инструментальные измерения элементов коротковолнового радиационного режима, основными из которых являются суммарная (Q), прямая (S) и рассеянная (D) радиация, связанные между собой зависимостью

$$Q = S \sin h + D, \quad (1)$$

где h — высота Солнца над горизонтом. Если измерения Q -радиации в первую очередь важны для определения радиационного баланса и сумм радиации за некоторые промежутки времени, то измерения S -радиации позволяют определять такие характеристики, как прозрачность и мутность атмосферы, оптическая плотность и толщина облачных слоев, а также продолжительность солнечного сияния.

Стандартные измерения основных элементов приходящей солнечной радиации, согласно [1], осуществляются с помощью актинометра и одного или двух пиранометров. Для непрерывной регистрации актинометрической информации могут применяться актинометрические установки [2], позволяющие фиксировать на диаграммную ленту измеренные с помощью самопишущих приборов типа КСП-4 значения радиации, которые впоследствии обрабатываются вручную.

Начиная с 2010 г. на сети наблюдения Росгидромета в эксплуатацию вводятся автоматизированные актинометрические [3] и актинометрические измерительные комплексы [4]. Они отличаются друг

от друга производителями и составом используемых приборов; работают по программе непрерывных круглосуточных наблюдений за основными составляющими радиационного баланса. На конец 2016 г. ими были оснащены 29 метеостанций из 1915 [5].

Основным сдерживающим фактором увеличения количества таких комплексов является высокая стоимость их приобретения и эксплуатации, поэтому в различных областях народного хозяйства, в научных исследованиях и учебно-образовательных процессах обычной практикой стало использование незатененных пиранометров, имеющих относительно невысокую стоимость и измеряющих только Q -радиацию. При этом интенсивность S - и D -радиации или не оценивается вообще [6], или оценивается только приближенно с использованием различных эмпирических или полуэмпирических формул [7, 8].

В настоящей статье приводятся результаты экспериментальных измерений суммарной, прямой и рассеянной радиации с помощью макета двухэлементного ориентированного измерителя характеристик солнечного излучения.

Измерение солнечной радиации многоэлементным пиранометром

Основная сложность при измерении прямой и рассеянной радиации — необходимость постоянного нацеливания на Солнце актинометра и затеняющего экрана пиранометра, что требует или постоянного присутствия человека, или использования каких-либо автоматических следящих устройств. Поэтому актуальной и важной была и остается задача по разработке актинометрических измерителей, не имеющих каких-либо подвижных элементов и способных длительное время в автоматическом режиме определять основные элементы радиационного режима.

* Сергей Викторович Зуев (zuev@imces.ru).

Одним из таких измерителей является Sunshine Pyranometer SPN1 [9] фирмы Delta-T, способный определять Q -, S - и D -радиацию, а также продолжительность солнечного сияния (T_{SS}). Принцип работы пиранометра заключается в том, что два и более измерительных элемента (обычно семь расположенных в форме «ромашки» с одним элементом в центре) располагаются под сферическим маскирующим элементом, имеющим прозрачные и непрозрачные для солнечного излучения области определенной формы, благодаря чему в любой момент времени при любой ориентации прибора как минимум один его измерительный элемент всегда открыт для прямой солнечной радиации и измеряет максимальное значение солнечной радиации и один всегда закрыт от нее и измеряет минимальное значение солнечной радиации. При этом площади прозрачных и непрозрачных для солнечного излучения областей маскирующего элемента равны, что обеспечивает поступление одинаковой величины D -радиации для каждого измерительного элемента. Таким образом, определяя аппаратным или программным способом максимальные (Q_{max}) и минимальные (Q_{min}) значения солнечной радиации, получаем систему уравнений

$$\begin{cases} Q_{max} = S' + D - \Delta D_{close}, \\ Q_{min} = D - \Delta D_{close}, \\ \Delta D_{close} = \frac{1}{2}D, \end{cases} \quad (2)$$

где S' – прямая солнечная радиация на горизонтальную поверхность; ΔD_{close} – часть рассеянной радиации, перекрываемой непрозрачными для солнечного излучения областями маскирующего элемента.

