

УДК 551.508.953

## Солнечные фотометры для измерений спектральной прозрачности атмосферы в стационарных и мобильных условиях

С.М. Сакерин<sup>1</sup>, Д.М. Кабанов<sup>1</sup>, А.П. Ростов<sup>1</sup>,  
С.А. Турчинович<sup>1</sup>, В.В. Князев<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН

634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

<sup>2</sup>ООО «Сибаналитприбор»

634021, г. Томск, пр. Академический, 10/3

Поступила в редакцию 27.04.2012 г.

Приводятся описание и краткие характеристики многоволновых солнечных фотометров SP-9 и SPM. Солнечный фотометр SP-9 предназначен для круглогодичного мониторинга спектральной прозрачности атмосферы в диапазоне спектра 0,3–2,2 мкм на региональной сети станций. Для реализации автоматизированного режима измерений (без участия операторов) в состав прибора включены датчик Солнца, автоматическая система наведения/слежения за Солнцем, встроенные GPS-приемник, flash-память и датчики метеопараметров. Портативный фотометр SPM является упрощенным аналогом SP-9 и предназначен для измерений прозрачности атмосферы в мобильных условиях.

*Ключевые слова:* солнечный фотометр, аэрозольная оптическая толщина; sun photometer, aerosol optical depth.

### Введение

Солнечная фотометрия атмосферы является одним из эффективных средств изучения оптических характеристик аэрозоля и определения общего содержания атмосферных газов (H<sub>2</sub>O, O<sub>3</sub> и др.). В числе достоинств можно отметить относительно простую аппаратную реализацию, не требующую создания высокочувствительных или энергоемких оптико-электронных систем, и несложный алгоритм проведения эксперимента: солнечный фотометр должен обеспечивать наведение/слежение за Солнцем и регистрацию солнечного излучения в отдельных участках спектра. По результатам измерений определяется аэрозольная оптическая толщина (АОТ), общее влагосодержание и другие характеристики атмосферной толщи. Основной недостаток состоит в том, что использование метода возможно только в ситуациях, когда Солнце не закрыто облаками.

Актуальность исследований происходящих климатических изменений и потребности космического зондирования (атмосферная коррекция, валидация спутниковых данных) стимулируют развитие солнечной фотометрии на современном этапе. В последнее двадцатилетие были созданы автоматизированные солнечные фотометры и преодолены математические трудности решения некорректных обрат-

ных задач, которые позволили расширить номенклатуру восстанавливаемых параметров атмосферного аэрозоля [1–4 и др.]. В числе наиболее известных приборов, удовлетворяющих современным требованиям измерений АОТ и влагосодержания атмосферы, можно отметить: Sun-Sky-радиометр Cielmel CE-318 ([www.cielmel.fr](http://www.cielmel.fr)), солнечный фотометр MS-120 (<http://www.eco.co.jp>), прецизионный фильтровый радиометр PFR (<http://www.pmodwrc.ch>), фильтровый спектрометр SPUV-6 и радиометр с вращающимся теневым экраном MFR-7 (<http://www.yesinc.com>).

Однако при проведении регулярных круглогодичных измерений важным условием является функционирование фотометров в режиме «полной автоматизации» – без участия оператора. Из серийных приборов таким требованиям удовлетворяют только Sun-Sky-радиометры CE-318, функционирующие в составе глобальной сети AERONET ([5], <http://aeronet.gsfc.nasa.gov>). Автоматизированные измерения осуществляются независимо от состояния облачности, в программно заданное время с цикличностью до 4 замеров в час (подробнее см. [5]). Такой режим работы оказывается недостаточно эффективным в условиях частой облачности, так как приводит к потере части данных и необходимости применения специальных алгоритмов фильтрации сигналов, искаженных облачностью [6].

Другой подход развивается в разработках ИОА СО РАН [7–9]: функционирование солнечного фотометра осуществляется непрерывно, но только в ситуациях, когда Солнце не закрыто облаками. Алгоритм автоматизации прибора включает выпол-

\* Сергей Михайлович Сакерин ([sms@iao.ru](mailto:sms@iao.ru)); Андрей Михайлович Кабанов ([kam@iao.ru](mailto:kam@iao.ru)); Андрей Петрович Ростов ([rostov@iao.ru](mailto:rostov@iao.ru)); Сергей Антонович Турчинович; Василий Васильевич Князев.

