УДК 535; 551.510
ББК 22.3

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ ТОЛЩИ АЭРОЗОЛЯ ИЗ НАЗЕМНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ СОЛНЕЧНЫМ ФОТОМЕТРОМ SPM [1]

Фирсов Константин Михайлович

Доктор физико-математических наук,
профессор кафедры лазерной физики,
директор физико-технического института
Волгоградского государственного университета
fkm.volsu@mail.ru
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

Бобров Евгений Владимирович

Программист издательства Волгоградского государственного университета
bobrov-volsu@mail.ru
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

Аннотация. Проведены измерения аэрозольной оптической толщи (АОТ) мобильным фотометром SPM. Описана методика восстановления АОТ. Приводится сопоставление результатов измерений АОТ, полученных данным фотометром с данными измерений фотометром CE 318 сети AERONET.

Ключевые слова: аэрозоль, аэрозольная оптическая толща, перенос радиации, молекулярное рассеяние, поглощение.

© Фирсов К.М., Бобров Е.В., 2014

Введение

В настоящее время солнечная фотометрия является одним из основных методов дистанционного зондирования газового и аэрозольного состава атмосферы и подразделяется на спутниковые и наземные системы. Достоинством спутниковых систем является широта охвата, позволяющая описывать поля распределения оптических характеристик атмосферы и подстилающей поверхности Земли (например, радиометры MODIS на спутниках TERRA и AQUA). Однако неопределенность в отражательной способности поверхности над территорией суши приводит к тому, что аэрозольная оптическая толща измеряется в ограниченном спектральном интервале, и как следствие, восстановление дисперсного состава аэрозоля представляет значительную проблему. Для уточнения аэрозольных моделей, используемых для восстановления характери-

стик аэрозоля из спутниковых данных, создана сеть наземных фотометрических наблюдений AERONET (AErosol RObotic NETwork, http://aeronet.gsfc.nasa.gov). В настоящее время сеть AERONET включает около 300 солнечных фотометров Sun-Sky, радиометры CE 318, установленные в различных точках земного шара, в том числе и в России (8 приборов), которые главным образом расположены в Западной Сибири [4]. Данные фотометры позволяют проводить измерения характеристик аэрозоля существенно в более широком спектральном диапазоне в сравнении со спутниковыми наблюдениями. Именно это и явилось основой для построения аэрозольных региональных моделей для спутниковой обработки данных [9]. Солнечный фотометр CE 318 проводит измерения в спектральном диапазоне 340–1 020 нм.

Для проведения измерений АОТ в регионе Нижнего Поволжья нами используется фотометр SPM, разработанный в ИОА СО РАН, который регистрирует и записывает сигналы, приходящие от Солнца при безоблачном небе в 10 спектральных каналах 339, 373, 439, 499, 673, 871, 939, 1 044, 1 555 и 2 139 нм. Детальное описание данного фотометра и методики восстановления АОТ детально описаны в монографии [4]. SPM имеет преимущество по спектральному диапазону и числу измерительных каналов (фильтров). Фотометр SPM собран на современной элементной базе, оптико-электронная схема фотометра аналогична стационарному фотометру SP-9, который проводит измерения в рутинном режиме. Фотометр SPM имеет встроенное программное обеспечение, интерфейс с компьютером и обеспечен ПО, которое позволяет восстанавливать АОТ и общее влагосодержание. Следует отметить, что каждый фотометр SPM является уникальным, в том смысле, что характеризуется своим набором спектральных каналов и некоторыми конструктивными особенностями. Поэтому методики восстановления АОТ индивидуальны для каждого фотометра, и в процессе эксплуатации для каждого фотометра могут проявляться свои особенности. В связи с этим сопоставление результатов измерений АОТ, полученных данным фотометром, с данными измерений фотометром CE 318 сети AERONET представляет значительный интерес. С этой целью в июле 2013 г. была проведена интеркалибровка данных фотометров и в статье описываются полученные результаты.