Из системы уравнений (2) искомые характеристики солнечного излучения определяются как

$$\begin{aligned} D &= 2Q_{min}, \quad S' = Q_{max} - Q_{min}, \\ Q &= Q_{max} + Q_{min}, \quad T_{SS} = \sum_i t_i, \quad S \geq S_T, \end{aligned} \quad (3)$$

где t_i – временные отрезки, когда S -радиация превышает некоторое пороговое значение S_T (в данном случае 200 Вт/м^2).

Недостатком такого подхода является то, что Q -, S - и D -радиация определяются в предположении, что величины рассеянной радиации, поступающие от открытых и закрытых маскирующим элементом участков небосвода, равны. Это может быть справедливо только при условии равномерно распределенной по всему небосводу (и в первую очередь в зенитной области) однородной облачности или при полном ее отсутствии. Несоблюдение такого условия приводит к неправильной оценке актинометрических величин.

На рис. 1 показана ситуация, когда один из затененных от прямого солнечного излучения датчиков получает часть рассеянной радиации от кучевого облака, расположенного в околоразенитной зоне,

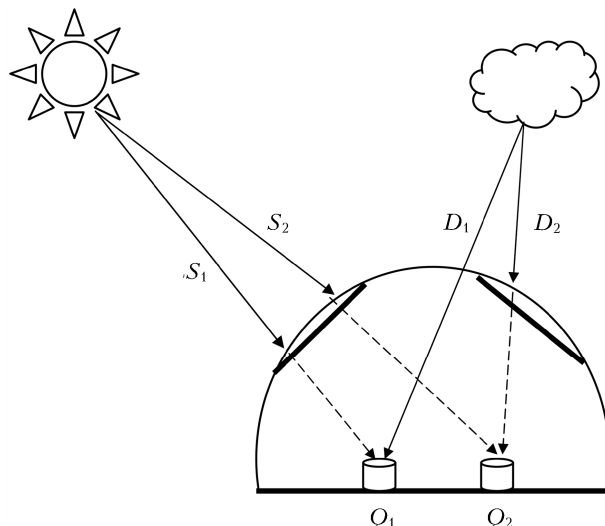


Рис. 1. Пример ошибочного определения величины Q_{min} (S_1 и D_1 – прямая и рассеянная солнечная радиация, получаемая датчиком Q_1 , S_2 и D_2 – датчиком Q_2)

а второй датчик, затененный не только от прямого, но и от рассеянного от этого же облака солнечного излучения, не получает ее. В расчетах в качестве Q_{min} будет использоваться величина солнечной радиации, измеренная вторым датчиком, так как согласно алгоритму работы необходимо определить минимальное из всех значений, что приведет к неучету реальной рассеянной радиации, поступающей от такого облака. При кучевой облачности D -радиация может увеличиваться в 2–3 раза по отношению к величине при ясном небе [10, 11], поэтому ошибка в ее определении может быть достаточно большой, что повлечет за собой ошибки в определении величин Q -, S - и D -радиации по уравнениям (3).

Измерение солнечной радиации многоэлементным ориентированным измерителем характеристик солнечного излучения

Во избежание подобных ситуаций необходимо, чтобы маскирующий элемент имел как можно меньшую площадь областей, непрозрачных для солнечного излучения, и в первую очередь – для рассеянного излучения в зенитной и околоразенитной областях. В значительной мере такие требования можно удовлетворить, если долю непрозрачных областей по отношению ко всей площади полусферического маскирующего элемента выбирать не как $\Delta D_{close} = \frac{1}{2}D$, а как $\Delta D_{close} = \frac{1}{n}D$, где $\frac{1}{n} < \frac{1}{2}$ – доля непрозрачных областей затеняющего экрана, а измеритель ориентировать не произвольным, а таким образом, чтобы, в зависимости от географической широты местности и известных при этом минимальных и максимальных горизонтальных и вертикальных углах положения Солнца, непрозрачные для солнечного излучения области маскирующего элемента

