

## АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 535.241.6

# Автоматизированный трассовый фотометр

В.Н. Ужегов, А.П. Ростов, Ю.А. Пхалагов\*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 10.04.2013 г.

Представлено описание автоматизированного многоволнового трассового фотометра (МТФ), служащего для проведения круглосуточных измерений прозрачности приземного слоя атмосферы (общая длина оптической трассы ~1000 м) в 13 дискретных точках спектрального диапазона длин волн 0,44÷4,65 мкм. Принципиальное отличие данного фотометра от предыдущего варианта состоит в том, что все приемные модули со своими интерференционными фильтрами и оптимально подобранными приемниками оптического излучения жестко закреплены по окружности на неподвижной панели. В центре этой панели на оси шагового двигателя установлено небольшое плоское зеркало, по заданной программе последовательно направляющее проходящее излучение в соответствующий приемный модуль.

*Ключевые слова:* измеритель спектральной прозрачности атмосферы, интерференционные светофильтры, коэффициенты аэрозольного ослабления, контроллер фотометра, натурные измерения; measuring of the spectral transparency of the atmosphere, interference filters, aerosol extinction coefficients, photometer controller, field measurements.

### Введение

Известно, что среди факторов, влияющих на изменение климата Земли, важная роль отводится тропосферному аэрозолю (см. обзоры [1–3]). По имеющимся оценкам радиационное воздействие аэрозоля на климат сравнимо в глобальном масштабе с воздействием антропогенных парниковых газов, но имеет противоположный знак. Сам по себе этот факт, а также сильная изменчивость оптических характеристик атмосферного аэрозоля в пространстве и во времени подчеркивают важность реализации программ долговременных натурных исследований оптико-микрофизических параметров аэрозоля, на основе которых могут быть получены как средние межгодовые значения аэрозольных характеристик, так и их временные вариации и тренды. В свою очередь, информация о временном тренде аэрозольных характеристик в региональном масштабе позволит повысить точность прогнозов аэрозольного воздействия в имеющихся радиационных моделях (см., например, [4, 5]).

Для осуществления постоянного контроля за изменчивостью оптических характеристик атмосферного аэрозоля в Западно-Сибирском регионе в Институте оптики атмосферы СО РАН в 2011 г. был разработан и изготовлен многоволновой трассовый фотометр (МТФ). Фотометр позволяет в автоматическом режиме проводить круглосуточные измере-

ния прозрачности приземного слоя атмосферы  $T(\lambda)$  в диапазоне длин волн  $\lambda = 0,44\div 4,65$  мкм.

На рис. 1 приведена функциональная схема фотометра, включающая в себя приемопередающую оптическую систему, сформированную зеркалами  $Z_1\text{--}Z_8$ , и контроллер фотометра, выполненный на современных электронных компонентах; внизу дана структурная схема контроллера.

### Работа фотометра

Излучение лампы  $L$  модулируется с частотой несколько сотен герц с помощью модулятора  $M_1$  и шагового двигателя  $D_1$ , коллимируется объективом  $Z_1$  (внеосевая парабола,  $\varnothing = 250$  мм) и расходящимся пучком направляется на атмосферную трассу длиной ~500 м. На противоположном конце трассы установлен зеркальный катафот  $Z_2\text{--}Z_3$ , с диаметром главного сферического зеркала 500 мм и фокусным расстоянием 1500 мм. Зеркало  $Z_2$  постоянно подогревается, что предохраняет его от запотевания при резких падениях температуры воздуха. Катафот перехватывает примерно 1/20 часть проходящего пучка и направляет ее строго в обратном направлении. Прошедшее через слой атмосферы оптическое излучение перехватывается приемным зеркальным объективом  $Z_4\text{--}Z_5$  (система Кассегрена) и с помощью системы зеркал  $Z_6\text{--}Z_8$  подается на один из 13 приемных модулей. Каждый модуль включает в себя интерференционный фильтр (ИФ) и фотоприемник (ФП), оптимально подобранные для данной длины волны  $\lambda$ . Характеристики интерференционных светофильтров, используемых в настоящее время в фотометре, приведены в таблице.