1. Методика восстановления аэрозольной оптической толщи из измерений солнечным фотометром SPM

Фотометр регистрирует прямое излучение от Солнца, проходящее через атмосферу Земли, и для того чтобы измерить аэрозольное рассеяние, необходимо из сигнала исключить молекулярное рассеяние и поглощение. Регистрируемое фотометром солнечное излучение в i-м канале (сигнал фотометра) определяется формулой:

$$S_i(\lambda,\theta) = \int_{\Delta\lambda} I_o(\lambda)\eta_1(\lambda)\eta_2(\lambda)T_i(\lambda)T(\lambda,\theta)d\lambda \quad , \qquad (1)$$

где $I_{0(}\lambda)$ – солнечная постоянная (интенсивность излучения на верхней границе земной атмосферы на длине волны λ); θ – зенитный угол склонения Солнца; $\eta_1(\lambda)$ – потери в тракте приемной системы; $\eta_1(\lambda)$ – спектральная чувствительность фотоприемника; $T_i(\lambda)$ – пропускание интерференционного светофильтра i-го канала; T – спектральное пропускание атмосферы. В формуле (1) учитывается только прямое излучение от солнца, ослабленное атмосферой, а рассеянное излучение не учитывается. Это обусловлено тем, что угол зрения фотометра мал (около 2^o) и аэрозольная оптическая толща невелика. Введем нормированную на единицу аппаратную функцию для i-го канала в виде:

$$f_i(\lambda) = \eta_1(\lambda)\eta_2(\lambda)T_i(\lambda)I_o(\lambda) \Big/ \int_{\Delta\lambda} \eta_1(\lambda)\eta_2(\lambda)T_i(\lambda)I_o(\lambda)d\lambda \quad , \tag{2}$$

где пределы интегрирования определяются спектральной шириной интерференционного фильтра. С учетом (2), формулу (1) можно переписать в виде:

$$S_i(\lambda,\theta) = C\int_{\Delta\lambda} f_i(\lambda)T(\lambda,\theta)d\lambda \quad , \tag{3}$$

где C – некоторая константа, которую нужно будет определять при калибровке фотометра (далее – константа калибровки).

Спектральная функция пропускания определяется выражением:

$$T(\lambda,\theta) = \exp\left\{-\int_o^{z_a} B(h,\varphi)\cdot\alpha(\lambda,h)dh\right\}, \tag{4}$$

где $\alpha(\lambda,h)$ – объемный коэффициент ослабления; z_a – верхняя граница атмосферы.

В выражении (4) $B(h,\ \theta)$ – функция трассы, имеющая вид:

$$B(h,\theta) = \frac{(h+R)\cdot n(h)}{\sqrt{(h+R)^2\cdot n(h)^2 + R^2 n^2(o)\sin^2(\theta)}} \quad , \tag{5}$$

где R – радиус Земли; $n(h)$ – показатель преломления на высоте h; z_a – верхняя граница атмосферы. При зенитных углах меньше 70^o можно не учитывать кривизну Земли, и тогда формула (5) принимает простой вид: $B(h,\theta) = 1/\cos\theta$.

Объемный коэффициент ослабления можно представить в виде:

$$\alpha = \alpha_a + \alpha_R + \alpha_m \quad ,$$

где α_a, α_R, α_m – объемные коэффициенты аэрозольного ослабления, молекулярного рассеяния и поглощения соответственно. С учетом этого, функцию пропускания можно представить в виде:

$$T(\lambda,\theta) = \exp\left\{-\left(m_a(\theta)\tau_a(\lambda) + m_R(\theta)\tau_R(\lambda) + m_m(\theta)\tau_m(\lambda)\right)\right\}, \tag{6}$$

$$\tau = \int_0^{z_a} \alpha(h)dh$$

где τ – оптическая толща вертикального столба атмосферы; m – оптическая масса, которая при малых углах $m = 1/\cos\theta$. При больших углах оптическая масса будет различаться для всех рассматриваемых компонент, так как вертикальные профили объемных коэффициентов α_a, α_R, α_m различаются. Более того, при расчете функций пропускания, обусловленных молекулярным поглощением, оптическая масса будет различаться и для разных газов.

Спектральная ширина интерференционных фильтров мала и можно полагать, что в пределах $\Delta\lambda$ оптическая толща аэрозольного ослабления и молекулярного рассеяния не претерпевают заметных изменений, и под знаком интеграла в формуле (3) остается только пропускание, обусловленное молекулярным поглощением:

$$S_i(\lambda,\theta) = C\exp(m_a(\theta)\tau_a(\lambda) + m_R(\theta)\tau_R(\lambda))\int_{\Delta\lambda} f_i(\lambda)\exp(-m_m(\theta)\tau_m(\lambda))d\lambda \quad . \tag{7}$$

Функцию пропускания, обусловленную молекулярным поглощением для отдельного газа, зачастую аппроксимируют выражением:

$$T_m(\lambda) = \exp(-k(\lambda) \cdot (m_m \cdot W)^n), \quad (8)$$

где $k(\lambda)$ и n – параметры.