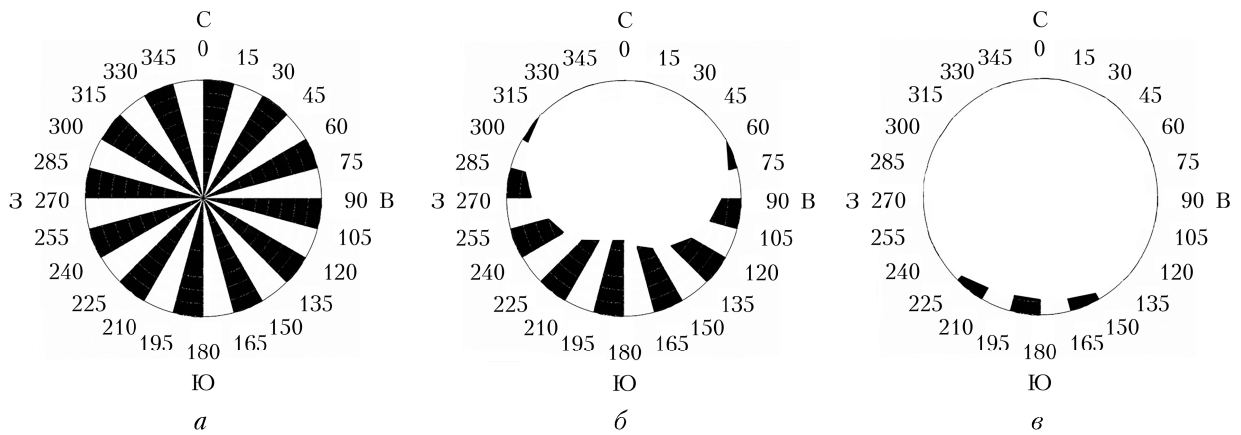


Рис. 2. Вид сверху маскирующего элемента для точки измерения 57° с.ш., 86° в.д. (Томск): исходный (а); для июня (б); для января (в)

располагались только на стороне возможного положения Солнца и имели минимальное значение $\frac{1}{n}$ для определенного периода измерений. При этом Q , S , D -радиация и T_{SS} будут определяться как

$$D = \frac{n}{n-1} Q_{\min}, \quad Q = Q_{\max} + \frac{1}{n-1} Q_{\min}, \quad (4)$$

$$S = \frac{Q_{\max} - Q_{\min}}{\sin h}, \quad T_{SS} = \sum_i t_i, \quad S \geq 120 \text{ Вт/м}^2.$$

На рис. 2, а представлен вид сверху одного из предлагаемых вариантов маскирующего элемента полусферической формы, имеющего одинаковое соотношение прозрачных и непрозрачных для солнечного излучения областей $\frac{1}{n} = \frac{1}{2}$, а на рис. 2, б и в – вид сверху маскирующих элементов, имеющих минимальные значения отношений площади непрозрачных областей соответственно для июня $\frac{1}{n} = \frac{1}{5,18}$ с максимальной высотой Солнца $h = 57^\circ$ и для декабря $\frac{1}{n} = \frac{1}{31,25}$ с максимальной высотой Солнца $h = 11^\circ$ для широты г. Томска (координаты 57° с.ш., 86° в.д.).

Практические результаты

Количество используемых датчиков в измерителе определяет частоту, с которой возможно проводить измерения. Если использовать максимальный вариант с 7 датчиками, то можно обеспечить непрерывные измерения. Если использовать минимальный вариант с 2 датчиками, то измерения можно проводить в светлое время суток 5–6 раз по 2–5 мин. В практической реализации маскирующий элемент не обязательно должен иметь сферическую форму. В простейшем случае это может быть набор трубочатых элементов или столбиков определенного диаметра и высоты, расположенных частоколом с некоторым шагом на определенном расстоянии от области расположения датчиков. В Институте мониторинга

климатических и экологических систем (ИМКЭС) СО РАН был изготовлен макет измерителя характеристик солнечного излучения с трубочатым экраном на базе двух универсальных пиранометров М-80М и двухканального автономного измерителя-регистратора ECLerk-USB-2mV-G производства НПК «Рэлсиб» [12] (рис. 3).

