

АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 551.508.953

**С.М. Сакерин, Д.М. Кабанов, А.П. Ростов, С.А. Турчинович,
Ю.С. Турчинович**

Система сетевого мониторинга радиационно-активных компонентов атмосферы. Часть I. Солнечные фотометры

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 21.01.2004 г.

Обсуждаются основные принципы создания информационно-измерительной системы автоматизированного мониторинга радиационно-значимых характеристик атмосферы в Сибири. Приводится описание солнечного фотометра со встроенным микроконтроллером, измеряющего сигналы прозрачности атмосферы в 18 спектральных участках в диапазоне спектра 0,3–4 мкм. В сравнении с аналогами разработанный прибор имеет более широкий диапазон спектра, регулярно измеряет метеопараметры в точке наблюдений и контролирует свои основные характеристики (шумы, работа термостата и др.). Дается краткая характеристика программного обеспечения, предназначенного для автономного (без участия операторов) функционирования фотометра.

Введение

В последнее десятилетие активизировались исследования по проблеме глобального потепления для объяснения происходящих процессов и прогнозирования их развития. В связи с этим в заключениях различных экспертов (см., например, [1]) подчеркивается необходимость развития систем регулярных наблюдений для долговременного мониторинга климатических характеристик в глобальном, региональном и локальном масштабах. Важную роль в радиационно-климатических процессах играют аэрозоль, водяной пар, озон (наиболее переменные компоненты атмосферы) и другие парниковые газы.

Одним из эффективных и достаточно простых методов определения их общего содержания является солнечная спектрофотометрия атмосферы (метод прозрачности). В числе современных средств мониторинга спектральной прозрачности следует отметить: прецизионный фильтровый радиометр PFR (<http://www.pmodwrc.ch>), солнечный фотометр MS-120 (<http://www.eco.co.jp>), фильтровый спектрометр SPUV-6 и радиометр с поворотным теньевым экраном MFR-7 (<http://www.yesinc.com>).

В наибольшей степени требованиям единообразия измерений и глобального охвата отвечает сеть AERONET (<http://aeronet.gsfc.nasa.gov>), созданная на базе солнечных фотометров CE 318 (www.cimel.fr) и насчитывающая более 100 станций на всех континентах планеты [2]. По сути, AERONET является пока единственным примером автоматизированной сети мониторинга. Ее важными достоинствами являются: оперативность обработки результатов наблюдений, наличие INTERNET — доступной базы аэрозольных данных и высокая

информативность. Благодаря применению современных методов и алгоритмов решения обратных задач, кроме аэрозольной оптической толщи (АОТ) атмосферы восстанавливаются индикатрисы аэрозольного рассеяния, микроструктура аэрозоля и альbedo однократного рассеяния.

В России сетевой мониторинг ведется только по общему содержанию озона в режиме «ручных» замеров [3], а наблюдения АОТ атмосферы прекратились более 10 лет назад. Регулярные измерения общего содержания парниковых газов выполняются только в 3–4 районах европейской части (см., например, [4]). Таким образом, громадные пространства Сибири в отношении сетевых наблюдений прозрачности атмосферы остаются «белым пятном», несмотря на важнейшую роль территории в аэрозольно-газовых обменах и климате.

Для преодоления указанного несоответствия нами проводилась работа по созданию многоволновых солнечных фотометров, разработке алгоритмов автоматизации измерений, развитию методик определения АОТ и содержания газовых компонентов атмосферы [5–8]. Последний вариант фотометра SP-6, предназначенного для работы в составе информационно-измерительной сети с базой данных, рассматривается в настоящей статье.