\* Виктор Николаевич Ужегов (uzhegov@iao.ru); Андрей Петрович Ростов (rostov@iao.ru); Юрий Александрович Пхалагов (pkhalagov@iao.ru).

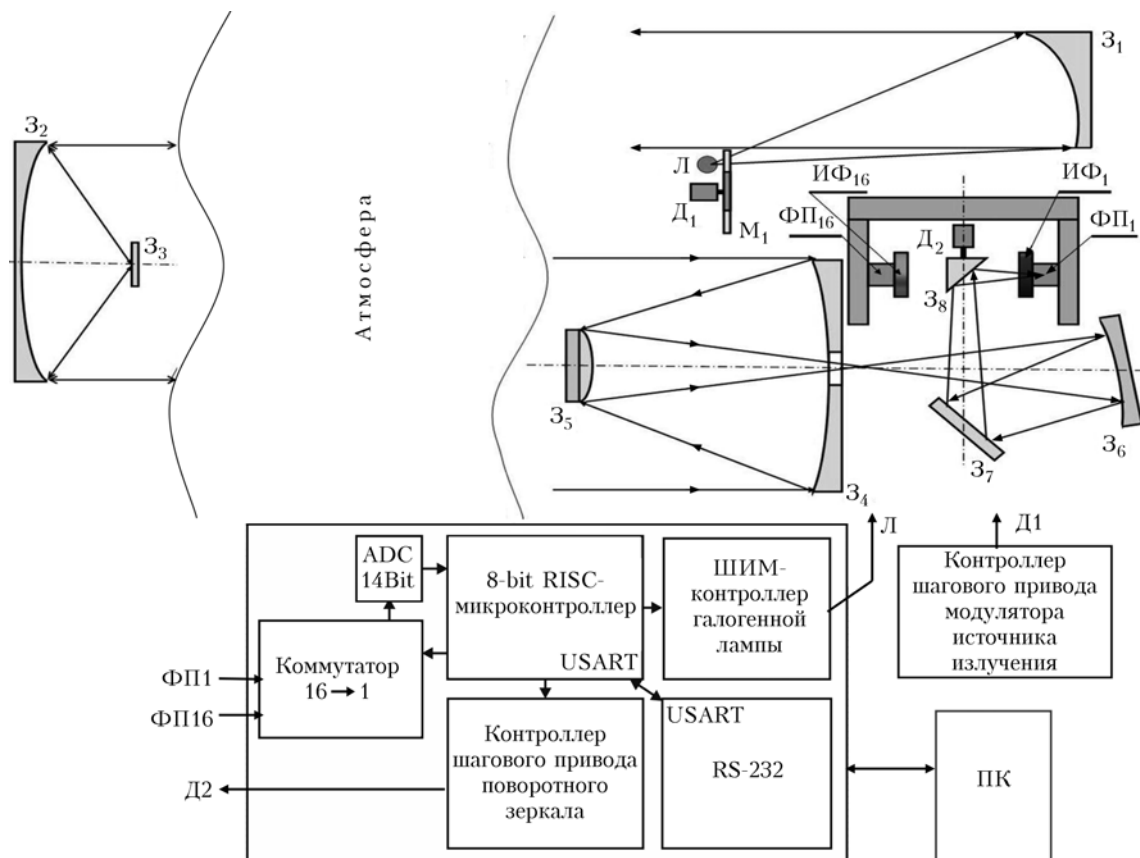


Рис. 1. Функциональная схема фотометра: Л – источник излучения – галогенная лампа; З<sub>1</sub> – передающее внеосевое параболическое зеркало (Ø = 250 мм), З<sub>2</sub>–З<sub>3</sub> – зеркальный катафот, расположенный на противоположном конце трассы; Д<sub>1</sub> и Д<sub>2</sub> – шаговые двигатели; М<sub>1</sub> – модулятор светового потока; З<sub>4</sub>–З<sub>6</sub> – зеркала, составляющие приемную оптическую систему; ИФ1–ИФ16 – интерференционные светофильтры на 16 каналов, ФП1–ФП16 – соответствующие фотоприемники излучения на 16 каналов. Две параллельные кривые условно означают слой атмосферы (L ~ 500 м) между приемо-передающим блоком фотометра и катафотом

