



УДК 535; 551.510
ББК 22.3

**ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ
АЭРОЗОЛЬНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ТОЛЩИ
И ОБЩЕГО ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ
НАД ТЕРРИТОРИЕЙ г. ВОЛГОГРАДА ¹**

К.М. Фирсов, Е.В. Бобров, И.И. Клиточенко

Проведены измерения аэрозольной оптической толщи (АОТ) и влагосодержания в г. Волгограде. Оценены среднедневные и среднемесячные оптические характеристики аэрозоля. Проведено сопоставление с данными спутниковых наблюдений. Показано, что градуировка фотометра в условиях Западной Сибири может привести к систематическим погрешностям при восстановлении поглощающей массы H_2O в Нижнем Поволжье.

Ключевые слова: аэрозольная оптическая толщина, влагосодержание, параметр Ангстрема, фотометр, пропускание.

Введение

В настоящее время является уже установленным фактом, что средняя температура Земли возрастает. Среди различных факторов, вызвавших это изменение температуры, значительную роль играют парниковые газы, такие как CO_2 , CH_4 , O_3 , окислы азота, фреоны и др. Рост содержания в атмосфере углекислого газа рассматривается сейчас как главный фактор происходящего потепления климата [5]. Водяной пар – главный на сегодня парниковый газ, однако его вклад в потепление климата проявляется лишь через обратные связи. Так, например, при увеличении температуры увеличивается и испарение водяного пара, что вносит свой вклад в разогрев поверхности Земли. Согласно данным [там же], оценка среднглобального радиационного воздействия (радиационный форсинг) за счет парниковых газов составляет величину около $2,9 \text{ Вт/м}^2$ с погрешностью $0,3 \text{ Вт/м}^2$.

Под аэрозолем понимают совокупность взвешенных в атмосферном воздухе твердых или жидких частиц с характерным размером от $0,01$ до 10 мкм , которые могут находиться в атмосфере неопределенно долгое время. Атмосферные аэрозоли, образованные как атмосферными (например, сульфат, горящая биомасса, дым, сажа, черный углерод), так и естественными источ-

никами (минеральная пыль и морская соль), характеризуются значительной региональной изменчивостью и могут давать заметный вклад в баланс тепла Земли [4; 5]. Радиационный форсинг, обусловленный аэрозолем, имеет существенно большие неопределенности [8]. Это обусловлено тем, что аэрозоль менее изучен, и, кроме того, крайне недостаёт данных наземных измерений на региональном уровне. В настоящее время NASA располагает широкой сетью солнечных фотометров, число которых достигает более 100 [проект AERONET (http://aeronet.gsfc.nasa.gov/pasa_menu.html)], расположенных в различных точках мира. Данные, полученные с этих приборов, послужили основой для создания аэрозольных моделей, используемых для обработки спутниковых измерений со сканирующего радиометра MODIS [9]. Однако результаты спутниковых наблюдений над территорией суши позволяют получить лишь две характеристики: аэрозольная оптическая толщина (AOT) на длине волны 0,55 мкм и параметр Ангстрема. Два эти параметра позволяют описать поведение AOT в спектральном диапазоне, ограниченном 0,5–0,68 мкм.

1. Район исследований и аппаратура измерения

На территории России в настоящее время интенсивно развивается сеть наземных наблюдений за AOT в Западной Сибири [6]. Эти измерения проводятся с использованием многоканального солнечного фотометра, который позволяет проводить измерения AOT в широком спектральном диапазоне 0,3–2 мкм, что позволяет получить детальную информацию об аэрозоле и существенно дополняет информацию, получаемую со спутников. Сеть фотометрических наблюдений за аэрозолем в Европейской части России достаточно редкая, ближайшие точки находятся в Подмосковье и Екатеринбурге. Поэтому территория вблизи г. Волгограда представляет значительный интерес для организации постоянного поста наблюдений за AOT не только в связи с тем, что здесь отсутствуют подобные наблюдения, но и в связи с его региональными особенностями и большим количеством солнечных дней.

С июля 2011 г. начались систематические измерения аэрозольной оптической толщи и общего влагосодержания в районе г. Волгограда с использованием мобильного солнечного фотометра SP, который был нам любезно предоставлен ИОА СО РАН на летне-осенний период измерений.