1. Концепция сетевого комплекса

При создании нового прибора в качестве основы был взят солнечный фотометр SP-4, который прошел длительную эксплуатацию в режиме круглогодичных измерений [6]. Напомним, что для работы фотометра SP-4 в режиме «без участия оператора» дополнительно были реализованы функции автоматического определения факта «безоблачного

Солнца» и поиска Солнца до момента его захвата системой точного слежения. Переход к сетевому режиму наблюдений спектральной прозрачности атмосферы потребовал ряда изменений как в алгоритмах функционирования измерительного комплекса, так и в технических решениях самого фотометра. При выборе принципов организации многоточечных измерений были заимствованы некоторые подходы, используемые в системе AERONET.

Концепция мониторинга содержания аэрозольно-газовых компонентов атмосферы на основе данных о спектральной прозрачности предусматривает решение следующих задач.

1. Функционирование системы в виде автоматизированной сети, которая включает набор «датчиков» с удаленным доступом (SP-6 в различных районах Сибири) и общий информационный центр сбора, обработки и архивации данных. Состав информационной части системы «от фотометров до базы данных» будет рассмотрен во второй части статьи.

2. Автономный режим работы фотометров SP-6, который включает:

а) определение ситуаций «безоблачного Солнца» и наведение фотометра на Солнце;

б) измерение — накопление сигналов спектральной прозрачности атмосферы;

в) в ночное время и в ситуациях облачности — перевод фотометра в дежурное положение («парковка»), в котором обеспечена защита входной оптики от осадков и пыли;

г) самодиагностику фотометра — периодическое измерение шумов измерительных каналов, температуры термостата, основных напряжений питания и др.;

д) использование встроенного микроконтроллера с АЦП и передачу сигналов («фотометр—компьютер») в цифровом виде для сокращения числа линий связи и улучшения помехозащищенности.

3. Дополнительное измерение метеорологических элементов (температуры, влажности, давления), которые необходимы для повышения точности восстановления оптических характеристик и последующего анализа результатов наблюдений.

4. Проведение ежегодных калибровок фотометров в горных условиях (обсерватория Монды, ИСЗФ СО РАН).

Ниже приведены описание разработанного прибора и характеристика программного обеспечения.

2. Устройство фотометра

В состав солнечного фотометра SP-6 входят следующие основные узлы и блоки:

1) многоволновой солнечный фотометр со встроенным микроконтроллером;

2) система наведения и слежения за Солнцем;

3) блок датчиков Солнца и метеорологических элементов;

4) блок питания-управления и персональный компьютер.

Внешний вид и устройство оптической части фотометра на поворотном столе показаны на рис. 1, 2.



Рис. 1. Внешний вид фотометра SP-6

Для измерений прозрачности атмосферы в широком спектральном диапазоне $\sim 0,3\text{--}4$ мкм используются три измерительных канала — ультрафиолетовый (УФ), коротковолновый (КВ) и длинноволновый (ДВ), которые при работе ориентируются в направлении на Солнце. Особенности фотоприемных трактов поясняются табл. 1. Выделение отдельных спектральных участков приходящего излучения осуществляется с помощью интерференционных фильтров, расположенных в барабане: на внешнем диаметре барабана — 12 фильтров УФ- и КВ-каналов, на внутреннем диаметре — 6 фильтров ДВ-канала. Установка фильтров перед фотоприемниками (поворот барабана) производится шаговым двигателем по команде контроллера.

Датчики метеоэлементов располагаются в отдельном вентилируемом контейнере, предохраняющем чувствительные элементы от прямого солнечного излучения. Для измерения давления и температуры используется кварцевый преобразователь ПДТК-0.1-1Р («СКТБ ЭлПА»), для измерения относительной влажности — сенсор НН 3602 (фирма Honeywell). Датчик (№ 1) Солнца, представляющий собой кремниевый фотодиод с рассеивающей насадкой, установлен в верхней части контейнера и используется для определения факта «безоблачного Солнца». Принятие решения производится путем сравнения сигнала датчика $U_{S1}(Z)$ с заранее подобранным пороговым значением $\Delta_1(Z)$ для каждого зенитного угла Солнца Z (см. [6]).