Методика расчета пропускания, обусловленного молекулярным поглощением, описана в наших работах [6; 7]. Здесь отметим лишь тот факт, что формула (8) следует из модельного описания колебательно-вращательных полос поглощения [3] и является приближенной. В нашей работе [5] показано, что данная параметрическая формула не всегда дает удовлетворительную точность. В частности, для полосы 0,94 мкм H_2O более предпочтительной является полиномиальная аппроксимация. Для расчета функции пропускания в случае перекрывания полос поглощения нескольких газов достаточно хорошим приближением является правило произведения [3]. Оптическая толща молекулярного рассеяния при обработки данных фотометрирования, как правило, оценивается на основе аппроксимации, предложенной в работе [8]:

$$\tau_R(\lambda) = 0.008569\lambda^{-4}/(1 + 0.0113\lambda^{-2} + 0.00013\lambda^{-4})\, p / p_0, \quad (9)$$

где p_0 – стандартное давление атмосферы, равное 1 013,25 мбар; p – реальное давление воздуха.

На рисунке 1 приведены типичные значения оптических толщ для региона Нижнего Поволжья. Оптическая толща аэрозольного рассеяния взята из данных натурных измерений, оптическая толща молекулярного рассеяния рассчитана по формуле (9). Молекулярное поглощение рассчитывалось прямым методом line-byline на основе спектроскопической базы данных HITRAN (версия 2008 г.). Сплошной линией на рисунке 1 приведен суммарный спектр поглощения всех газов, а пунктирной – спектр поглощения озона.

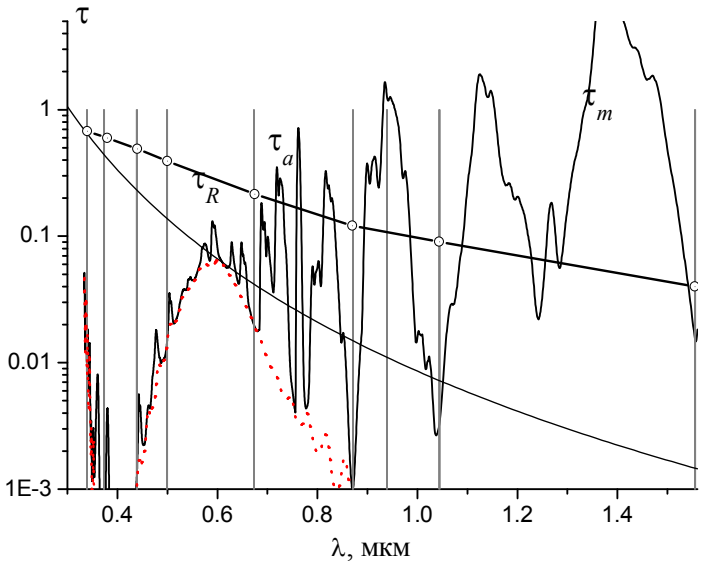


Рис. 1. Спектральные зависимости оптических толщ для типичных условий Нижнего Поволжья

В коротковолновой части спектра аэрозольное и молекулярное рассеяние сопоставимы. Тем не менее формула (9) при учете приземного давления позволяет достаточно точно исключить молекулярное рассеяние. С молекулярным поглощением дело обстоит сложнее, так как эта компонента атмосферы может достаточно сильно меняться. Основными поглощающими газами

в рассматриваемом диапазоне спектра являются водяной пар, озон и равномерно перемешанные по высоте газы, к которым относится кислород, углекислый газ и ряд других. Наиболее изменчивыми являются водяной пар и озон, и для корректного восстановления АОТ в некоторых спектральных каналах необходимо учитывать их содержание в атмосфере. При обработке данных измерений фотометром SPM поглощение озона учитывалось на основе модельных значений общего содержания озона в вертикальном столбе атмосферы [2]. Сопоставление модельных оценок общего содержания озона с данными спутникового зондирования (http://ozoneaq.gsfc.nasa.gov/ measurements.md) для периода времени, когда проводилась интеркалибровка фотометров, показало, что отличия не превышали 10 %, то есть погрешность расчета оптической толщи озона не превышает 10 %. Как следует из рисунка 1, оптическая толща озона, по крайней мере, на порядок меньше оптической толщи аэрозоля, поэтому даже без учета спутниковых данных удается корректно исключить поглощение озоном. Для измерения общего влагосодержания в вертикальном столбе атмосферы Земли в фотометре SPM имеется канал с длиной волны 0,939 мкм, который настроен на полосу поглощения паров воды.