нение следующих действий: 1) инструментальное определение ситуаций «безоблачного Солнца»; 2) автоматическое наведение фотометра и слежение за Солнцем; 3) измерение спектральной прозрачности и накопление данных. В этом режиме функционирования экономится ресурс электромеханической системы наведения/слежения и существенно сокращается число ложных (облачных) замеров.

В 2009 г. были разработаны базовый вариант фотометра SP-9 [9], реализующего указанный алгоритм работы, а также его упрощенный мобильный аналог SPM [10]. После двухлетних испытаний фотометров была проведена их модернизация, которая включала: а) конструкторско-технологическую доработку отдельных узлов; б) увеличение внутренней памяти накопления данных; в) установку встроенного GPS-приемника для определения точного времени и координат; г) замену электромеханического поворотного устройства УН-79 на более совершенное; д) включение в состав прибора цифрового блока «Метео» для регистрации температуры, давления и влажности в месте наблюдений. Ниже представлены описание и технические характеристики доработанных приборов.

## 1. Автоматизированный солнечный фотометр SP-9

Солнечный фотометр SP-9 (рис. 1) предназначен для круглогодичного мониторинга спектральной прозрачности атмосферы в диапазоне спектра 0,3–2,2 мкм на региональной сети станций с целью последующего определения АОТ и влагосодержания атмосферы. В состав прибора входят следующие основные части: собственно фотометр; автоматическая система наведения/слежения AST на треножнике; датчик Солнца (DS) (рис. 1, б); блок питания (преобразователь 220/24 В) и пульт ручного управления сканированием (рис. 1, в). Блок-схема фотометра приведена на рис. 2, технические характеристики в таблице.

*Датчик Солнца* служит для инструментального определения ситуаций, когда Солнце не закрыто облаками, и включения системы наведения фотометра. Техническое решение датчика (рис. 3) основано на использовании «эффекта тени», которая образуются только в условиях освещения фотодиода 1 прямыми лучами Солнца. Схема DS работает следующим образом. Электродвигатель модулирующего теневого экрана (стакан с прорезями) включается при выполнении двух условий: а) только в дневное время (при срабатывании датчика дневного освещения 2); б) если фотометр находится в запаркованном состоянии. В случае, когда Солнце выходит из-за облаков, в плоскости фотодиода 1 образуются теневые зоны. При вращении экрана с прорезями указанные зоны попеременно появляются и исчезают, в результате чего генерируется переменный сигнал, пропорциональный прямому излучению. Компаратор настраивается на пороговый сигнал прямого излучения, соответствующего максимальному замутнению атмосферы, при котором

еще целесообразна работа фотометра. В случае превышения заданного порога подается команда на включение системы AST.