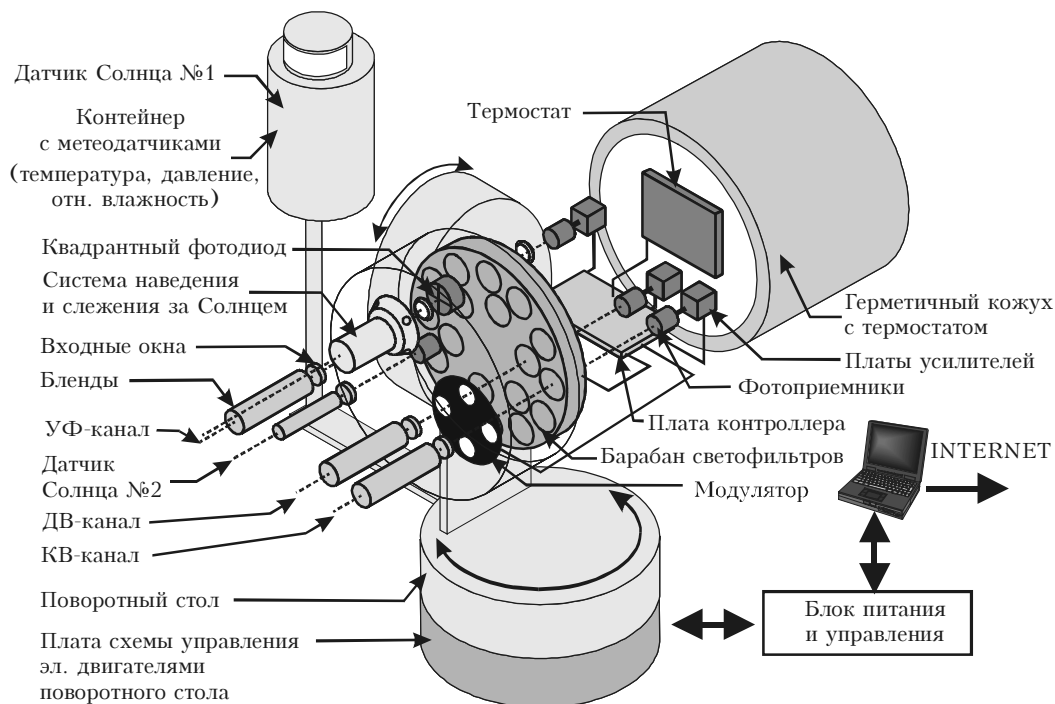


Рис. 2. Устройство солнечного фотометра

Таблица 1

Характеристика оптико-электронных каналов

Канал	Входное окно	Оптическая схема; спектральный диапазон	Фотоприемное устройство
УФ	Кварц	Кварцевая линза $f = 81$ мм; 0,3–0,4 мкм	«Солнечно-слепой» фотодиод из карбида кремния и усилитель постоянного тока
КВ	Стекло ПС-5	Поле зрения формируется входной диафрагмой; 0,4–1,1 мкм	Кремневый фотодиод ФД-24к и усилитель постоянного тока
ДВ	Кремний	Поле зрения формируется входной диафрагмой; 1,1–4,6 мкм	Модуляция оптического сигнала – пироэлектрический приемник МГ-32 – синхронное детектирование

Фотометр установлен на двухкоординатном (зенит/азимут) поворотном столе, разработанном на основе устройства наведения УН-79 (НИИ ПТ «Растр»). В систему наведения-слежения входит также блок координатных фотодатчиков (БКФ), расположенный на передней панели фотометра. В состав БКФ входят четыре фотодиода схемы грубого наведения и четырехсекторный фотодиод ФД-142 (в фокусе линзы) системы точного слежения, которые осуществляют управление электроприводами поворотного стола с помощью электронных схем разностных сигналов.

