

УДК 551.508

У. Ф. Мамедова<sup>1</sup>,  
А. Д. Алиева<sup>2</sup>

**Оптимизация суточных солнечно–  
фотометрических измерений оптической  
толщины малых газов с учетом влияния  
атмосферного аэрозоля**

<sup>1</sup>Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, г. Баку, Азербайджанская Республика

<sup>2</sup>Национальное аэрокосмическое агентство Азербайджана, г. Баку, Азербайджанская Республика

**Аннотация.** Статья посвящена вопросам оптимизации суточных измерений оптической толщины атмосферных малых газов с помощью наземных солнечных фотометров путем перехода на укороченный цикл измерений с учетом влияния атмосферного аэрозоля. Сформулирована задача исследования оптимальной зависимости длины волны измерений от оптической воздушной массы. Согласно полученному решению наибольшая эффективность солнечно-фотометрических измерений оптической толщины малых газов атмосферы может быть достигнута при обеспечении прямой зависимости между длиной волны проводимых измерений и оптической воздушной массой. Применительно к суточным систематическим измерениям, проводимым с помощью солнечных фотометров полученный вывод позволяет повысить достоверность результатов проводимых экспериментальных исследований атмосферных газов.

**Ключевые слова:** атмосферный аэрозоль, оптическая толщина, солнечный фотометр, оптимизация, оптическая воздушная масса.

### Введение

Общеизвестно, что неопределенность результатов измерения оптической толщины малых газов атмосферы, появляется по следующим причинам: а) инструментальные погрешности прибора; б) погрешности, вызванные неточной калибровкой; в) погрешности, вызванные атмосферным аэрозолем.

В настоящей статье исследуется неопределенность результатов солнечно-фотометрических измерений, вызванная динамикой изменения показателей атмосферного аэрозоля. Так, например, согласно работе [1], при отсутствии облаков, оптическая толщина чистого неба при оптической толщине аэрозоля  $\tau_{\text{aer}} < 0,7$  за одну минуту вследствие неустойчивости аэрозоля изменяется на величину не менее, чем 0,02.

Как отмечается в работе [2], атмосферный аэрозоль влияет на климат Земли путем изменения ее энергобаланса, оказывая прямое и косвенное воздействие на энергию Солнца, достигающую нашу планету. Вместе с тем, согласно [3], неопределенность влияния аэрозоля на радиационный баланс Земли значительно превышает неопределенности всех других факторов, также влияющих на климат планеты. Данная мысль также подтверждается результатами работы [2], согласно которой «наблюдаемая природная или антропогенная изменчивость оптических свойств атмосферного аэрозоля является основной причиной изменений региональных климатических показателей». Причиной тому является высокая степень временной и пространственной изменчивости физических, химических и

оптических свойств аэрозоля, что объясняется малым временем жизни аэрозоля в атмосфере и негомогенным характером их эмиссии в атмосферу.

Вышеуказанная нестабильность атмосферного аэрозоля диктует необходимость проведения наземных и космических исследований физико-оптических показателей атмосферного аэрозоля. Важность и значимость наземных измерений вне сомнений, доказательство тому Всемирная автоматизированная измерительная сеть AERONET, включающая более 500 наземных измерительных станций разбросанных по всему миру [4]. Эти станции с определенном минутном интервалом времени осуществляют измерения оптической толщины и др. параметров аэрозоля при различных значениях оптической воздушной массы.

Можно ожидать, что к вечеру, когда оптическая воздушная масса стремительно нарастает, на больших длинах волн, где ослабление Солнечной радиации из-за воздействия аэрозоля минимально достоверность результатов измерения малых газов намного выше чем при малых величинах оптической воздушной массы и длины волны измерений. Отсюда логически возникает задача формирования оптимальной серии солнечно-фотометрических измерений малых газов с наибольшей суммарной достоверностью результатов проводимых измерений в смысле минимизации влияния аэрозоля.

### **Задача исследований**

Одним из важных показателей атмосферной оптики, воздействующих на результат солнечно — фотометрических измерений является оптическая воздушная масса  $m$ . Согласно [5–7], оптическая воздушная масса  $m$  может быть вычислена по формуле

$$m = \frac{P}{1013,25} [\cos\theta_2 + 0,15(93,885 - \theta_2)^{-1,253}]^{-1} \quad (1),$$

где  $\theta_2$  зенитный угол Солнца;  $P$  – локальное атмосферное давление в гектопаскалях (гПа), равное 1013,25 гПа.