2. Калибровка фотометра

Прежде всего фотометр тестировался на наличие погрешностей в каждом из измерительных каналов, которые обусловлены главным образом ошибками оператора при наведении на Солнце. Для этого в течение 30 минут было проведено около 60 единичных измерений в условиях антициклона и чистой и безоблачной атмосферы. Каждое единичное измерение проводилось в течение 20–30 секунд. При расчете среднеквадратических погрешностей измерений АОТ для каждого канала исключались тренды, которые были обусловлены некоторой изменчивостью атмосферы. В таблице 1 приведены средние значения АОТ и ее среднеквадратические отклонения.

Таблица 1

Средние и среднеквадратические отклонения АОТ для 30-минутной серии

Длина волны, мкм	Среднее значение АОТ	СКО АОТ (относительная величина, %)
0,339	0,315	0,007 (2)
0,373	0,262	0,003 (1)
0,439	0,184	0,010 (5)
0,499	0,175	0,030 (17)
0,673	0,101	0,002 (2)
0,871	0,091	0,011 (12)
0,1044	0,045	0,011 (24)
0,1555	0,033	0,006 (18)
0,2139	0,022	0,008 (36)

Практически во всех спектральных каналах (за исключением 499 нм) среднеквадратические отклонения измеренных значений АОТ составляли величину, меньшую 0,01. Для спектрального канала с центром 0,499 мкм среднеквадратическое отклонение АОТ составило величину, равную 0,03. Наблюдаемый разброс на этой длине волны определяется погрешностями измерения, которые превосходят паспортные данные фотометра SPM. Поэтому необходимо будет провести дополнительное тестирование фотометра в ИОА СО РАН.

В июле 2013 г. в Коуровской обсерватории УрФУ (г. Екатеринбург) были проведены одновременно замеры АОТ и общего влагосодержания в вертикальном столбе атмосферы фото-

метрами SPM и CE 318 (CIMEL) сети AERONET. По результатам трех дней измерения были уточнены константы калибровки. После этого были рассчитаны средние значений АОТ и их среднеквадратические отклонения за период наблюдений в Коуровской обсерватории. Результаты сопоставления АОТ по данным измерений двумя фотометрами приведены на рисунке 2.

В качестве дополнительного теста качества калибровки строились зависимости АОТ от времени наблюдения для каждого канала фотометра SPM (рис. 3). Причем в этом случае использовался весь массив наблюдений за 2013 год. Отсутствие тренда при минимальных значениях АОТ являлось дополнительной гарантией правильно подобранных констант градуировки.

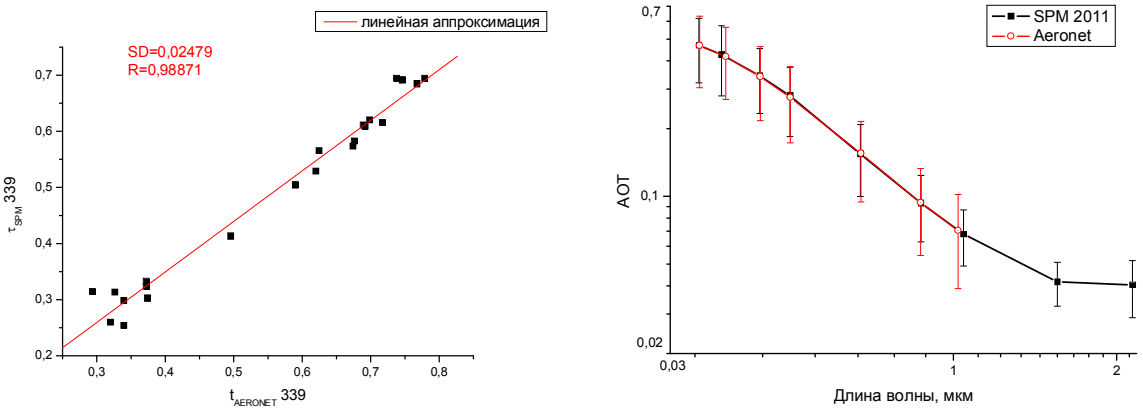


Рис. 2. Сопоставление АОТ, восстановленных из данных измерений фотометрами SPM и CE 318 сети AERONET за период наблюдений в Коуровской обсерватории