Основной частью электронной схемы фотометра (рис. 3) является плата контроллера, которая включает: 4-канальный 12-разрядный АЦП типа ADS7824P компании Texas Instruments; драйвер управления шаговым двигателем барабана с фильтрами; 8-канальный 10-разрядный АЦП, встроенный в RISC AVR-микроконтроллер ATMEGA163 (www.atmel.com) компании ATMEL, который имеет все атрибуты, присущие нормальному компьютеру (рис. 4).

Двенадцатиразрядный АЦП преобразует в цифровую форму сигналы фотоприемного устройства (ФПУ), а сигналы «диагностики», характеризующие состояние прибора и внешние условия, подаются на 10-разрядный АЦП. Микроконтроллером прибора выполняются следующие процедуры: а) синхронное детектирование модулированного сигнала ДВ-канала с накоплением; б) подача команд на включение системы наведения и «парковку» фотометра; в) диагностика пространственного положения фотометра «работа – парковка» и установки барабана фильтров в положение «0». Для управления контроллером используется последовательный интерфейс RS-232, который подключен к последовательному асинхронному приемопередатчику микроконтроллера. Скорость обмена составляет 56 Кбит/с.

Для удовлетворения требованию круглогодичной эксплуатации фотометра на открытом воздухе в его герметизированном корпусе установлен контейнер с осушителем (силикагель) и применена схема двухконтурного термостата. Основные технические характеристики разработанного прибора приведены в табл. 2.



Рис. 3. Электронная блок-схема SP-6

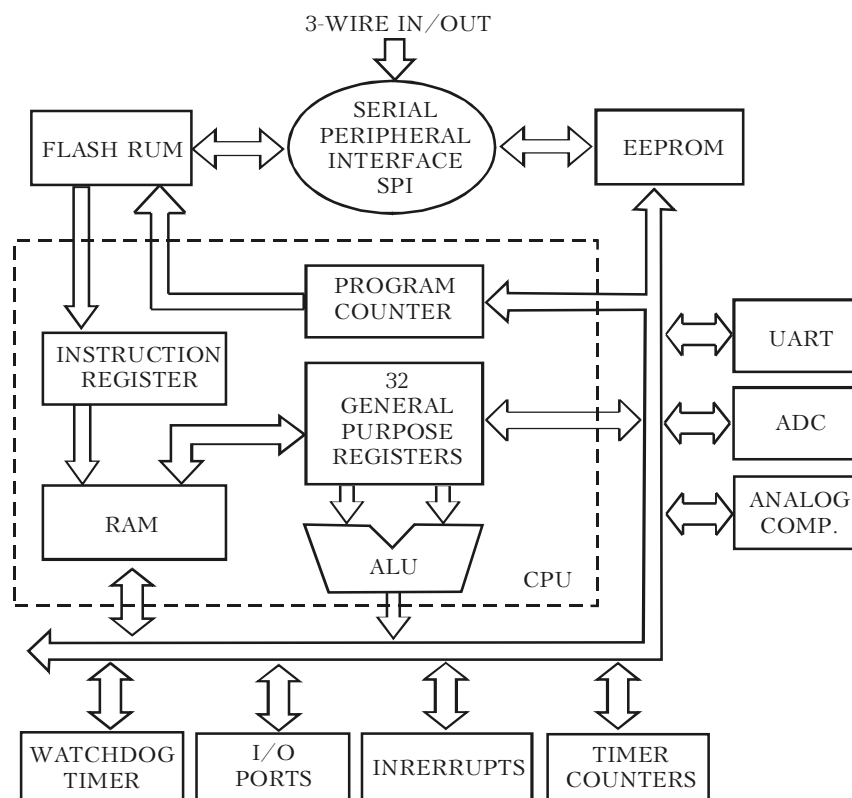


Рис. 4. Структурная схема микроконтроллера ATMEGA163. Используемые компоненты: FLASH ROM – энергонезависимая память программ; EEPROM – энергонезависимая память данных; RAM – статическая память; I/O – порты ввода/вывода; таймеры 8/16 бит; ADC – 8-канальный 10 разрядный аналого-цифровой преобразователь; WDT – сторожевой таймер; UART – асинхронный последовательный передатчик; SPI – синхронный трехпроводный последовательный интерфейс