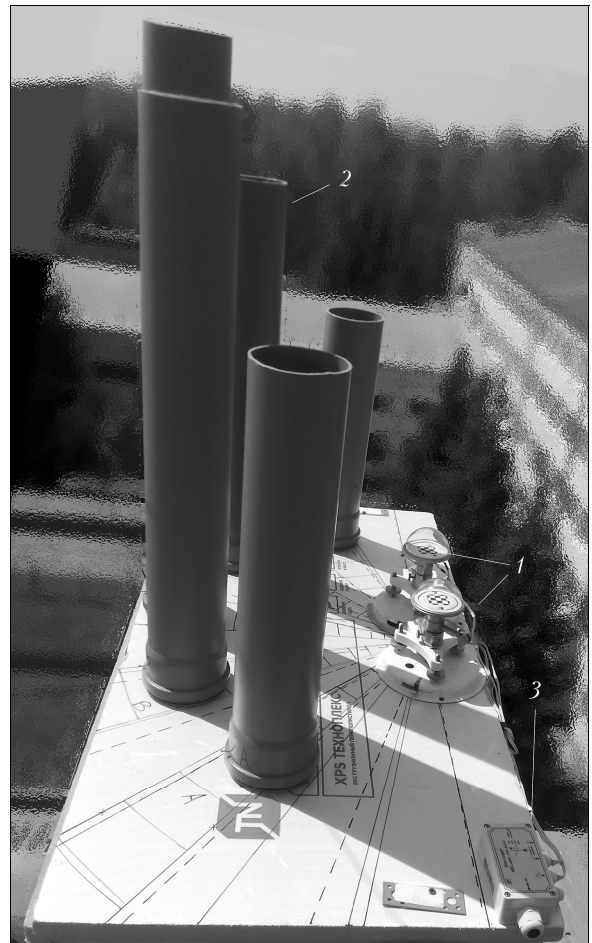


Рис. 3. Двухэлементный измеритель характеристик солнечного излучения ИМКЭС СО РАН: 1 – пиранометры М-80М; 2 – трубочатый экран; 3 – автономный регистратор

Отношение непрозрачных областей трубчатого экрана ко всей площади небосвода в данном случае составило $\frac{1}{n} = \frac{1}{6,8}$, а предельно возможная инструментальная погрешность измерения величин Q_{\max} и Q_{\min} — не более 18%. Определение азимутов положения Солнца, при которых один пиранометр полностью открыт для прямой радиации и измеряет Q_{\max} , а другой полностью закрыт для нее и измеряет Q_{\min} , проводилось в ясные дни, которых в мае — августе 2018 г. оказалось восемь. В результате были определены 5 азимутов положения Солнца, при которых можно проводить измерения в течение 2–5 мин (рис. 4). Так как используемая в макете измерителя модель регистратора имеет ограниченный объем памяти для хранения данных в автономном режиме, измерения значений Q_{\max} и Q_{\min} проводились раз в минуту.

Для проверки работоспособности макета измерителя были выбраны дни с устойчивыми состояниями небосвода, когда в течение всего светового дня преимущественно было ясно или присутствовала только перистая, кучевая или слоисто-кучевая облачность. Полученные средние значения суммарной

радиации (Q_{av}) макета измерителя сравнивались со средними значениями незатененного пиранометра CM11, расположенного в непосредственной близости от макета измерителя, результаты сравнения приведены в таблице.

В некоторых случаях результаты измерений были отбракованы по причине появления помехи от переключателя метеорологической мачты, расположенной на юго-восток от макета измерителя. В других случаях при кучевой облачности отмечался довольно большой коэффициент вариации данных макета измерителя от данных пиранометра CM11, что обусловлено различиями в алгоритмах обработки данных. Если данные пиранометра CM11 получаются путем осреднения односекундных измерений в течение минуты, то данные макета измерителя представляют собой однократные измерения (один раз в минуту). Так как кучевая облачность способна даже в течение коротких промежутков времени модулировать поток прямой радиации от нуля до максимального ее значения, средние значения суммарной радиации могут достаточно сильно отличаться от минимальных и максимальных значений, полученных за этот же промежуток времени, что