#### Характеристики интерференционных светофильтров

№ фильтра	λ, мкм	Δλ, мкм	№ фильтра	λ, мкм	Δλ, мкм
1	0,441	0,01	8	1,063	0,01
2	0,501	0,004	9	1,24	0,01
3	0,551	0,008	10	1,60	0,01
4	0,633	0,015	11	2,14	0,02
5	0,690	0,015	12	3,98	0,02
6	0,854	0,01	13	4,65	0,054
7	0,943	0,016	–	–	–

В качестве приемников оптического излучения в приемных модулях используются кремниевые фотодиоды (на область длин волн 0,44–1,06 мкм), фоторезисторы PbS (на область 1,06–2,14 мкм) и фоторезистор PbSe (на область 3,98–4,65 мкм). Датчики на основе сульфида свинца имеют постоянную времени около 3–5 мкс, что в 10–100 раз меньше известных отечественных. Применение таких фотоприемников позволило увеличить частоту модуляции источника излучения с 10 Гц в предыдущем варианте прибора [6] до нескольких сотен Гц. Это дало возможность уменьшить случайную погрешность измерения прозрачности атмосферы.

Принципиальное отличие данного фотометра от варианта [6] состоит в том, что все приемные модули со своими интерференционными фильтрами

и оптимально подобранными приемниками оптического излучения жестко закреплены по окружности на вертикально расположенной неподвижной панели, в центре которой на оси шагового двигателя Д<sub>2</sub> установлено небольшое плоское зеркало З<sub>8</sub>, последовательно направляющее приходящее излучение в соответствующий приемный модуль.

Такое конструктивное решение оптической схемы фотометра позволило полностью устранить проблему инерционности при смене фильтров, неизбежно возникающую в [6] при остановке и запуске массивного барабана с интерференционными светофильтрами. Общий вид приемно-регистрирующего блока фотометра с приемными модулями приведен на рис. 2.

Отметим также, что в данной конструкции расстояние между оптическими осями передающей и приемной оптики составляет не более 70 см, что позволяет разместить приемопередающую систему фотометра в отапливаемом помещении с выходом в атмосферу через ограниченные диафрагмы в оконном проеме. При измерениях в зимний период эти диафрагмы затягиваются лавсановой пленкой, которая пропускает более 80% излучения в области длин волн, приведенных в таблице. Это делает данный измеритель практически всепогодным.