Таблица 2

Характеристики солнечного фотометра SP-6

Характеристика	УФ-канал	КВ-канал	ДВ-канал
Угол поля зрения, град	0,9	1,4	2
Количество длин волн	5	7(8)	6
Максимумы полос пропускания фильтров, мкм	0,31; 0,32; 0,34; 0,37; 0,41	(0,41); 0,44; 0,5; 0,55; 0,67; 0,87; 0,94; 1,05	1,25; 1,55; 2,06; 2,2; 3,3; 4,0
Полуширина пропускания светофильтров, нм	5–8	5–10	15–30
Погрешность слежения за Солнцем, град	0,2		
Время измерения единичного «спектра», с	40		
Диапазон углов наведения (зенит×азимут), град	90×300		
Температура термостата, °С	(32±35) ± 0,3		
Диапазон окружающих температур, °С	–50 ÷ +35		
Электропитание (50 Гц), В · А	220 × 1		
Общая масса (оценка), кг	30		

3. Программное обеспечение и работа фотометра

Работа фотометра предусмотрена в круглосуточном, круглогодичном режиме. Основная часть операций выполняется по программе компьютера, управляющего работой встроенного в фотометр контроллера. Его системное программное обеспечение содержит комплект процедур, необходимых для обеспечения процесса измерения и предварительной обработки сигналов от ФПУ, датчиков давления, температуры, а также для управления механизмами фотометра. Для повышения надежности работы прибора в микроконтроллере установлен режим работы со «сторожевым таймером», который в случае «зависания» любой процедуры перезапускает контроллер с переводом его в терминальный режим, позволяющий управляющей программе не потерять управление контроллером. Имеется также набор сервисных процедур для самопроверки. Все программное обеспечение написано на языке Ассемблера AVR-контроллеров компании ATMEL. Общий объем программы составляет 877 строк.

Программное обеспечение для компьютера разработано в среде Builder C++ и включает две программы: «измерение» и «тестирование».

Программа «измерение» предназначена для управления фотометром в автоматическом режиме работы, записи результатов измерений в файлы и отображения данных о ходе эксперимента на экране монитора для визуального контроля. Работу программы в течение суток можно разделить на два режима:

«дежурный»: а) круглосуточно – каждый час проводится диагностика характеристик прибора и метеопараметров, состоящая в управлении опросами АЦП и занесении в файл данных F_1 ; б) в дневное время ($Z < 80^\circ$) – непрерывный опрос датчика (№ 1) Солнца, расчет его зенитного угла и принятие решения ($U_{S1} > \Delta_1$) на переход в следующий режим;

«основной»: в) по команде контроллера (при $U_{S1} > \Delta_1$) автоматическое наведение фотометра на Солнце и перевод барабана фильтров в положение «0»; г) сравнение сигналов фотодиода датчика (№ 2)

Солнца со вторым порогом ($U_{S2} > \Delta_2$) и принятие решения на начало измерений; д) программное управление шаговым двигателем, вращающим барабан с фильтрами, и измерение сигналов УФ-, КВ-, ДВ-каналов; е) занесение результатов в файл данных F_2 с привязкой к точному времени; ж) по факту «закрытого облаками Солнца» ($U_{S2} < \Delta_2$) возврат фотометра в положение «парковка».

ПРИМЕЧАНИЯ

1. При наступлении времени диагностики режим «основной» прерывается на время опроса метеодатчиков (~30 с).

2. При невыполнении п. «г» в течение заданного времени (1 мин) фотометр переводится в «парковку», а порог Δ_1 увеличивается на 5% во избежание последующих ложных включений системы наведения.

3. Для повышения эффективности работы фотометра в условиях разорванной облачности возврат в «парковку» по п. «ж» производится с задержкой на 1–2 мин.