Оптическая толщина атмосферы является суммой оптических толщин таких компонентов, как аэрозоль, релеевское рассеяние, малые газы, включая озон [8-9]. При этом значения оптических толщин всех этих компонентов изменяется как в течение суток, так и по длине волны.

В таблице 1 приведены результаты экспериментальных исследований изменения оптических толщин указанных компонентов атмосферы как по длине волны, так и во времени суток [10]. Измерения были проведены 20 декабря 2012 г. В Бразилии, г. Каико.

**Таблица 1**

Длина волны (нм)	Время дня	$\tau_{atm}$	$\tau_{oz}$	$\tau_{Rel}$	$\tau_{AOD}$
500	до 12 <sup>00</sup>	0,401	0,008	0,143	0,250
	после 12 <sup>00</sup>	0,334	0,008	0,143	0,183
670	до 12 <sup>00</sup>	0,239	0,012	0,044	0,183
	после 12 <sup>00</sup>	0,182	0,012	0,044	0,126
870	до 12 <sup>00</sup>	0,166	0	0,015	0,151
	после 12 <sup>00</sup>	0,116	0	0,015	0,101

*Составлено авторами*

Как видно из данных, приведенных в табл. 1. оптические толщины как всей атмосферы, так и ее компонентов зависят от длины волны и времени дня, т. е. от воздушной оптической массы. Вообще говоря, такой результат можно было ожидать от известного закона Бугера - Бера, согласно которому

$$I(\lambda) = I_0(\lambda)e^{-[\tau_{atm}(\lambda) \cdot m]} \quad (2),$$

где:  $I(\lambda)$  – сигнал на входе солнечного фотометра;  $I_0(\lambda)$  – оптическая радиация на верхней границе атмосферы.

Очевидна, что наиболее достоверный результат измерения малых газов может быть получен при зенитных измерениях (т. е. когда  $m=1$ ) и на относительно больших длинах волн, где влияние аэрозоля минимально.

Задача исследования в настоящей статье заключается в следующем: Следует найти такую функциональную зависимость  $\lambda = \lambda(m)$ , при которой можно было бы достичь наибольшей интегральной величины относительного показателя  $I(\lambda)/I_0(\lambda)$ , интегрированного в диапазоне оптической воздушной массы ( $1 \div m_{max}$ ). Очевидно, что максимизация этого показателя будет означать возможность достижения наибольшей достоверности результатов солнечно-фотометрических измерений малых газов атмосферы.

### Решение задачи

В первом приближении оптическую толщину атмосферы в области  $0,3 \div 1,0$  мкм аппроксимируем убывающей линейной функцией длины волны, т. е.

$$\tau_{atm}(\lambda) = \tau_{atm \cdot 0} - k_1 \cdot \lambda \quad (3),$$

где  $k_1 = const$

Далее, вводим на рассмотрение функцию

$$\lambda = \lambda(m) \quad (4).$$

Отметим, что функция (4) определяет закономерность выбора длины волны измерений в течение дня, при изменении  $m$  от единицы до  $m_{max}$ . С учетом (2), (3) и (4) получим

$$I(\lambda) = I_0(\lambda)e^{-[\tau_{atm \cdot 0} - k_1 \cdot \lambda(m)]m} \quad (5).$$

Основной функционал оптимизации  $F_1$  представим в следующем виде

$$F_1 = \frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)} = \int_1^{m_{max}} e^{-[\tau_{atm \cdot 0} - k_1 \cdot \lambda(m)]m} dm \quad (6).$$