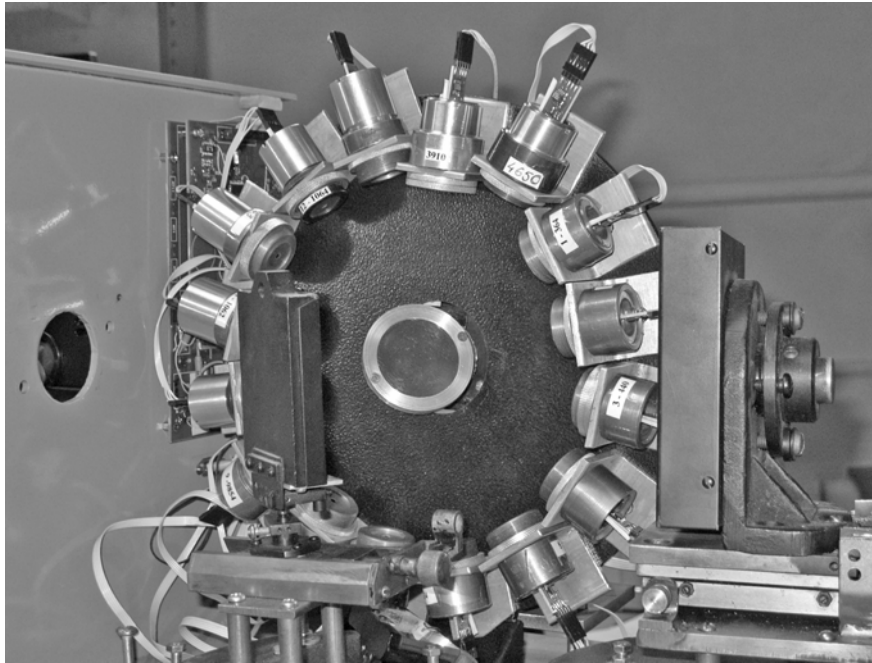


Рис. 2. Приемо-регистрационный блок фотометра МТФ

## Контроллер фотометра

Для проведения непрерывных измерений пропускания атмосферы с помощью данного фотометра в автоматическом режиме (без привлечения оператора) был разработан и изготовлен контроллер фотометра, выполненный на современных электронных компонентах. Структурная схема контроллера совмещена с оптической схемой фотометра (см. рис. 1).

В состав контроллера входят 7 основных блоков:

- микроконтроллер RISC архитектуры ATmega-128 компании ATMEL;
- контроллер оптического модулятора;
- ШИМ-контроллер галогенной лампы;
- контроллер привода сканирующего зеркала  $Z_8$ ;
- 16-канальный коммутатор с 14-битовым АЦП AD7894;
- RS-232 интерфейс для связи с компьютером;
- блок питания прибора.

Основные функции контроллера состоят в последовательном измерении уровней оптических сигналов от фотоприемников методом синхронного детектирования и в управлении оптико-механическим трактом прибора. Для усиления принимаемых сигналов применены двухкаскадные усилители переменного тока, изготовленные на основе высококачественных малошумящих операционных усилителей (ОУ) компании Analog Devices. Полоса пропускания усилителей находится в диапазоне от 100 до 10000 Гц. Таким образом, убираются постоянная составляющая сигнала фотоприемников, вызванная паразитной «засветкой», и высокочастотный квантовый шум самих фотоприемников.

Переключение каналов ведется электромеханическим способом. Электрические входные сигналы

переключаются 16-канальным коммутатором, а оптические – с помощью сканирующего зеркала  $Z_8$ , установленного на шпиндель шагового двигателя. Он управляется специальным контроллером в микрошаговом режиме.

Для плавного включения галогенной лампы применен метод ограничения ее тока. Реализован он с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ) напряжения питания лампы. Для управления силовым ключом модулятора используется ШИМ-контроллер. Это существенно увеличивает ресурс работы лампы и позволяет использовать для ее питания компактный источник питания от персонального компьютера (ПК).

Все встроенное программное обеспечение микроконтроллера написано на языке ассемблера, а программное обеспечение со стороны ПК – в среде LabView.

Графический интерфейс пользователя, представленный на рис. 3, позволяет оперативно выбирать параметры, каналы и периодичность непрерывных измерений.

## Методика измерений

При измерениях спектрального пропускания атмосферы на протяженной приземной трассе с помощью данного фотометра при отсутствии короткой калибровочной трассы возникает проблема с нахождением абсолютных значений коэффициентов общего ослабления излучения  $\varepsilon(\lambda) = -\ln[T(\lambda)]/L_1$ , которые представляют собой сумму коэффициентов молекулярного рассеяния  $\sigma_p(\lambda)$ , аэрозольного ослабления  $\beta(\lambda)$ , непрерывного поглощения паров воды  $k_{р.п.}$  и селективного поглощения малых газовых компонентов и паров воды  $k_{с.п.}$