4. Вывод данных эксперимента на экран монитора осуществляется в реальном масштабе времени и включает как результаты измерений (в графическом и цифровом виде), так и дополнительную информацию (текущая операция, выполняемая фотометром, количество и характер сбоев в работе фотометра в течение дня).

Содержание и последовательность выполнения процедур программы «измерение» поясняются на рис. 5.

Тестовая программа, предназначенная для настроя и тестирования работы отдельных блоков фотометра, позволяет смоделировать процесс измерений в пошаговом режиме.

Заметим, что вся информация о фотометре (географические координаты его расположения, коэффициенты формул расчета порогов и метеохарактеристик, последовательность расположения светофильтров в барабане и другое) заносится в ini-файл, считываемый в начале работы обеих программ. Это позволяет достаточно быстро адаптировать программы для работы с разными фотометрами.

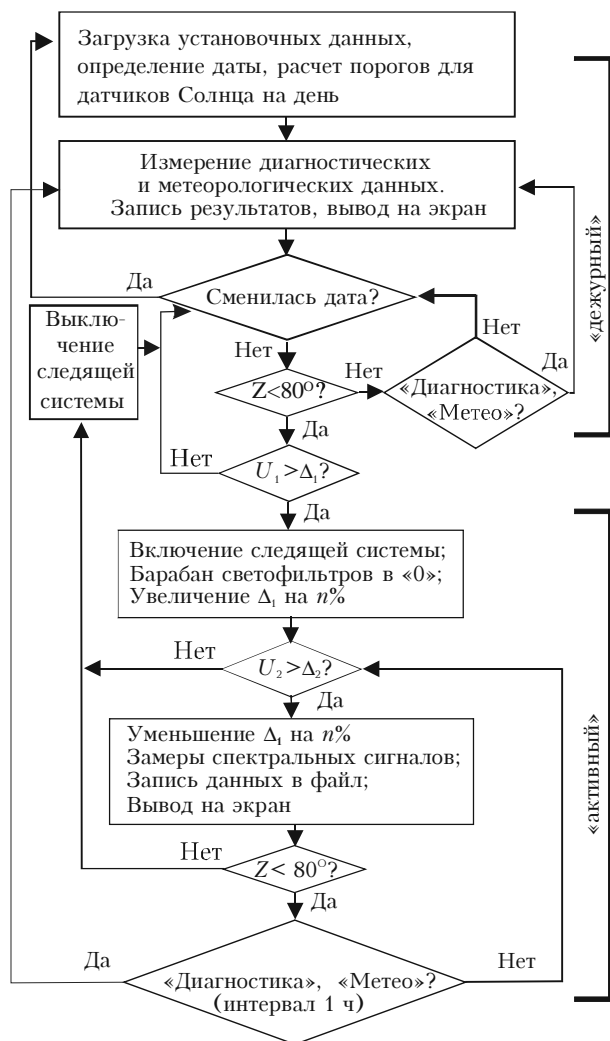


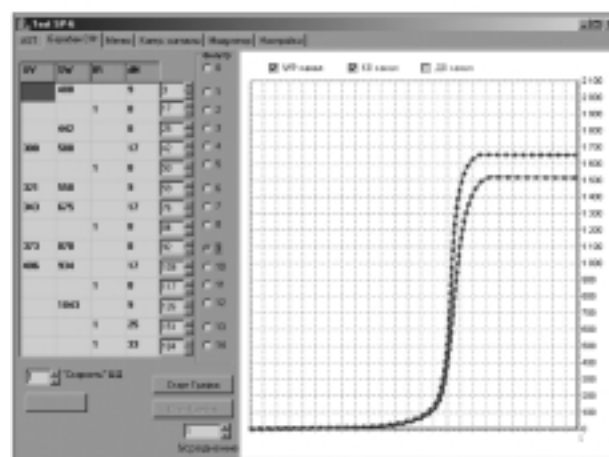
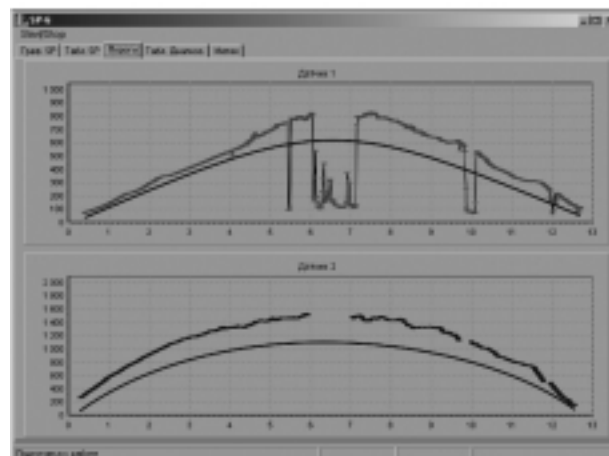
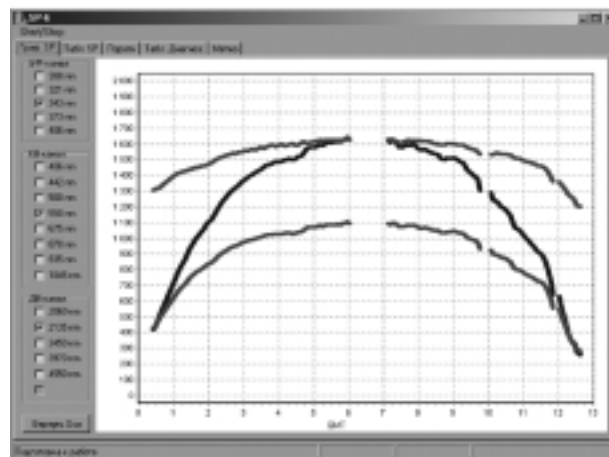
Рис. 5. Блок-схема измерительной программы

Внешний вид интерфейса пользователя программ представлен на рис. 6, а в табл. 3 приведено содержание файлов данных F_1 , F_2 .

Сравнение с фотометром CE-318, работающим в составе автоматизированной сети, показывает (табл. 4), что SP-6 имеет преимущества по следующим характеристикам: 1) более широкий спектральный диапазон; 2) определение общего содержания озона; 3) сопровождение наблюдений метеоданными; 4) лучшая защищенность от колебаний окружающей температуры; 5) исключение ложной работы в ситуациях облачности. Система