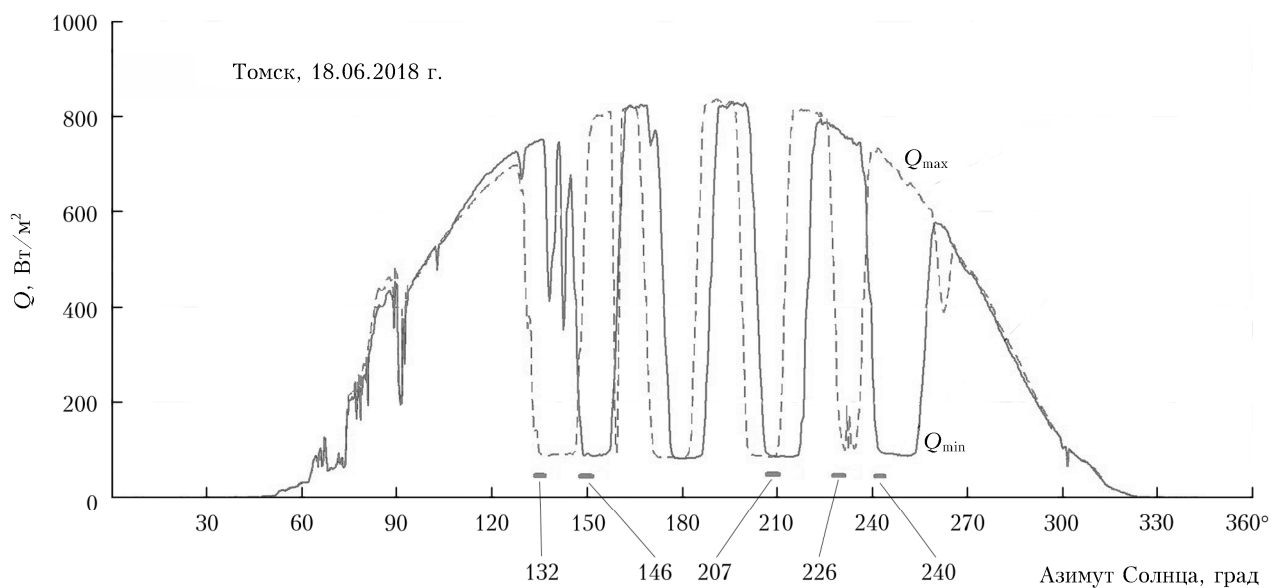


Рис. 4. Азимуты положения Солнца для макета измерителя, при которых определяются значения суммарной, прямой и рассеянной радиации

Сравнение средних значений суммарной радиации макета измерителя (A) и пиранометра CM11 (B)

Азимут, град	Ясно 18.06.2018 г.			Ci 7.09.2018 г.			Cu 29.09.2018 г.			Sc 1.09.2018 г.						
	N	Q_{av} , Вт/м ²		N	Q_{av} , Вт/м ²		N	Q_{av} , Вт/м ²		N	Q_{av} , Вт/м ²					
		A	B		V, %	A		B	V, %		A	B	V, %	A	B	V, %
132,0–132,9	0*	—	—	—	—	—	4	275	297	13**	4	89	85	5		
146,0–146,9	3	794	801	1	4	565	584	4	4	175	179	4	4	111	105	6
207,2–208,0	2	805	826	2	3	614	607	1	3	240	250	24**	3	119	113	5
226,0–226,9	3	755	767	2	4	527	507	4	4	286	321	20**	4	76	75	1
240,0–240,9	3	693	692	0	4	371	358	4	5	269	277	3	4	70	66	7

Примечание. N — число измерений; V — коэффициент вариации; * помеха от метеорологической мачты; ** переменное состояние солнечного диска.

является одним из актинометрических признаков для такой облачности [10, 11].

Заключение

Предлагаемый многоэлементный ориентированный измеритель характеристик солнечного излучения позволяет в зависимости от количества используемых датчиков определять непрерывно или с какой-либо частотой основные элементы радиационного режима, такие как суммарная, прямая и рассеянная радиация с погрешностью, обусловливаемой приборной погрешностью используемых датчиков (в данном случае не более 5–10%). Сравнение полученных с помощью макета измерителя, изготовленного на базе двух пиранометров М-80М, значений суммарной радиации с данными незатененного пиранометра СМ11 показало их хорошее согласие, некоторые расхождения наблюдались при кучевой облачности, что объясняется различиями в алгоритмах обработки первичных данных.

Площадь затеняющего экрана предлагаемого измерителя зависит от географической широты места установки измерителя и времени года. Так, для широты Томска доля непрозрачных областей затеняющего экрана может варьироваться в диапазоне $\frac{1}{5} > \frac{1}{n} > \frac{1}{31}$ от всей площади экрана, что существенно снижает вероятность ошибочного определения минимальных значений радиации по сравнению со случаем $\frac{1}{n} = \frac{1}{2}$. Кроме этого, зенитная область небосвода, являющаяся источником основной части рассеянной радиации, не закрывается затеняющим экраном.

