

РАЗДЕЛ 5.
ГИДРОЛОГИЯ, ОКЕАНОЛОГИЯ И КЛИМАТОЛОГИЯ

УДК 551.508

**ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ КОРРЕКЦИЯ ВЛИЯНИЯ АТМОСФЕРНОГО
АЭРОЗОЛЯ НА РЕЗУЛЬТАТ СОЛНЕЧНО- ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ
ИЗМЕРЕНИЙ**

Абдуллаева С. Н.¹, Агаев Ф. Ф.²

¹*Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности*

²*Национальное аэрокосмическое агентство, г.Баку, Азербайджанская Республика*

Рассмотрены известные варианты параметрической коррекции для исключения влияния атмосферного аэрозоля на результат солнечно-фотометрических измерений. Проанализированы существующие методы устранения влияния атмосферного аэрозоля на результат солнечно-фотометрических измерений и указаны недостатки этих методов. Предложен новый метод устранения влияния атмосферного аэрозоля на результат солнечно-фотометрических измерений малых газов атмосферы, в качестве основы которого использован обобщенная модель зависимости оптической толщины аэрозоля от длины волны в виде степенного многочлена. Предложено обобщение известной формулы Ангстрема для вычисления оптической толщины аэрозоля. На основе указанного обобщения дана формула для аэрозольной коррекции солнечно-фотометрических измерений.

Ключевые слова: атмосфера, аэрозоль, коррекция, солнечный фотометр, оптическая толщина

ВВЕДЕНИЕ

Роль солнечных фотометров в изучении атмосферы и визуально наблюдаемых светящихся небесных объектов трудно переоценить. В атмосферных и небесных исследованиях широко применяются как солнечные, так и лунные фотометры [1,5]. При использовании небесных светящихся тел в качестве внешнего излучателя оказывается возможным изучение характеристик различных малых газов и аэрозоля атмосферы. Классическим примером тому является озонметры Г. П. Гущина М-83 и М-124, предназначенные для измерения общего содержания озона в атмосфере, спектрометр Добсона, и многочисленные разработки солнечных фотометров, включая восьмиканальное устройство "Симель" широко используемое во всемирной сети аэрозольных исследований "AERONET" [6-7].

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Одной из основных проблем при использовании солнечных фотометров в качестве измерителей концентрации малых газов в атмосфере, включая концентрацию озона, является влияние атмосферного аэрозоля. Это положение прямо вытекает из уравнения Бугера-Бэра, применительно к ультрафиолетовой (УФ) оптической области.

Согласно [8], это уравнение применительно к УФ диапазону имеет следующий

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ КОРРЕКЦИЯ ВЛИЯНИЯ АТМОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ
НА РЕЗУЛЬТАТ СОЛНЕЧНО-ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

вид

$$E = E_0(\lambda) \exp \{ [-\tau_r(\lambda)t + \tau_a(\lambda)t + \tau_{oz}(\lambda)] \cdot m \} \quad (1)$$

где E – освещенность на уровне фотометра; $E_0(\lambda)$ – освещенность на внешней границе атмосферы; $\tau_r(\lambda)$ – оптическая толщина Релевского рассеяния; $\tau_a(\lambda)$ – оптическая толщина аэрозоля; $\tau_{oz}(\lambda)$ – оптической толщины исследуемого малого газа (в данном случае озона); m – оптическая воздушная масса.

С учетом $\tau_r(\lambda) \ll \tau_a(\lambda)$ оптическая толщина атмосферного аэрозоля оказывается основным мешающим фактором при измерении концентрации малых газов. По этой причине используются различные методы для исключения такого влияния.