К функции (4) применим следующее интегральное ограничение

$$F_2 = \int_1^{m_{max}} \lambda(m) dm = C \quad (7),$$

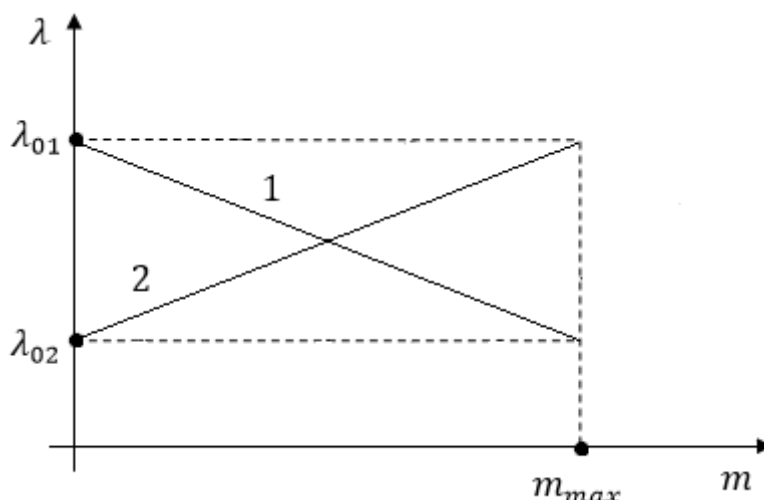
где  $C = const$

Смысл ограничительного условия (7) заключается в том, что для решения данной оптимизационной задачи искусственно снижается класс возможных функций, в числе которых следует искать оптимальный вид функции  $\lambda(m)$ . Для упрощения задачи рассмотрим возможность дуального выбора одного из функций, удовлетворяющих условию (7) приведенных на рис 1.

С учетом выражений (6) и (7) составим полный функционал безусловной вариационной оптимизации  $F_0$ :

$$F_0 = \int_1^{m_{max}} e^{-[\tau_{atm \cdot 0} + k_1 \cdot \lambda(m)]m} dm + \chi \left[ \int_1^{m_{max}} \lambda(m) dm - C \right] \quad (8),$$

где  $\chi$  – множитель Лагранжа.



**Рис. 1.** Общий вид линейных функций,  $\lambda_1(m)$  и  $\lambda_2(m)$  удовлетворяющих условию (8)  
 Цифрами обозначены: (1) – функций вида  $\lambda = \lambda_{01} - km$   
 (2) – функций вида  $\lambda = \lambda_{02} + km$

Согласно уравнению Эйлера–Лагранжа [11], решение оптимизационной задачи (8) должно удовлетворять условию

$$\frac{d\{e^{-[\tau_{atm \cdot 0} - k_1 \cdot \lambda(m)]m} + \chi \lambda(m)\}}{d\lambda(m)} = 0 \quad (9).$$

Из условия (9) нетрудно получить следующее уравнение:

$$m e^{-[\tau_{atm \cdot 0} - k_1 \lambda(m)]m} = \chi / k_1 \quad (10).$$

Из выражения (10) находим

$$\lambda(m)_{opt} = -\frac{1}{mk_1} \ln \frac{m}{\chi/k_1} + \frac{\tau_{atm \cdot 0}}{k_1} \quad (11).$$

Для вычисления значения множителя Лагранжа учтем (11) в (7).

После некоторых преобразований нетрудно получить следующую формулы для вычисления  $\chi$

$$\chi = k_1 \exp \left[ \frac{\int_1^{m_{max}} \frac{1}{k_1 m} \ln m \cdot I_0(\lambda) - \int_1^{m_{max}} \frac{\tau_{atm \cdot 0}}{k_1} dm + C}{\int_1^{m_{max}} \frac{dm}{k_1 m}} \right] \quad (12).$$

Далее обозначим величину  $\chi$ , вычисляемую по формуле (12) как  $\chi_0$ . Следовательно, окончательное решение оптимизационной задачи имеет вид

$$\lambda(m)_{opt} = -\frac{1}{mk_1} \ln \frac{mk_1}{\chi_0} + \frac{\tau_{atm \cdot 0}}{k_1} \quad (13).$$

Для определения типа экстремума достаточно вычислить вторую производную интегранта в (9) по  $\lambda(m)$  и убедиться, что она отрицательна. Следовательно, вычисленный экстремум функционала цели (8) является максимумом. Очевидно, что максимум функционала цели в данной оптимизационной задаче означает высокую достоверность результатов измерений малых атмосферных газов.

### Модельные исследования

Таким образом, согласно полученному результату, при функциональной зависимости (13), т. е. при прямой зависимости  $\lambda$  от  $m$  целевой функционал (8)

достигает максимума, т. е. обеспечивается максимальная достоверность результатов измерений.