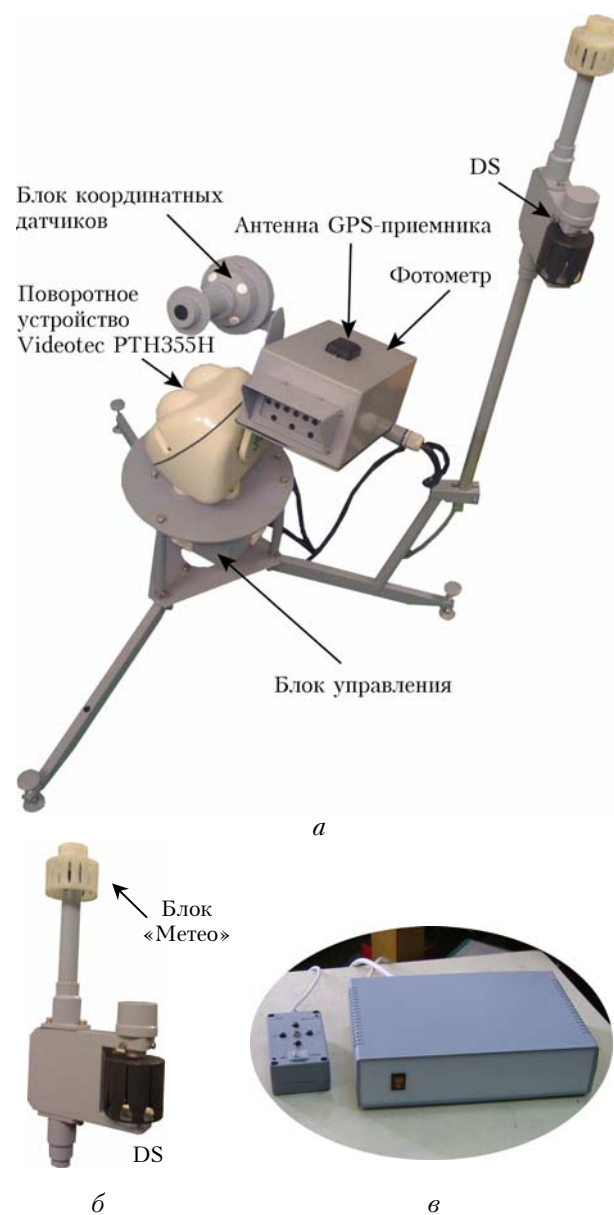


Рис. 1. Внешний вид модернизированного фотометра SP-9 (а); датчика Солнца DS и блока «Метео» (б); пульта управления и блока питания (в)

*Система наведения AST* (рис. 3) включает в свой состав: двухкоординатное (зенит/азимут) поворотное устройство Videotec PTH355H, блок координатных фотодатчиков, установленный на одной оси с фотометром, и блок управления сканированием. В сравнении с предшествующим вариантом [8] поворотное устройство PTH355H имеет меньшие люфты электропривода и более высокую скорость сканирования (до  $30^\circ \cdot \text{с}^{-1}$  по азимуту, до  $18^\circ \cdot \text{с}^{-1}$  по углу места), что обеспечивает наведение фотометра на Солнце за время не более 10 с и слежение с погрешностью  $\pm 0,3^\circ$ .

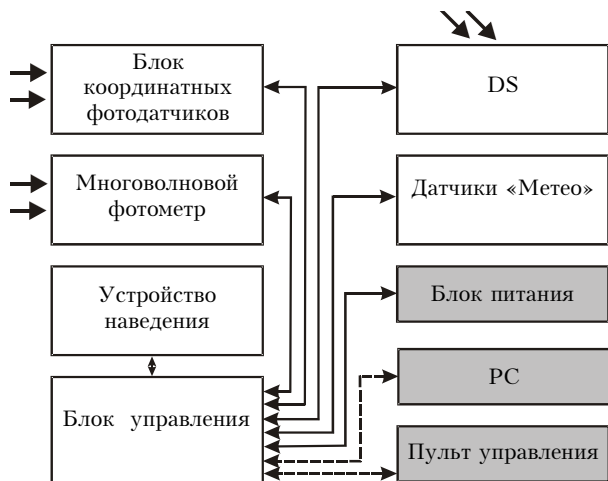


Рис. 2. Блок-схема фотометра SP-9 (пунктиром показаны временные соединения, не обязательные для автоматизированной работы прибора)

**Технические характеристики солнечного фотометра SP-9**

Характеристика	Коротковолновый канал	ИК-канал
Диапазон спектра, мкм	0,3–1,05	1–2,2
Угол поля зрения, град	1,5–2	2–2,5
Время одного цикла измерений, с	1	
Интервал между циклами, мин	1	
Объем flash-памяти, Мбит	32	
Период накопления данных, дни	80	
Погрешность измерений, не более, %	0,5	
Погрешность слежения, град	0,3	
Температура термостата, °С	36 ± 0,3	
Потребляемая мощность, не более, Вт	100	