Солнечный фотометр SP – это портативный прибор для измерений спектральной прозрачности в окнах прозрачности атмосферы и полосе поглощения водяного пара (0,94 мкм). Процесс измерений автоматизирован – выполняется по программе микроконтроллера. Измерения проводятся оператором из положения «с руки». В состав солнечного фотометра входят: собственно фотометр SP, блок питания/зарядное устройство, внешний GPS-приемник (измеритель координат и времени). К фотометру подключается компьютер – для съема полученной информации, накопленной во flash-памяти. На рисунке 1 представлена новая модифицированная версия данного фотометра. В 2012 г. после процедуры калибровки SPM-измерения AOT будут проводиться с использованием данного прибора.

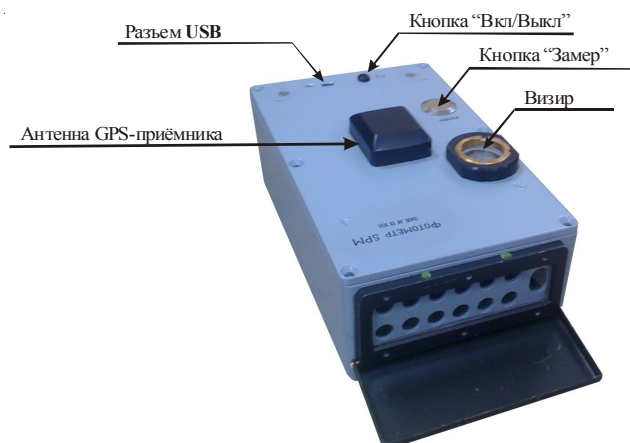


Рис. 1. Внешний вид портативного фотометра SPM

Процесс измерений у данных фотометров автоматизирован – результаты измерений прямой солнечной радиации (вместе с координатами, временем замеров, давлением и температурой) в 14 спектральных каналах накапливаются в цифровом виде во flash-памяти прибора и затем могут быть переданы на персональный компьютер для обработки и анализа.

Определение искомым характеристик атмосферы основывается на методе «прозрачности» – фотометрировании прямого солнечного излучения, прошедшего через атмосферу, и дифференциальной методике. При нормальных условиях эксплуатации и калиброванных данных, погрешность определения АОТ составляет 0,01–0,02, влагосодержания атмосферы $\sim 0,1$ г/см². Описание методик калибровки и расчета искомым характеристик приведено в работах авторов данного прибора [1–3].

За период измерений (июль–сентябрь, всего 32 дня измерений) произведено 944 единичных замеров, рассчитано 124 среднечасовых значений аэрозольной оптической толщи. Измерения интенсивности солнечного излучения, прошедшего через атмосферу Земли, проводились одновременно в 11 спектральных каналах от ближнего УФ до среднего ИК: 340 нм, 380 нм, 440 нм, 500 нм, 550 нм, 670 нм, 870 нм, 1020 нм, 1250 нм, 1560 нм и 2140 нм. Из этих данных извлекается информация об оптической толще аэрозоля.

2. Анализ полученных результатов

На рисунке 2 приведена спектральная зависимость аэрозольной оптической толщи от длины волны, которая характеризует дисперсный состав аэрозоля: чем больше наклон кривой, тем больше мелких частиц содержится в аэрозоле.

На основе оперативных наблюдений был определен параметр Ангстрема, который характеризовал спектральное поведение АОТ в диапазоне длин волн 440–870 нм (рис. 3). Приблизительно 10–15 % значений имели величины менее единицы, показывая, что в этом случае преобладали частицы грубой моды. Более 80 % значений варьировались между 1,0 и 2,0 и менее 1 % превышали 2,0, что обычно характерно для преобладания частиц аэрозоля тонкой моды.

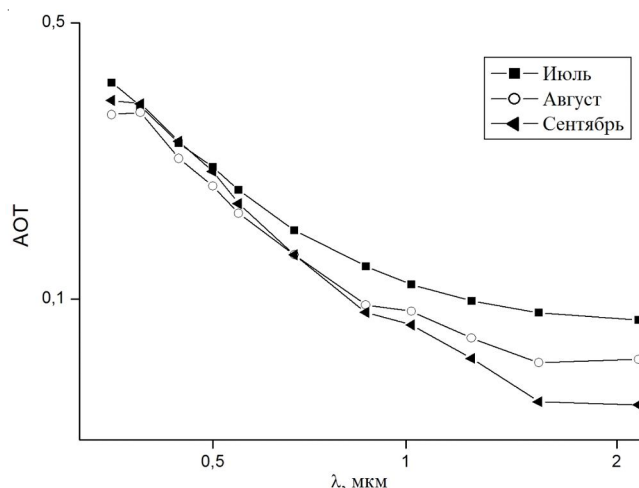


Рис. 2. Спектральное распределение среднечасовых значений АОТ для г. Волгограда

Было проведено сопоставление АОТ, измеренной при помощи солнечного фотометра и спутникового радиометра MODIS (рис. 4). Результаты измерений в целом показали удовлетворительное согласие.