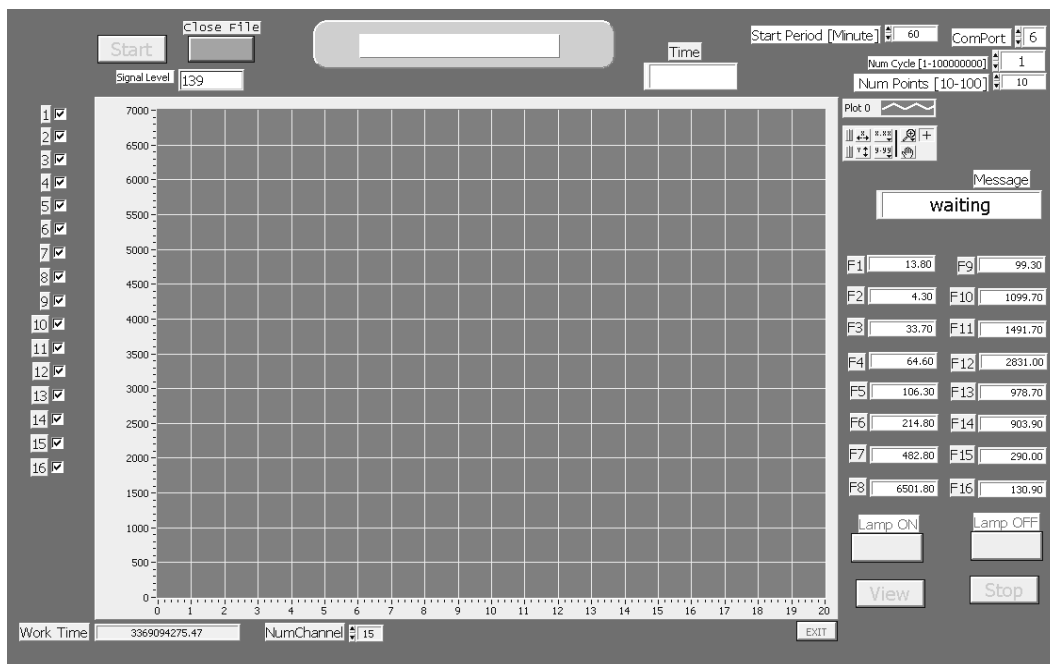


Рис. 3. Графический интерфейс пользователя

Ниже предлагается модифицированный алгоритм обработки полученных массивов сигналов, решающий эту проблему. Алгоритм включает в себя несколько этапов:

а) формируется подмассив сигналов, соответствующих наиболее чистым («безаэрозольным») атмосферным условиям, из которого методом экстраполяции определяются «нулевые» (не ослабленные атмосферой) сигналы для тех участков спектра, где отсутствует поглощение парами воды;

б) с использованием временной изменчивости коэффициента аэрозольного светорассеяния, измеренного с помощью нефелометра ФАН [7], проводится корректировка возможного временного тренда измеряемых сигналов, вызванного нестабильностью приемопередающего тракта фотометра;

в) строится уравнение многопараметрической регрессии, независимым параметром которого выступают коэффициенты  $\beta_{ex}(\lambda)$ , а предикторами служат параметры  $\sigma_p(\lambda)$ ,  $k_{к.п.}$  и  $k_{с.п.}$  [8]. Находится статистическое решение уравнения относительно коэффициентов регрессии;

г) рассчитывается массив спектральных коэффициентов невязки, представляющих собой разность между коэффициентами общего ослабления, полученными в результате измерений и рассчитанными из уравнения регрессии. Для всех реализаций проводится нелинейное сглаживание погрешностей с учетом величины коэффициентов невязки;

д) повторяются операции пп. «б» и «г». Результатом обработки являются массивы коэффициентов общего ослабления излучения, суммарного аэрозольного ослабления, аэрозольного ослабления, обусловленного субмикронными и грубодисперсными частицами, а также массив коэффициентов поглощения парами воды.