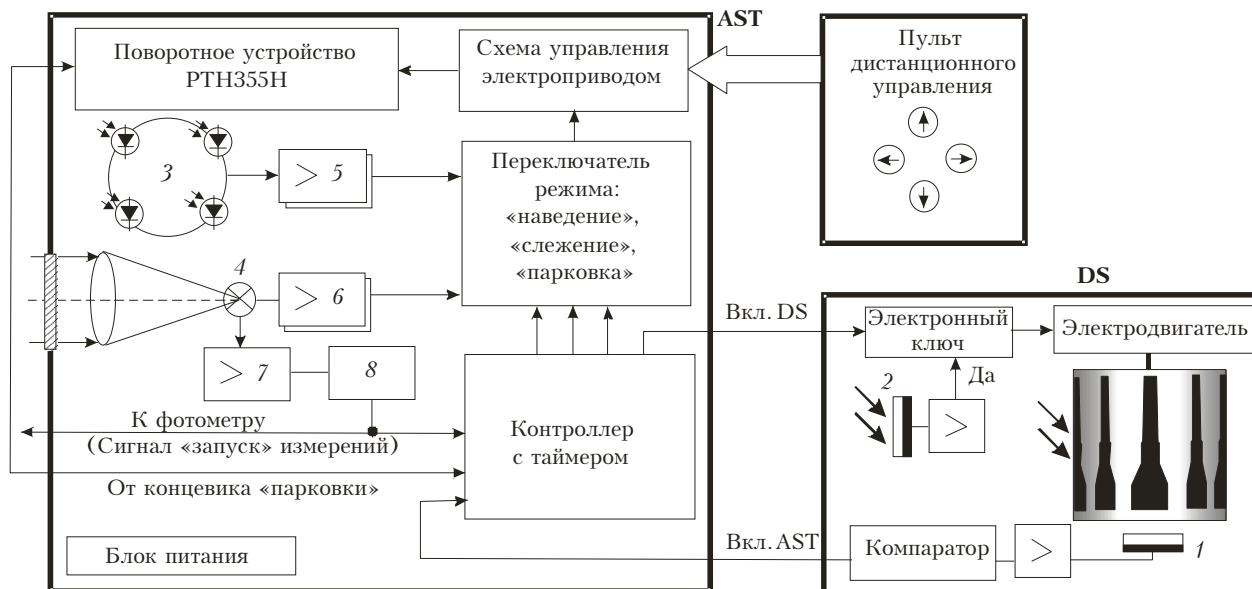


Рис. 3. Блок-схема системы наведения/слежения AST и датчика Солнца DS: 1 – фотодиод прямого солнечного излучения; 2 – датчик освещенности; 3 – четыре фотодиода схемы грубого наведения; 4 – четырехсекторный фотодиод ФД-142 системы точного слежения; 5, 6 – усилители разностных сигналов; 7 – усилитель суммарного сигнала фотодиода 4; 8 – компаратор

Управление поворотным устройством осуществляется схемами грубого наведения и точного слежения. Для поиска Солнца и грубого наведения используются четыре развернутых друг относительно друга фотодиода с рассеивающими насадками (общее поле обзора не менее  $90 \times 240^\circ$ ) и четырехсекторный фотодиод ФД-142, установленный в фокусе линзы (поле зрения  $\sim 5^\circ$ ).

Электронная схема с контроллером обеспечивает управление электродвигателями поворотного устройства РТН355Н по сигналам координатных фотодатчиков: а) если оптическая ось фотометра ориентирована вне Солнца, управление осуществ-

ляется от четырех фотодиодов схемы грубого наведения; б) при попадании изображения Солнца в поле зрения фотодиода ФД-142 управление переключается на схему точного слежения.

При выполнении юстировочных и ремонтных работ используется пульт дистанционного управления (см. рис. 1, в), подключаемый непосредственно к блоку управления AST. Пульт содержит кнопки управления направлением сканирования «вверх», «вниз», «влево», «вправо» и переключатель перехода в автоматический режим.

**Блок «Метео».** Для измерения метеопараметров в точке наблюдений в состав фотометра вклю-

чены и программно адаптированы цифровые датчики относительной влажности/температуры SHT-75 (Sensirion) и давления/температуры FOSP01A (Hope Microelectronics). Для обслуживания их интерфейсов написаны процедуры, в которые включены расчеты метеопараметров, измеренных датчиками, и их коррекция на температуру. Погрешность измерения датчика FOSP01A: давление  $\pm 0,5$  кПа, температура  $\pm 0,8$  °C. Погрешность измерения датчика SHT-75: температура  $\pm 0,3$  °C (при 25 °C), относительная влажность  $\pm 1,8\%$ .

Датчик FOSP01A размещен внутри корпуса фотометра. Измеряемая датчиком температура необходима для контроля работы термостата, а давление — для учета молекулярного рассеяния в расчетах АОТ атмосферы. Датчик влажности/температуры SHT-75 расположен на выносной штанге, в футляре с прорезями, который защищает от осадков и прямого солнечного излучения (см. рис. 1, б).