Одновременно с АОТ измерялось общее влагосодержание в вертикальном столбе атмосферы η (в сантиметрах осажденной воды). За исследуемый период среднечасовые значения η изменялись от 0,57 до 3,32, а среднечасовые – от 1,81 до 1,91. Для восстановления общего содержания паров воды использовались два спектральных канала с центрами 0,87 мкм и 0,94 мкм. Сигнал, принимаемый на одной из длин волн, можно описать формулой [7]:

$$S(\lambda) = C(\lambda)X_{H_2O}(\lambda)X_{\tilde{\alpha}}(\lambda), \quad (1)$$

где S – сигнал на одной из длин волн 0,94 и 0,87 мкм соответственно;
 C – константа калибровки;
 T_a – пропускание атмосферы, обусловленное ослаблением аэрозоля и рассеянием на молекулах воздуха;
 T_{H_2O} – пропускание атмосферы, обусловленное поглощением паров воды.

Поскольку вышеуказанные длины волн близки, то рассеяние на них примерно одинаковое. Вследствие этого отношение сигналов на двух длинах волн (с учетом того, что на длине волны 0,87 мкм поглощение парами воды мало) определялось соотношением:

$$S_{0,94} / S_{0,87} = C X_{H_2O}. \quad (2)$$

Результаты моделирования показывают, что зависимость функции пропускания от поглощающей массы паров воды может быть описана достаточно простым соотношением [7]:

$$\ln T_{H_2O} = -\tilde{\alpha}(mW_{H_2O})^n, \quad (3)$$

где W_{H_2O} – поглощающая масса паров воды вертикального столба атмосферы;
 m – оптическая масса (для малых зенитных углов Солнца $n = 1/\cos \tilde{\theta}$);
 $\tilde{\alpha}$ – параметры модели, которые определяются путем подгонки к расчетной функции пропускания.

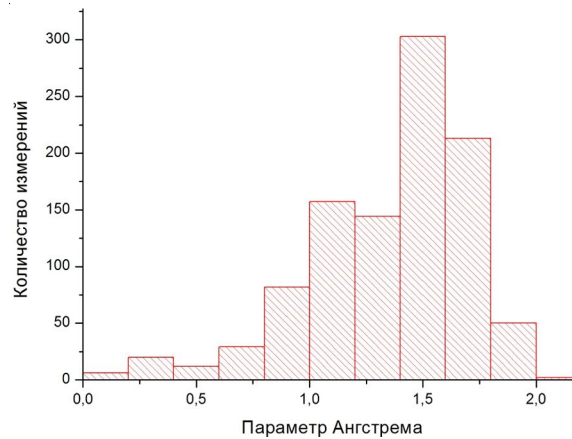


Рис. 3. Параметр Ангрестра (г. Волгоград)

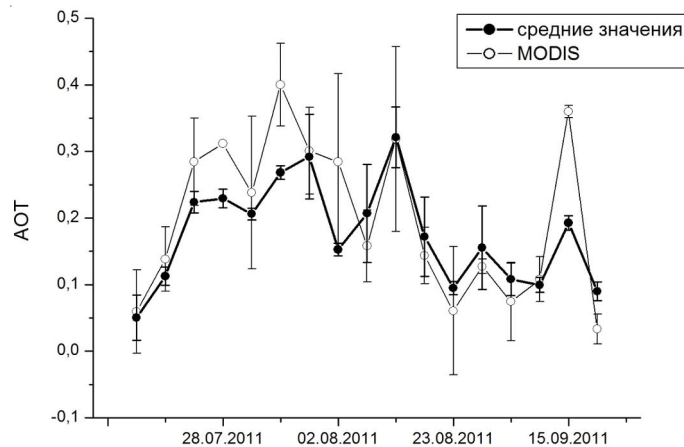


Рис. 4. Оптическая толщина на длине волне 0,55 мкм, измеренная с использованием фотометра SPM и спутникового радиометра MODIS