Также немаловажное преимущество для описываемого измерителя характеристик солнечного излучения — отсутствие у него подвижных частей, что особенно актуально при работе в районах с экстремальными климатическими условиями, где любые механизмы подвергаются различным воздействиям при низких температурах. Ориентирование измерителя на юг позволяет использовать простые конструкции затеняющего экрана вплоть до таких, как набор разновысоких труб или столбиков. В случае использования в качестве датчиков миниатюрных измерителей, например фотодиодов, габариты измерителя значительно уменьшаются и измерительную часть прибора можно будет разместить, например, в конструктиве стандартной пиранометрической головки М-115М.

На способ измерения характеристик солнечного излучения, который можно реализовать с помощью

предлагаемого многоэлементного измерителя, получен патент [13].

Работа выполнена в рамках проекта фундаментальных исследований СО РАН IX.138.2.5 «Научно-методические основы создания и использования технологий и информационно-измерительных комплексов для дистанционного мониторинга нижнего слоя атмосферы».

1. *Руководство* гидрометеорологическим станциям по актинометрическим наблюдениям / под ред. Г.П. Гущина, Е.П. Барашковой. Л.: Гидрометеоиздат, 1973. 224 с.
2. РД 52.04.562-96. Актинометрические наблюдения. Ч. 1. Актинометрические наблюдения на станциях // Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. 1997. Вып. 5. 191 с.
3. *Kipp & Zonen Product Catalogue*. URL: <https://www.kippzonen.com/Download/576/Kipp-Zonen-Product-Catalogue> (last access: 14.01.2019).
4. *Станция* актинометрическая СФ-14. URL: <https://peleng.by/products/meteorology/21.html> (дата обращения: 14.01.2019).
5. *Обзор* состояния и функционирования автоматизированных метеорологической и актинометрической сетей в 4-м квартале и в целом за 2016 год. URL: <http://voeikovmgo.ru/images/download/publication/2017/03/test20170303.pdf> (дата обращения: 14.01.2019).
6. Белан Б.Д., Ивлев Г.А., Скляднева Т.К. Многолетний мониторинг суммарной и ультрафиолетовой (В) радиации в районе г. Томска // *Оптика атмосф. и океана*. 2012. Т. 25, № 1. С. 61–65; Belan B.D., Ivlev G.A., Sklyadneva T.K. Long-term monitoring of total and UV-B radiation in Tomsk // *Atmos. Ocean. Opt.* 2012. V. 25, N 4. P. 281–285
7. *Сивков С.И.* Методы расчета характеристик солнечной радиации. Л.: Гидрометеоиздат, 1968. 232 с.
8. *Абакумова Г.М., Горбаренко Е.В., Невзаль Е.И., Шиловецова О.А.* Климатические ресурсы солнечной энергии Московского региона. М.: Книжный дом ЛИБРОКОМ, 2012. 312 с.
9. *Sunshine Pyranometer SPN1*. URL: <https://www.delta-t.co.uk/product/spn1> (last access: 14.01.2019).
10. Zuev S.V., Krasnenko N.P., Kartashova E.S. Cloud identification using actinometrical data // *IOP Conf. Ser.: Earth and Environ. Sci.* 2017. V. 96. P. 012013.
11. Zuev S.V., Krasnenko N.P., Kartashova E.S. Using actinometric data for identification of cumulus clouds // *Proc. SPIE*. 2017. V. 10466. P. 1046638-1–5.
12. *Автономный* регистратор двухканальный EClerk—USB—2mV—G. URL: http://relsib.nt-rt.ru/images/manuals/Pass_EClerk_2mV_G.pdf (дата обращения: 14.01.2019).
13. *Способ* измерения характеристик солнечного излучения: Пат. 2682590. Россия, МПК51, G 01 W 1/12, G 01 J 1/42. Зуев С.В.; ИМКЭС СО РАН. № 2018108486; Заявл. 7.03.18; Опубл. 19.03.19. Бюл. № 8.

S.V. Zuev. Multisensor oriented solar irradiance meter.

This paper describes the multisensor oriented solar irradiance meter without moving parts for measuring total, direct, and diffuse irradiance and sunshine duration.