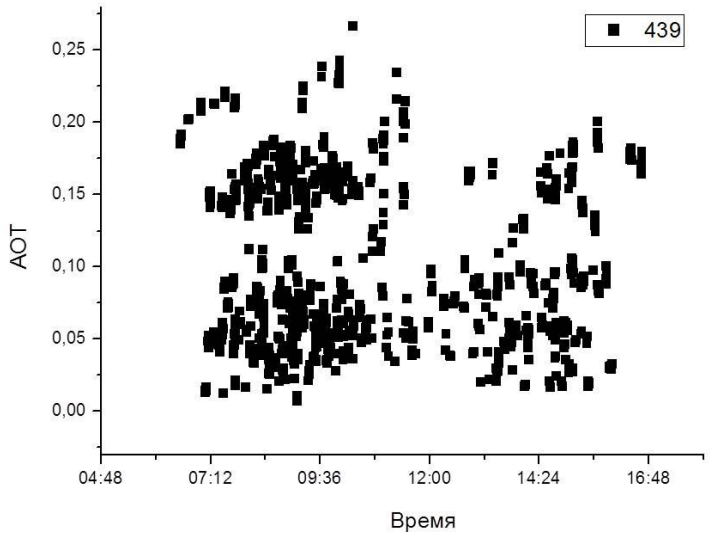
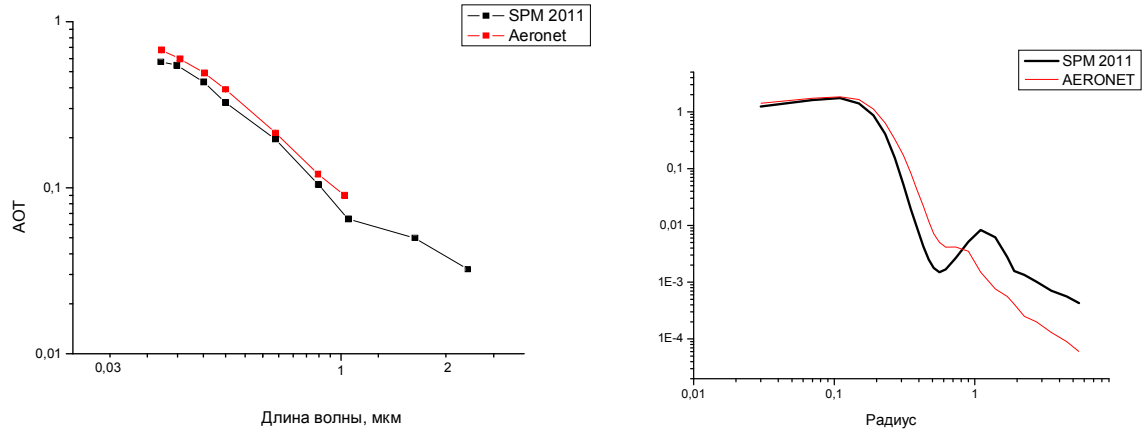


Рис. 3. Дневной ход АОТ на λ = 0, 439 мкм для летних условий г. Волгограда в 2013 г.

Кроме того, мы проводили сопоставление функций распределения аэрозольных частиц по размерам, восстановленных с использованием программного комплекса, описанного в работе [1], из данных отдельных измерений различными фотометрами. На рисунке 4 приведен пример такого восстановления при использовании данных измерений АОТ солнечными фотометрами SPM и CE 318.