AERONET, благодаря применению хорошо отработанных алгоритмов решения обратных задач [2], выигрывает по числу восстанавливаемых аэрозольных характеристик. Поэтому важной задачей следующего этапа является разработка алгоритмов обращения оптических данных — спектральных АОТ и ореольных индикатрис в альмукантарате Солнца, позволяющих проводить обработку массивов данных в автоматизированном режиме.

Работа фотометров SP-6 только совместно с компьютером может рассматриваться как недоста-

ток в сравнении с AERONET, но эта мера временная. После отработки измерительной технологии предусмотрена установка более мощного микроконтроллера с необходимой памятью и сетевым интерфейсом.



в

Рис. 6. Внешний вид интерфейса пользователя: программа «измерение» в режиме просмотра сигналов УФ-, КВ-, ДВ-каналов (а) и сигналов с датчиков Солнца (б); в — тестовая программа в режиме управления барабаном светофильтров и просмотра оптических сигналов

Характеристика файлов данных

Файл F_1															
		«Метео»			«Диагностика»										
№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9						
Характеристика	Дата, GMT	T , °C	P , мбар	RH , %	θ_1 , °C	θ_2 , °C	$U_{\text{пит}}$, В	F_{mod} , Гц	0 (1)*						
Файл F_2															
Канал		УФ-канал				КВ-канал				ДВ-канал		Датчик Солнца № 2, частота модулятора			
№ п/п	1	2	3	...	6	7	8	...	15	16	17	...	22	23	24
Характеристика	Дата, GMT	$U_{\text{шум}}$	U_{308}	...	U_{408}	$U_{\text{шум}}$	U_{408}	...	$U_{1,05}$	$U_{\text{шум}}$	$U_{1,25}$...	$U_{4,0}$	$U_{(S2)}$	F_{mod} , Гц

* 0 – парковка, 1 – работа. «Метео» и «Диагностика» приводятся в виде средних, минимальных, максимальных значений и среднеквадратических отклонений.