е) для аэрозольной компоненты ослабления  $\beta(\lambda)$  проводится дополнительная статистическая корректировка спектрального хода коэффициентов аэрозольного ослабления методом последовательного (от одной длины волны к соседним) расчета коэффициентов однопараметрической регрессии [9, 10].

На рис. 4. показан временной ход коэффициента аэрозольного ослабления, обусловленного субмикронными частицами  $\Delta\beta = \beta(0,55) - \beta(2,14)$  и измеренного на протяженной приземной трассе МТФ, и коэффициента направленного светорассеяния  $\beta_{sc45^\circ}$ , измеренного в локальном объеме нефелометром ФАН.

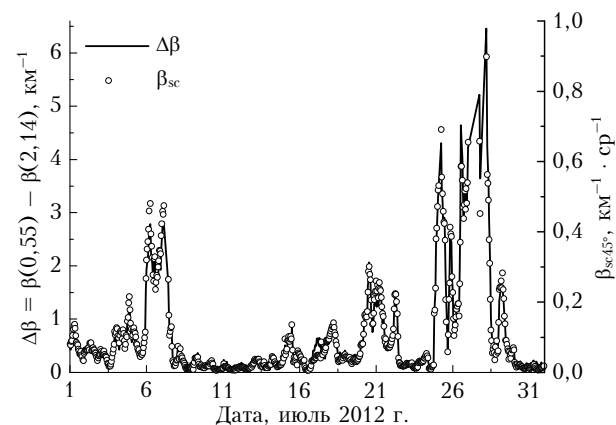


Рис. 4. Временной ход коэффициента аэрозольного ослабления  $\Delta\beta$  и коэффициента направленного светорассеяния  $\beta_{sc45^\circ}$ . Данные приведены с 24-часовым усреднением

Измерения проводились синхронно с 1 по 31 июля 2012 г. в условиях сильного задымления атмосферы дымами лесных пожаров. Очень хорошее соответствие временного хода этих двух параметров

свидетельствует о том, что разработанный фотометр можно применять для длительных натурных измерений прозрачности приземного слоя атмосферы на протяженных трассах в автоматическом режиме.

### Заключение

Итак, представленный нами фотометр, позволяющий в автоматическом режиме получать непрерывные ряды спектральных коэффициентов аэрозольного ослабления  $\beta(\lambda)$  в приземном слое атмосферы, может быть использован для решения широкого круга задач атмосферной оптики. Сюда, в частности, относится задача по выявлению долгосрочных трендов коэффициентов  $\beta(\lambda)$ , что может быть использовано для уточнения прогнозов аэрозольного воздействия в имеющихся радиационных моделях (см., например, [4, 5]).

Синхронные измерения коэффициентов  $\beta(\lambda)$  в приземном слое и аэрозольной оптической толщи  $\tau(\lambda)$  по всему слою атмосферы позволяют получить оценку высоты однородной аэрозольной атмосферы  $H_0(\lambda) = \tau(\lambda)/\beta(\lambda)$ , которая характеризует высоту слоя перемешивания для частиц разных размеров при различных типах замутнений [11, 12]. Измерения высоты однородной атмосферы  $H_0(\lambda)$  в условиях аэрозольных возмущений стратосферы в период вулканической активности могли бы дополнить лидарные данные о поступлении в стратосферу региона вулканического аэрозоля [13]. К числу важных применений фотометра относится проведение одновременных измерений коэффициентов  $\beta(\lambda)$  и напряженности атмосферного электрического поля  $E$ , позволяющих исследовать взаимосвязь оптических и электрических характеристик приземной атмосферы [14] и выявить влияние аэрозоля на величину  $E$  в разные сезоны года [15, 16].