Классическим решением данного вопроса при проведении одноволновых солнечно-фотометрических измерений является переход на двухволновые измерения [8]. Так, например, если проводятся измерения на длинах волн λ_1 и λ_2 имеем

$$E(\lambda_1) = E_0(\lambda_1) \exp \{ [-\tau_a(\lambda_1) + \tau_z(\lambda_1)] \cdot m \} \quad (2)$$

$$E(\lambda_2) = E_0(\lambda_2) \cdot \exp \{ -[\tau_a(\lambda_2) + \tau_z(\lambda_2)] \cdot m \} \quad (3)$$

где $\tau_r(\lambda_i)$ – оптическая толщина исследуемого газа; $i = \overline{1,2}$

При этом длины волн выбираются таким образом, что на λ_1 исследуемый газ имеет максимальное поглощения, а на λ_2 – минимальное. Разделив (2) и (3) получаем

$$\frac{E(\lambda_1)}{E(\lambda_2)} = \frac{E_0(\lambda_1)}{E_0(\lambda_2)} \exp \{ -[\Delta\tau_a(\lambda_1, \lambda_2) + \Delta\tau_z(\lambda_1, \lambda_2)] \cdot m \} \quad (4)$$

где $\Delta\tau_a(\lambda_1, \lambda_2)$ – приращение, соответствующее к переходу длины волны λ_1 к длине волны λ_2 .

Так как согласно известной формуле Ангстрема [9].

$$\tau_a = \beta \lambda^{-\alpha} \quad (5)$$

где β – аэрозольная мутность атмосферы Ангстрема; λ – длина волны в мкм; α – показатель Ангстрема,

с учетом (2) – (5) очевидно, что если λ_1 и λ_2 взять достаточно близкими по значению величинами то

$$\Delta\tau_a(\lambda_1, \lambda_2) = \beta(\lambda_1^{-\alpha} - \lambda_2^{-\alpha}) \approx 0 \quad (6)$$

Однако, выбор λ_1 и λ_2 должен быть произведен с учетом геометрической формы линии поглощения искомого газа (рис.1).

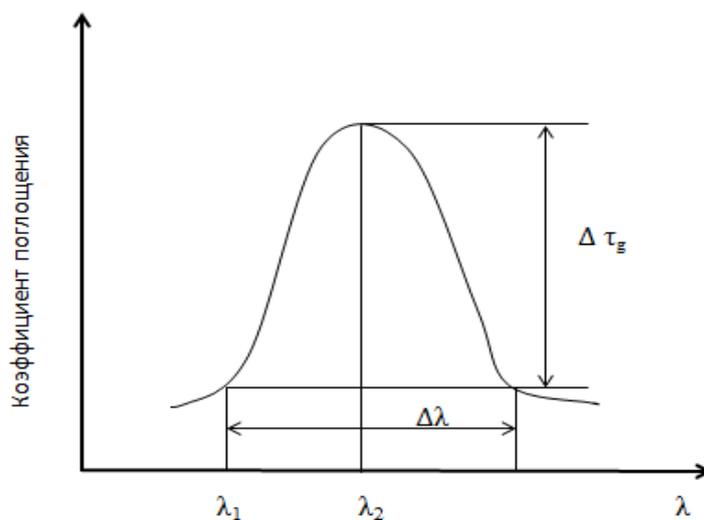


Рис.1. Выбор длины волны при двухволновых солнечно-фотометрических измерениях.

Очевидно, что основной недостаток двухволнового метода уменьшение полезного сигнала за счет сокращения влияния атмосферного аэрозоля на результат измерения.

Другой не менее важный метод исключения влияния аэрозоля на результат солнечно-фотометрических измерений является переход на трехволновый метод. В этом методе измерения проводятся на трех длинах волн ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$) (см. рис.2).