Таблица 4

Сравнение сетевых фотометров

Тип прибора	CE-318 (AERONET)	SP-6
Измеряемая радиация	прямая и рассеянная	прямая
Спектральный диапазон, мкм	0,34–1,02	0,3–4
Количество каналов // свето-фильтров	2//8	3//18
Определяемые характеристики	аэрозольная оптическая толщина (0,34–1 мкм); общее содержание H_2O ; микроструктура аэрозоля; альbedo однократного рассеяния	аэрозольная оптическая толщина (0,3–4 мкм); общее содержание H_2O и O_3 ; температура, давление, влажность
Защита от внешних условий	герметизация	герметизация и термостат
Средства автоматизации	микроконтроллер	микроконтроллер + PC

Работа выполняется при финансовой поддержке проектов 13.3 и 2.12 программ фундаментальных исследований Президиума РАН, приборной комиссии СО РАН, контракта с Югорским НИИ ИТ и DOE's ARM Program (контракт № 5012).

1. Кондратьев К.Я. Глобальные изменения климата: факты, предположения и перспективы разработок // Оптика атмосф. и океана. 2002. Т. 15. № 10. С. 851–866.
2. 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., Lavenu F., Jankowiak I., and Smirnov A. AERONET – A federated instrument network and data archive for aerosol characterization // Remote Sens. Environ. 1998. V. 66. N 1. P. 1–16.
3. Шаламянский А.М. Озонометрическая сеть СНГ // Метеорол. и гидрол. 1993. № 9. С. 100–104.
4. Голицин Г.С., Арефьев В.Н., Гречко Е.И., Груздев А.Н., Еланский Н.Ф., Елохов А.С., Семенов В.К.

- Газовый состав атмосферы и его изменения // Оптика атмосф. и океана. 1996. Т. 9. № 9. С. 1214–1232.
5. Кабанов Д.М., Сакерин С.М., Сутормин А.М., Турчинович С.А. Широкодиапазонный солнечный фотометр для исследования морской атмосферы // Оптика атмосф. и океана. 1993. Т. 6. № 14. С. 444–451.
 6. 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.
 7. Sakerin S.M., Kabanov D.M. Spatial inhomogeneities and the spectral behavior of atmospheric aerosol optical depth over the Atlantic Ocean // J. Atmos. Sci. 2002. V. 59. N 3. Part 1. P. 484–500.
 8. Сакерин С.М., Фирсов К.М. К вопросу о возможности определения общего содержания парниковых газов методом солнечной фотометрии при грубом спектральном разрешении: Тезисы докл. // Междунар. симп. «Атмосферная радиация» (МСАР-02). С.-Петербург, 18–21 июня 2002. С. 131.

S.M. Sakerin, D.M. Kabanov, A.P. Rostov, S.A. Turchinovich, Yu.S. Turchinovich. System for network monitoring of radiatively active atmospheric constituents. Part I. Sun photometers.

The basic principles of organization of the information and measurement system for automatic monitoring of radiatively significant atmospheric characteristics in Siberia are discussed. A sun photometer with a built-in microcontroller for measurement of atmospheric transmittance signals in the spectral region of 0.3–4 μm is described. As compared to other similar devices, this photometer has a wider spectral range and is capable of regularly measuring the meteorological parameters at the observation site and self-controlling its basic characteristics (noise, thermostat operation, and others). A brief characterization is given to the software for unattended operation of the photometer.