*Опτικο-электронная схема фотометра* — безлиновая, многоканальная с общим входным окном из кварца. Фотоприемные устройства состоят из двух (трех) типов фотодиодов, работающих в коротковолновой области (до 1,05 мкм) и ближнем ИК-диапазоне: ФПУ4ТО5 (Si) и Hamamatsu G8373-01 (InGaAs). Оптические оси измерительных каналов съюстированы в одном направлении с системой слежения фотометра.

Для спектральной селекции используются интерференционные светофильтры с полушириной пропускания 0,005–0,02 мкм. Базовые длины волн (максимумы пропускания) фильтров: 0,34; 0,37; 0,41; 0,44; 0,50; 0,55; 0,67; 0,78; 0,87; 0,94 (H<sub>2</sub>O); 1,05; 1,24; 1,55; 2,14 мкм. В зависимости от задач могут устанавливаться и другие светофильтры в диапазоне спектра 0,3–2,2 мкм в общем количестве до 17 шт.

Управление фотометром и регистрация сигналов осуществляются цифровым блоком, в состав которого входят: RISC-микроконтроллер ATmega-128, 14-разрядный 32-канальный АЦП, flash-память на чипе AT45DB321D, часы реального времени с автономным источником питания, высокочувствительный GPS-приемник eMD3622F/OPUs III ezRide-22 с внешней антенной ANT GPS BY-GPS 04 SMA-M.

Для поддержания стабильной чувствительности фотометра внутри прибора установлен термостат. Термостатирование предохраняет также входное окно от запотевания. При «парковке» фотометр автоматически переводится в положение «вниз», что позволяет защитить входные окна от осадков и осаждения пыли.

Благодаря увеличению объема flash-памяти, количество замеров в модернизированном SP-9 (в сравнении с [9]) возросло с 8000 до 65000. Соответственно среднее время автономной работы фотометра, в течение которого не требуется процедура очистки (форматирования) памяти, увеличилось до 80 дней.

Погрешность расчета зенитного угла Солнца и АОТ атмосферы существенно зависит от точности определения координат и времени [11, 12]. Поэтому установка GPS-приемника исключила необходи-

мость постоянного контроля и переустановки этих параметров — они регистрируются автоматически, вместе с оптическими данными.

Процесс автоматизированной работы SP-9 осуществляется следующим образом. В ждущем режиме поворотная платформа с фотометром запаркована, т.е. развернута вниз и ориентирована на юг. По сигналу датчика Солнца управляющий контроллер последовательно подает команды на грубое наведение фотометра, а затем — на слежение за Солнцем и включение программы измерений. Если в течение заданного времени (~1 мин) Солнце не было найдено или перекрылось облаком, то контроллер подается команда на «парковку» фотометра и включение DS. То есть системы AST и DS работают поочередно: а) когда Солнце закрыто облаками — включен DS, а AST находится в ждущем режиме (фотометр запаркован); б) при безоблачном Солнце — AST осуществляет слежение, фотометр измеряет, а DS выключен.

Процедура регистрации сигналов фотометра включает: 1) опрос GPS-приемника; 2) опрос (50 мс) и усреднение сигналов всех оптических каналов с записью в ОЗУ; 3) проведение 20 таких замеров и выбор максимальных значений по каждому каналу; 4) опрос метеодатчиков; 5) запись всей полученной информации во flash-память. Через 1 мин указанный измерительный цикл повторяется.

## 2. Портативный солнечный фотометр SPM

Солнечный фотометр SPM (рис. 4) является упрощенным портативным аналогом SP-9 — без датчика Солнца и системы AST.