а) *б*)

Рис. 4. *а*) спектральная зависимость АОТ при одновременных измерениях SPM и CE 318; *б)* функция распределения аэрозольных частиц по размерам

Наблюдалась достаточно типичная ситуация: функции распределения для мелкодисперсной фракции, восстановленные из данных для разных фотометров, оказывались достаточно близкими, тогда как для крупнодисперсной фракции наблюдался некоторый разброс. Мы полагаем, что причиной этого является большая погрешность измерений АОТ в длинноволновой части спектра мобильным фотометром SPM в сравнении с CE 318.

В заключение можно отметить, что восстановление АОТ из данных измерений фотометра SPM в спектральном интервале 0,34–2,1 мкм (за исключением длины волны 0,499 мкм) обеспечивается с погрешностью, не превышающей 0,01, при условии осреднения за интервалы времени не менее 30 минут.

ПРИМЕЧАНИЕ

[1] Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ № 13-05-97065, 13-07-97056, 13-01-97062.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аникин, П. П. Оптические характеристики и микроструктура аэрозоля по данным измерений индикатрис рассеяния в области солнечного ореола / П. П. Аникин, М. А. Свириденков // Физика атмосферного аэрозоля : сб. тр. Междунар. конф., г. Москва, апр. 1999. – М. : Диалог-МГУ, 1999. – С. 20–28.

2. Кабанов, Д. М. О методике определения аэрозольной оптической толщи атмосферы в ближнем ИК-диапазоне спектра / Д. М. Кабанов, С. М. Сакерин // Оптика атмосферы и океана. – 1997. – Т. 10, № 8. – С. 866–874.

3. Мицель, А. А. Перенос оптического излучения в молекулярной атмосфере / А. А. Мицель, К. М. Фирсов, Б. А. Фомин. – Томск : STT, 2001. – 444 с.

4. Сакерин, С. М. Исследование радиационных характеристик аэрозоля в азиатской части России / С. М. Сакерин. – Томск : Изд-во Ин-та оптики атмосферы СО РАН, 2012. – 484 с.

5. Фирсов, К. М. Первые результаты фотометрических измерений аэрозольной оптической толщи и общего влагосодержания над территорией г. Волгограда / К. М. Фирсов, Е. В. Бобров, И. И. Клиточенко // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 1, Математика. Физика. – 2012. – № 1 (16) – С. 106–112.

6. Фирсов, К. М. Пропускание атмосферы в полосах поглощения озона для УФ-каналов спектрометра SP-6 / К. М. Фирсов, Ю. В. Воронина, О. Н. Сулакшина // Оптика атмосферы и океана. – 2006. – Т. 19, № 8. – С. 727–730.

7. Фирсов, К. М. Спектроскопическое обеспечение для функционирования солнечного фотометра SP-6 / К. М. Фирсов, Т. Ю. Чеснокова, Д. М. Кабанов, С. М. Сакерин // Оптика атмосферы и океана. – 2004. – Т. 17, № 11. – С. 912–915.

8. Hansen, J. E. Light scattering in planetary atmospheres / J. E. Hansen, L. D. Travis // Space Sci. Rev. – 1974. – № 16. – P. 527–610.

9. Kaufman, Y. J. Algorithm for Remote Sensing of Tropospheric Aerosol from MODIS / Y. J. Kaufman, D. Tanre // Algorithm Theoretical Basis Document, ATBD-MOD-02, NASA Goddard Space Flight Center. – 1998. – 85 p. – Electronic text data. – Mode of access: http://daac.gsfc.nasa.gov/guides/GSFC-ECS/guide/MOD08_M3_tga.gd. shtml. – Title from screen.

REFERENCES

1. Anikin P.P., Sviridenkov M.A. Opticheskie kharakteristiki i mikrostruktura aerozolya po dannym izmereniy indikatris rasseyaniya v oblasti solnechnogo oreola [Optical Characteristics and Microstructure of Aerosol Measurements of the Scattering in the Solar Aureole]. *Fizika atmosfernogo aerozolya, sb. tr. Mezhdunar. konf., Moskva, apr. 1999* [Physics of Atmospheric Aerosol, Poceedings of International Conference, Moscow, April 1999]. Moscow, Dialog-MGU Publ., 1999, pp. 20-28.

2. Kabanov D.M., Sakerin S.M. O metodike opredeleniya aerozolnoy opticheskoy tolshchi atmosfery v blizhnem IK-diapazone spektra [On the Method of Determination of the Aerosol Optical Thickness of the Atmosphere in the Near-Infrared Spectrum]. *Optika atmosfery i okeana* [Atmospheric and Oceanic Optics]. 1997, vol. 10, no. 8, pp. 866-874.