В работе [9] было проведено моделирование для условий Западной Сибири и показано, что параметры модели n и $\bar{\alpha}$ слабо зависят от профилей температуры. Согласно этому прибор, отградуированный для Западной Сибири, возможно применять для измерения общего влагосодержания в атмосфере и в других регионах. С другой стороны, функции пропускания в полосах поглощения паров воды зависят от температуры воздуха. Поэтому необходимо было оценить погрешность восстановления общего влагосодержания для региона г. Волгограда. Для реализации этого были взяты две выборки метеорологических профилей для условий г. Новосибирска и для условий г. Волгограда. Затем на основе метеоданных для г. Новосибирска методом прямого счет line-by-line была получена выборка функций пропускания. После этого она была подвергнута регрессионному анализу, и были определены параметры n и $\bar{\alpha}$. Качество подгонки характеризуется на рисунке 5.

Затем были проведены расчеты функций пропускания на основе метеоданных для г. Волгограда и построена их зависимость от общего влагосодержания (рис. 6). Из рисунка 6 видно, что функциональная зависимость пропускания от поглощающей массы для условий г. Волгограда и г. Новосибирска близки. То есть фотометр, отградуированный для условий Западной Сибири, может использоваться для измерений в регионе Нижнего Поволжья. С другой стороны, из рисунка 6 видно, что при больших поглощающих массах (большие зенитные углы) наблюдается систематическая ошибка, которая обусловлена функциональной зависимостью (3).

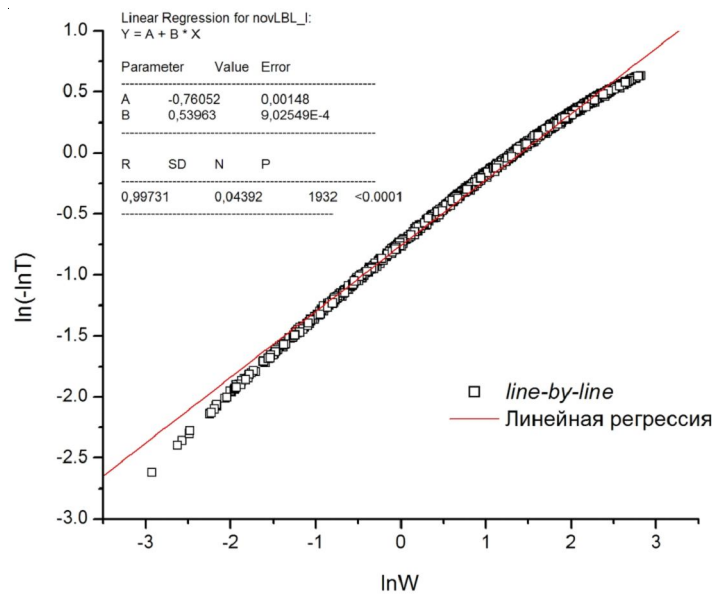


Рис. 5. Зависимость $\ln(-\ln T)$ от логарифма ОС H_2O в атмосфере Земли для условий г. Новосибирска. Функции пропускания рассчитаны на основе быстрого метода line-by-line и по аппроксимационной формуле (3)

Для того чтобы проверить, как вышеуказанные погрешности проявятся в обратной задаче, были рассчитаны поглощающие массы по формуле:

$$W_{расч.} = \frac{\zeta - \ln T}{\bar{\alpha}} \frac{\phi^{1/n}}{\psi}, \quad (4)$$

где T – функция пропускания для условий г. Волгограда; n и $\bar{\alpha}$ – определены для условий г. Новосибирска.

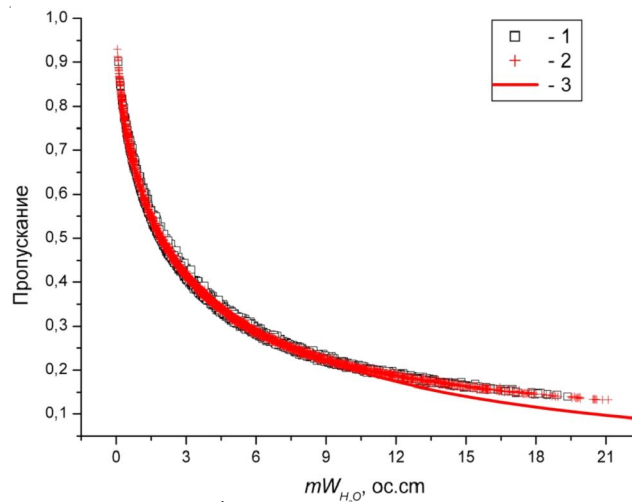


Рис. 6. Зависимость пропускания атмосферы от поглощающей массы водяного пара, рассчитанная: 1 – прямым методом line-by-line для г. Волгограда; 2 – прямым методом line-by-line для г. Новосибирска и 3 – по аппроксимационной формуле для г. Новосибирска