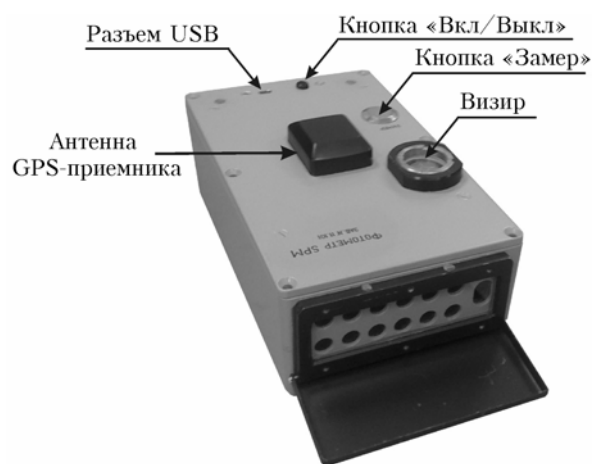


Рис. 4. Внешний вид портативного фотометра SPM

Прибор предназначен для измерений спектральной прозрачности атмосферы в экспедиционных и мобильных условиях — из положения «с руки». По сравнению с портативным фотометром Microtops II ([13], <http://www.solar.com/sunphoto.htm>), SPM имеет преимущество по диапазону

спектра и числу измерительных каналов (12 фильтров вместо 5).

Оптико-электронная схема прибора размещена в стандартном металлическом корпусе (200×118×64 мм) с теплоизоляционным покрытием. В состав фотометра входят 12 фотоприемных устройств с интерференционными фильтрами, визирное устройство, аккумулятор, термостат и цифровой блок, аналогичный SP-9: RISC-микроконтроллер, АЦП, flash-память, часы реального времени, датчик давления/температуры, GPS-приемник.

Процедура измерений заключается в наведении фотометра на Солнце с помощью визира (по солнечному зайчику на прицельной сетке в фокусе визирной линзы) и нажатия кнопки «Замер». Единичный цикл измерений – поочередный опрос спектральных каналов – продолжается пока нажата кнопка «Замер». Учитывая, что наведение прибора на Солнце осуществляется вручную, из текущих замеров в каждом цикле измерений выбираются максимальные значения сигналов, которые записываются в память вместе с данными GPS-приемника и датчика давления/температуры. Такой подход позволяет исключить ложные замеры, связанные с неточностью или сбоями наведения фотометра на Солнце.

Электронная схема фотометра питается от встроенного аккумулятора, а термостата – от компьютера через USB-порт или от внешнего блока питания (5 В, 1 А), обеспечивающего также подзарядку аккумулятора. На время измерений фотометр отключается от блока питания, но термоизоляция обеспечивает сохранение температуры внутри корпуса в течение 5–10 мин, необходимых для проведения замеров.

При подключении к фотометрам SPM и SP-9 персонального компьютера с помощью сервисной программы осуществляются:

передача в компьютер информации, накопленной во flash-памяти;

просмотр в графическом виде данных оптических измерений и метеопараметров;

диагностирование фотометра (контроль напряжений питания, внутренней температуры, количества замеров, накопленных во flash-памяти);

просмотр содержания отдельных блоков памяти.

Расчет АОТ и влагосодержания атмосферы по данным измерений фотометров выполняется с помощью программных модулей информационной системы [14], которая содержит следующие программы: «обработка данных» – расчет АОТ и влагосодержания атмосферы;

ручная и автоматическая «фильтрация данных»;

расчет параметров микроструктуры аэрозоля (решение обратной задачи).

При нормальных условиях эксплуатации и калибровочных данных погрешность определения АОТ по данным измерений солнечных фотометров составляет 0,01–0,02, влагосодержания атмосферы ~0,1 г/см<sup>2</sup>.

По заказам различных институтов изготовлено более 10 фотометров типа SP: 3 фотометра установлены в Томской области, 2 – в Приморском крае, 2 – в Бурятии, по одному – в Екатеринбурге, Якутске, Волгограде. Кроме того, портативные фотометры SPM постоянно используются в экспедиционных измерениях в районах Шпицбергена, Тикси, Атлантического и Южного океанов, Японского и Охотского морей.

Работа выполнена при финансовой поддержке партнерского интеграционного проекта № 25 СО РАН, проектов № 23.1 и 4.5 программ фундаментальных исследований Президиума РАН и Государственного контракта № 02.740.11.0674.