Проверка такого результата осуществляется следующим образом. Согласно вышеизложенному, функционал (6) при функции вида

$$\lambda = \lambda_{02} + km \quad (14)$$

должен достичь более высокого значения, чем при функции

$$\lambda = \lambda_{01} - km \quad (15).$$

Покажем, что это требование выполняется. Функционал (6) при функции (14) приобретает следующий вид:

$$F_{11} = \int_1^{m_{max}} e^{-[\tau_{atm \cdot 0} - k_1(\lambda_{02} + km)]m} dm \quad (16).$$

Далее, функционал (6) при функции (15) приобретает следующий вид:

$$F_{12} = \int_1^{m_{max}} e^{-[\tau_{atm \cdot 0} - k_1(\lambda_{01} - km)]m} dm \quad (17).$$

Нетрудно показать, что учетом

$$k = \frac{\lambda_{01} - \lambda_{02}}{m_{max}} \quad (18)$$

неравенство

$$F_{11} > F_{12} \quad (19)$$

выполняется всегда, т. е. в рассматриваемом дуальном варианте выбора оптимальной функции  $\lambda = f(m)$  полученное решение (13) верно.

### Выводы

Таким образом, согласно полученному выражению (14) наибольшая эффективность работы солнечных фотометров при измерении малых газов атмосферы может быть достигнута при прямой зависимости выбранной длины волны от величины оптической воздушной массы. Если учесть, что атмосферный аэрозоль является основной мешающей компонентой приводящей к существенному снижению достоверности результатов таких измерений в диапазоне 500–800 нм, то можно прийти к логическому заключению о том, что с ростом  $m$ , т. е. в интервале 9:00–16:00 длину волны проводимых измерений следует увеличить, т. е. переходить к измерениям на более длинноволновом диапазоне.

Следовательно, если ставится задача измерения оптической толщины малых атмосферных газов в диапазоне длин волн 400–800 нм, то измерения следует начинать в полдень с ультрафиолетового диапазона, а к вечеру закончить на близкой инфракрасной зоне.

### Литература

1. Smirnov A., Holben B. N., Eck T. F., Dubovik O., Slutsker I., 2000, Cloud-screening and quality control algorithms for the Aeronet database, Remote Sens. Environ., 73, P. 337–349
2. Papadimas C. D., Hatzianastassiou N., Matsoukas C., Kanakidou M., Mihalopoulos N. and Vardavas I. The direct effect of aerosols on solar radiation over the broader Mediterranean basin. Atmos. Chem. Phys., 12, P. 7165–7185, 2012. URL: <https://www.atmos-chem-phys.net/12/7165/2012/>
3. Kaufman Y. J., Tanre D., and Boucher, O. : A satellite view of aerosols in the climate system, Nature, 419, P. 215–223, doi:10. 1038/nature01091, 2002.

4. Holben B. N., Eck T. F., Slutsker I., Tanre D., Buis J. P., Setzer A., Vermote E., Reagan J. A., Kaufman Y., Nakajima T., Lavenu F., Jankowiak I. and Smirnov A., 1998: AERONET – A federated instrument network and data archive for aerosol characterization, *Rem. Sens. Environ.*, 66, P. 1–16.
5. Osterwald C. R., Emery K. A., 2000. Spectroradiometric Sun photometry. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 17, P. 1171–1188
6. Kasten F., 1966, A new table and approximate formula for relative optical air mass. *Arch. Meteor. Geophys. Bioklim. B14*, P. 206–233
7. Kasten F., Young, A. T., 1989. Revised optical air mass tables and approximate formula., *Appl. Opt.* 28, P. 4735–4738
8. Ichoku C., Levy R., Kaufman Y. J., Remer L. A., Li R. R., Martins V. J., Holben B. N., Abuhassan N., Slutsker I., Eck T. E., 2002, Analysis of the performance characteristics of the five-channel Microtops II Sun photometer for measuring aerosol optical thickness and precipitable water vapor. *J. Geophys. Res.* 107 (D13)
9. Serdyuchenko A., Gorshlev V., Weber M., Burrows J. P., 2011. New broadband high-resolution ozone absorption cross-sections. *Spectrosc. Eur.*, 23(6), P. 14–17
10. Cerqueira Jr. J. G., Fernandez J. H., Hoelzemann J. J., Leme N. M. P., Sousa C. T. Langley method applied in study of aerosol optical depth in the Brazilian semiarid region using 500, 670 and 870 nm bands for sun photometer calibration, *Advances in Space research* 54, 2014, P. 1530–1543
11. Эльсгольц Л. Е. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. М. Наука, 1979, 432 с.