1. Кондратьев К.Я. Аэрозоль как климатообразующий компонент атмосферы. Прямое и косвенное воздействие на климат // Оптика атмосф. и океана. 2002. Т. 15, № 4. С. 301–320.
2. Кондратьев К.Я. Радиационное возмущающее воздействие, обусловленное аэрозолем // Оптика атмосф. и океана. 2003. Т. 16, № 1. С. 5–18.
3. Ивлев Л.С. Аэрозольное воздействие на климатические процессы // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 5. С. 392–410.
4. Yu Hongbin, Liu S.C., Dickinson R.E. Radiative effects of aerosols on the evolution of the atmospheric boundary layer // J. Geophys. Res. 2002. V. 107, N 12. P. AAC3/1–AAC3/14.

5. 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.
6. Пхалагов Ю.А., Ужegov В.Н., Щелканов Н.Н. Автоматизированный многоволновой измеритель спектральной прозрачности атмосферы // Оптика атмосф. и океана. 1992. Т. 5, № 6. С. 667–671.
7. Панченко М.В., Козлов В.С., Польшкин В.В., Тертугова С.А., Тумаков А.Г., Шмаргунов В.П. Восстановление оптических характеристик тропосферного аэрозоля Западной Сибири на основе обобщенной эмпирической модели, учитывающей поглощающие и гигроскопические свойства частиц // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 1. С. 46–54.
8. Пхалагов Ю.А., Ужegov В.Н. Статистический метод разделения коэффициентов общего ослабления ИК радиации на компоненты // Оптика атмосф. и океана. 1988. Т. 1, № 10. С. 3–11.
9. Щелканов Н.Н. Методы коррекции аэрозольной оптической толщи атмосферы на горизонтальных и наклонных трассах // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18, № 11. С. 1020–1023.
10. Щелканов Н.Н. Методы вычисления случайных погрешностей параметров окружающей среды из экспериментальных данных // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 9. С. 815–821.
11. Ужegov В.Н., Пхалагов Ю.А., Кабанов Д.М., Сакерин С.М., Панченко М.В. Исследования высоты однородной аэрозольной атмосферы в видимой и инфракрасной областях спектра // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18, № 5–6. С. 410–415.
12. Ужegov В.Н., Пхалагов Ю.А., Кабанов Д.М., Сакерин С.М. Грубодисперсный аэрозоль и его роль в формировании высоты однородной аэрозольной атмосферы // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 12. С. 1023–1027.
13. Бурлаков В.Д., Долгий С.И., Невзоров А.В. Лидарные наблюдения аэрозольных возмущений стратосферы над Томском в период вулканической активности 2006–2010 гг. // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 12. С. 1031–1040.
14. Пхалагов Ю.А., Ужegov В.Н., Ипполитов И.И., Винарский М.В. Исследования взаимосвязей оптических и электрических характеристик приземной атмосферы // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18, № 5–6. С. 416–420.
15. Пхалагов Ю.А., Ипполитов И.И., Нагорский П.М., Одинов С.Л., Панченко М.В., Смирнов С.В., Ужegov В.Н. Связь аномальных атмосферных условий с изменчивостью электрического поля // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 1. С. 25–30.
16. Пхалагов Ю.А., Ужegov В.Н., Польшкин В.В., Козлов В.С., Ипполитов И.И., Нагорский П.М. Исследования изменчивости и взаимосвязи оптических и электрических характеристик приземной атмосферы в зимних условиях // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 6. С. 269–274.

V.N. Uzhegov, A.P. Rostov, Yu.A. Pkhalagov. Automated path photometer.

The description of an automated multi-wavelength path photometer, which serves for the convenience of transparency measurements of the atmospheric surface layer (the total length of optical path is 1000 meters) at 13 discrete points of the wavelength range  $0.45\div 4.6 \mu\text{m}$ . The fundamental difference of the photometer from the previous version is that all receiving modules with their interference filters and optimally matched optical radiation detectors are rigidly fixed in a circle on the fixed panel. At the center of this panel on the axis of a step motor, a small flat mirror is fastened, directing the incoming radiation to the appropriate collecting module according to the program.