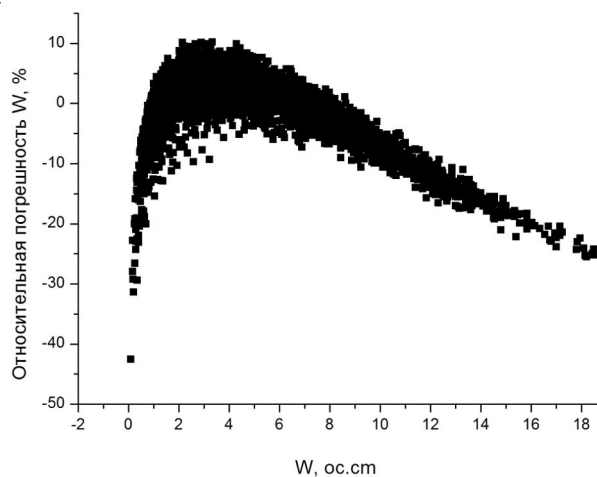


Рис. 7. Относительная погрешность поглощающей массы для условий г. Волгограда

Из рисунка 7 видно, что относительная погрешность при больших зенитных углах может достигать 30 %. Поэтому более предпочтительны данные, полученные при небольших зенитных углах.

Заключение

Полученные результаты позволяют выявить региональные особенности оптических характеристик атмосферного аэрозоля и оценить их временную изменчивость. Эти данные необходимы также при коррекции результатов дистанционного спутникового зондирования атмосферы и подстилающей поверхности Земли.

ПРИМЕЧАНИЯ

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ-11-05-97044-р_поволжье_a и 11-07-00660-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Информационная система для сетевых солнечных фотометров / Д. М. Кабанов, В. В. Веретенников, Ю. В. Воронина [и др.] // Оптика атмосферы и океана. – 2009. – Т. 22, № 1. – С. 61–67.
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. – № 8. – С. 866–874.
3. Кабанов, Д. М. Результаты исследований общего влагосодержания атмосферы методом оптической гигрометрии. Ч. 1 / Д. М. Кабанов, С. М. Сакерин // Оптика атмосферы и океана. – 1995. – № 6. – С. 852–860.
4. Мицель, А. А. Перенос оптического излучения в молекулярной атмосфере / А. А. Мицель, К. М. Фирсов, Б. А. Фомин. – Томск : СТУ, 2001. – 444 с.
5. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. – М., 2008.
6. Система сетевого мониторинга радиационно-активных компонентов атмосферы. Ч. I. Солнечные фотометры / С. М. Сакерин, Д. М. Кабанов, А. П. Ростов [и др.] // Оптика атмосферы и океана. – 2004. – Т. 17, № 4. – С. 354–360.
7. Спектроскопическое обеспечение для функционирования солнечного фотометра SP-6 / Т. Ю. Чеснокова, К. М. Фирсов, Д. М. Кабанов, С. М. Сакерин // Оптика атмосферы и океана. – 2004. – Т. 17, № 11. – С. 912–915.
8. Efficacy of climate forcing / J. Hansen, M. Sato [et al.] // J. Geophys. Res. – 2005. – Vol. 110 (D18), D18104, doi:10.29/2005JD005776.
9. MODIS Atmosphere: MOD04_L2 (Aerosol Product). – Mode of access: http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/MOD04_L2/index.html.

**FIRST RESULT OF PHOTOMETRIC MEASUREMENTS AEROSOL
OPTICAL THICKNESS AND TOTAL WATER VAPOR CONTENT
OVER THE TERRITORY OF VOLGOGRAD**

K.M. Firsov, E.V. Bobrov, I.I. Klitochenko

Measurements of aerosol optical thickness (AOT) and water vapor content in Volgograd. Evaluated average daily and monthly mean aerosol optical properties. Comparisons with satellite observations were conducted. It is shown that calibration of the photometer in Western Siberia could lead to systematic errors in the recovery of the absorbing mass of H₂O in the Lower Volga.

Key words: *aerosol optical thickness, water vapor content, Angstrom parameter, photometer, transmission.*