U. F. Mamedova<sup>1</sup>,  
A. D. Alieva<sup>2</sup>

***Optimization of daily solar-photometric measurements of the optical thickness of small gases, taking into account the influence of atmospheric***

---

<sup>1</sup>Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Azerbaijan Republic

<sup>2</sup>National Aerospace Agency, Baku, Azerbaijan Republic

**Abstract.** *The article is devoted to the optimization of daily measurements of the optical thickness of atmospheric small gases using ground-based solar photometers by switching to a shortened measurement cycle taking into account the influence of atmospheric aerosol. The task of studying the optimal dependence of the measurement wavelength on the optical air mass is formulated. According to the solution obtained, the greatest efficiency of solar-photometric measurements of the optical thickness of small atmospheric gases can be achieved by providing a direct relationship between the wavelength of the measurements and the optical air mass. With regard to daily systematic measurements carried out using solar photometers, the conclusion obtained makes it possible to increase the reliability of the results of experimental studies of atmospheric gases.*

**Keywords:** *atmospheric aerosol, optical thickness, solar photometer, optimization, optical air mass.*

*References*

1. Smirnov A., Holben B. N., Eck T. F., Dubovik O., Slutsker I., 2000, Cloud-screening and quality control algorithms for the Aeronet database, *Remote Sens. Environ.*, 73, P. 337–349. (in English)
2. Papadimas C. D., Hatzianastassiou N., Matsoukas C., Kanakidou M., Mihalopoulos N. and Vardavas I. The direct effect of aerosols on solar radiation over the broader Mediterranean basin. *Atmos. Chem. Phys.*, 12, P. 7165–7185, 2012. URL: <https://www.atmos-chem-phys.net/12/7165/2012/>(in English)
3. Kaufman Y. J., Tanre D., and Boucher, O. : A satellite view of aerosols in the climate system, *Nature*, 419, P. 215–223, doi:10. 1038/nature01091, 2002. (in English)
4. Holben B. N., Eck T. F., Slutsker I., Tanre D., Buis J. P. ,Setzer A., Vermote E., Reagan J. A., Kaufman Y., Nakajima T., Lavenu F., Jankowiak I. and Smirnov A., 1998: AERONET – A federated instrument network and data archive for aerosol characterization, *Rem. Sens. Environ.*, 66, P. 1–16. (in English)
5. Osterwald C. R., Emery K. A., 2000. Spectroradiometric Sun photometry. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 17, P. 1171–1188. (in English)
6. Kasten F., 1966, A new table and approximate formula for relative optical air mass. *Arch. Meteor. Geophys. Bioklim. B14*, P. 206–233. (in English)
7. Kasten F., Young, A. T., 1989. Revised optical air mass tables and approximatin formula., *Appl. Opt.* 28, P. 4735–4738. (in English)
8. Ichoku C., Levy R., Kaufman Y. J., Remer L. A., Li R. R., Martins V. J., Holben B. N., Abuhassan N., Slutsker I., Eck T. E., 2002, Analysis of the performance characteristics of the five-channel Microtops II Sun photometer for measuring aerosol optical thickness and precipitable water vapor. *J. Geophys. Res.* 107 (D13). (in English)
9. Serdyuchenko A., Gorshchev V., Weber M., Burrows J. P., 2011. New broadband high-resolution ozone absorption cross-sections. *Spectrosc. Eur.*, 23(6), P. 14–17. (in English)
10. Cerqueira Jr. J. G., Fernandez J. H., Hoelzemann J. J., Leme N. M. P., Sousa C. T. Langley method applied in study of aerosol optical depth in the Brazilian semiarid region using 500, 670 and 870 nm bands for sun photometer calibration, *Advances in Space research* 54, 2014, P. 1530–1543. (in English)
11. El'sgol'c L. E. *Differencial'nye uravneniya i variacionnoe ischislenie*. M. Nauka, 1979, 432 s. (in Russian)

*Поступила в редакцию 05.06.2020 г.*