1. *Dubovik O.T., King M.* A flexible inversion algorithm for retrieval aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements // *J. Geophys. Res. D.* 2000. V. 105, N 16. P. 20673–20696.
2. *Devaux C., Vermeulen J., Deuze J.L., Herman M., Sanre R.* Retrieval of aerosol-single scattering albedo from ground-based measurements. Application to observational data // *J. Geophys. Res. D.* 1998. V. 103, N 8. P. 8753–8761.
3. *Свириденков М.А., Аникин П.П., Журавлева Т.Б., Насртдинов И.М.* Параметризация отношения потока рассеянного и прямого солнечного излучения и ее использование для оценок альбедо однократного рассеяния с помощью приборов типа MFRSR // *Оптика атмосф. и океана.* 2008. Т. 21, № 4. С. 333–338.
4. *Бедарева Т.В., Журавлева Т.Б.* Оценка аэрозольного поглощения в летних условиях Западной Сибири по данным солнечной фотометрии // *Оптика атмосф. и океана.* 2011. Т. 24, № 12. С. 1023–1030.
5. *Holben B.N., Eck T.F., Slutsker I., Tanre D., Buis J.P., Setzer A., Vermote E., Reagan J.A., Kaufman Y.J., Nakadjima T., Lavenue F., Jankowiak I., Smirnov A.* AERONET – A federated instrument network and data archive for aerosol characterization // *Remote Sens. Environ.* 1998. V. 66, N 1. P. 1–16.
6. *Smirnov A., Holben B., Eck T.F., Dubovik O., Slutsker I.* Cloud screening and quality control algorithms for the AERONET data base // *Remote Sens. Environ.* 2000. V. 73, N 3. P. 337–349.
7. *Кабанов Д.М., Сакерин С.М., Турчинович С.А.* Солнечный фотометр для научного мониторинга (аппаратура, методики, алгоритмы) // *Оптика атмосф. и океана.* 2001. Т. 14, № 12. С. 1162–1169.
8. *Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Ростов А.П., Турчинович С.А., Турчинович Ю.С.* Система сетевого мониторинга радиационно-активных компонент атмосферы. Часть I. Солнечные фотометры // *Оптика атмосф. и океана.* 2004. Т. 17, № 4. С. 354–360.
9. *Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Ростов А.П., Турчинович С.А.* Солнечный фотометр SP-9 для аэрозольного мониторинга // *Приборы и техн. эксперим.* 2010. № 5. С. 165–166.
10. *Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Ростов А.П., Турчинович С.А.* Портативный солнечный фотометр // *Приборы и техн. эксперим.* 2009. № 2. С. 181–182.
11. *Thomason L.W., Herman B.M., Schotland R.M., Reagan J.A.* Extraterrestrial solar flux measurement limitations due to a Beers law assumption and uncertainty in local time // *Appl. Opt.* 1982. V. 21, N 7. P. 1191–1195.
12. *Korotaev G.K., Sakerin S.M., Ignatov A.M., Stowe L.L., Mc Clain E.P.* Sun-photometer observations of aerosol optical thickness over the North Atlantic from

- a Soviet Research vessel for validation of satellite measurements // J. Atmos. and Ocean. Technol. 1993. V. 10, N 5. P. 725–735.
13. *Morys M., Mims III F.M., Hagerup S., Anderson S.E., Baker A., Kia J., Walkup T.* Design, calibration, and performance of MICROTOPS II handheld ozone monitor and Sun photometer // J. Geophys. Res. D. 2001. V. 106, N 13. P. 14,573–14,582.
14. *Кабанов Д.М., Веретенников В.В., Воронина Ю.В., Сакерин С.М., Турчинович Ю.С.* Информационная система для сетевых солнечных фотометров // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 1. С. 61–67.

*S.M. Sakerin, D.M. Kabanov, A.P. Rostov, S.A. Turchinovich, V.V. Knyazev.* **Sun photometers for measuring the spectral atmospheric transparency under stationary and mobile conditions.**

The SP-9 and SPM multiwavelength sun photometers are described and briefly characterized. The SP-9 sun photometer is designed for year-round monitoring of the spectral atmospheric transparency in the wavelength range 0.3–2.2  $\mu\text{m}$  in the regional network of stations. To implement the automatic measurement mode (unattended by operators), the instrument includes solar sensor, automatic sun pointing/tracking system, built-in GPS receiver and flash drive, and sensors of meteorological parameters. The SPM portable photometer is a simplified version of SP-9 and is designed for the atmospheric transparency measurements under mobile conditions.