3. Mitsel A.A., Firsov K.M., Fomin B.A. Perenos opticheskogo izlucheniya v molekulyarnoy atmosfere [The Transfer of Optical Radiation in the Molecular Atmosphere]. Tomsk, STT Publ., 2001. 444 p.

4. Sakerin S.M. *Issledovanie radiatsionnykh kharakteristik aerozolya v aziatskoy chasti Rossii* [The Investigation of the radiation characteristics of aerosol in the Asian part of Russia]. Tomsk, Izd-vo In-ta optiki atmosfery SO RAN, 2012. 484 p.

5. Firsov K.M., Bobrov E.V., Klitochenko I.I. Pervye rezultaty fotometricheskikh izmereniy aerozolnoy opticheskoy tolshchikh i obshchego vlagosoderzhaniya nad territoriey g. Volgograda [The First Results of Photometric Measurements of Aerosol Optical Depth and Total Water Vapor Content Over the Territory of Volgograd]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 1, Matematika. Fizika* [Journal of Volgograd State University.Mathematics. Physics], 2012, no. 1 (16), pp. 106-112.

6. Firsov K.M., Voronina, Yu.V., Sulakshina O.N. Propuskanie atmosfery v polosakh pogloshcheniya ozona dlya UF-kanalov spektrometra SP-6 [The Atmospheric Transmission in the Absorption Bands of Ozone for UV Spectrometer Channels SP-6]. *Optika atmosfery i okeana* [Atmospheric and Oceanic Optics]. 2006. vol. 19. no 8, pp. 727-730.

7. Firsov K.M., Chesnokova T.Yu., Kabanov D.M., Sakerin S.M. Spektroskopicheskoe obespechenie dlya funktsionirovaniya solnechnogo fotometra SP-6 [Spectroscopic Provision for Functioning of SP-6 Sun Photometer]. *Optika atmosfery i okeana* [Atmospheric and Oceanic Optics], 2004, vol. 17, no 11, pp. 912-915.

8. Hansen J.E., Travis L.D. Light scattering in planetary atmospheres. *Space Sci. Rev*., 1974, no. 16, pp. 527-610.

9. Kaufman Y.J., Tanre D. Algorithm For Remote Sensing of Tropospheric Aerosol from MODIS. *Algorithm Theoretical Basis Document, ATBD-MOD-02, NASA Goddard Space Flight Center*, 1998. 85 p. Available at: http://daac.gsfc.nasa.gov/guides/GSFC-ECS/guide/MOD08_M3_tga.gd.shtml.

RESTORING THE AEROSOL OPTICAL DEPTH BY GROUND MEASUREMENTS OF SPM PHOTOMETER

Firsov Konstantin Mikhaylovich

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor,
Department of Laser Physics, Director of Physical-Technical Institute
Volgograd State University
fkm.volsu@mail.ru
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

Bobrov Evgeniy Vladimirovich

Programming Specialist, Publishing House of Volgograd State University
bobrov-volsu@mail.ru
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

Abstract. Measurements of the aerosol optical depth (AOD) in the Lower Volga region by using photometer SPM, developed at the Institute of Atmospheric Optics, were made. This photometer detected and recorded the signals coming from the sun in a cloudless sky 10 spectral channels 0.339, 0.373, 0.439, 0.499, 0.673, 0.871, 0.939, 0.1044, 0.1555 и 0.2139 μm. The technique for retrieval of AOD from signals photometer was described in this article. Measurement results of SPM photometer and CE 318 photometer of AERONET network were compared. SPM photometer was tested for the presence of errors in each of the measurement channels, which are mainly due to operator error when pointing at the sun. Practically in all spectral channels (except 0.499 μm) AOD standard deviations were smaller value 0.01, when averaged over 30 minute intervals. Comparison of the distribution functions of the aerosol particle size of the retrieval from different photometers measurements of AOD was performed. There was quite a typical situation: the distribution function for the fine fraction recovered from the data for different photometers, found themselves close enough, while for coarse fraction has been some discrepancy. We believe that the reason for this is the large measurement error of AOD of SPM photometer compared to 318 CE photometer.

Key words: aerosol, aerosol optical depth, transfer of radiation, molecular dissipation, absorption.