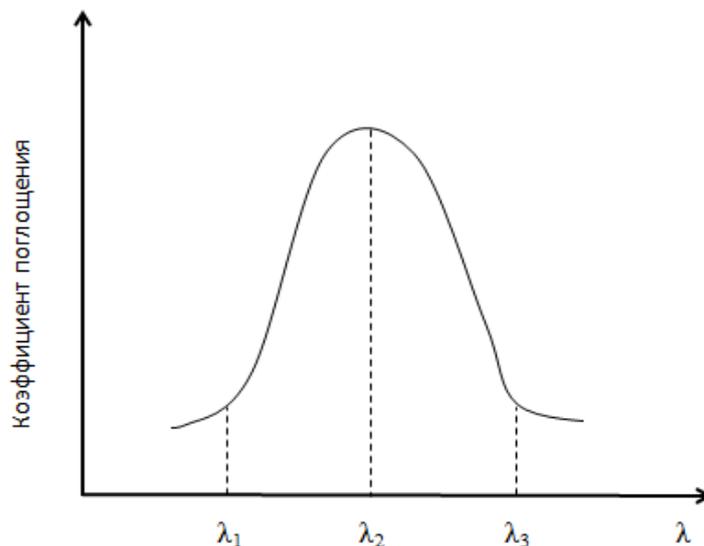


Рис.2. Выбор длин волн $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ при трехволновых солнечно-фотометрических измерениях.

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ КОРРЕКЦИЯ ВЛИЯНИЯ АТМОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ НА РЕЗУЛЬТАТ СОЛНЕЧНО-ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Так как на длинах волн λ_1 и λ_3 поглощение исследуемого газа ничтожное, то измерив на этих длинах волн оптическую толщину аэрозоля можно аппроксимировать оптическую толщину аэрозоля на длине волны λ_3 следующим образом:

$$\tau_a(\lambda_3)_{анр} = \frac{\tau_a(\lambda_1) + \tau_a(\lambda_3)}{2} \quad (7)$$

Далее осуществляется вычитание $\tau_a(\lambda_3)_{анр}$ от измеренной величины оптической толщины атмосферы $\tau_{ат}(\lambda_3)$:

$$\tau_{ат}(\lambda_3) = \tau_a(\lambda_3) + \tau_z(\lambda_3) \quad (8)$$

В этом случае получим:

$$\tau_r(\lambda_3) = \tau_t(\lambda_3) - \tau_a(\lambda_3)_{анр} \approx \tau_z(\lambda_3) \quad (9)$$

Недостаток вышеизложенного трехволнового метода неполная компенсация влияния аэрозоля из-за нелинейной зависимости $\tau_a(\lambda) = f(\lambda)$ в виде формулы Ангстрема (5). Существует некоторая разновидность трехволнового метода, названный трехволновым двухпараметрическим методом изложенный в [10]. В этом методе за счет введения специальных корректирующих коэффициентов удается несколько повысить точность измерений.

Следует отметить, что вышеизложенные методы базируются на линейно аддитивной модели оптической толщины атмосферного аэрозоля (5), которая является приблизительной моделью оптической толщины атмосферного аэрозоля. С учетом вышеизложенного актуализируется задача разработки более совершенных методов учета влияния атмосферного аэрозоля на результат проводимых солнечно-фотометрических измерений малых газов атмосферы.

ПРЕДЛАГАЕМЫЙ МЕТОД

Основу предлагаемого метода составляет известное положение о том, что оптическая толщина атмосферного аэрозоля по сравнению с формулой (5) может быть более точно вычислена по следующей формуле [11,12]:

$$\ln \tau(\lambda_i) = a_0 + a_1(\ln \lambda_i) + a_2(\ln \lambda_i)^2 \quad (10)$$

где λ_i – длина волны проводимых солнечно-фотометрических измерений $a_0, a_1, a_2 = \text{const}$.

Для определения оптической толщины атмосферного аэрозоля на любой длине волны λ_x достаточно определить текущие значения a_0, a_1 и a_2 . С этой целью предлагается провести измерения оптической толщины аэрозоля на трех длинах волн λ_1, λ_2 и λ_3 , и далее составить систему уравнений

$$\ln \tau(\lambda_1) = a_0 + a_1(\ln \lambda_1) + a_2(\ln \lambda_1)^2 \quad (11)$$

$$\ln \tau(\lambda_2) = a_0 + a_1(\ln \lambda_2) + a_2(\ln \lambda_2)^2 \quad (12)$$

$$\ln \tau(\lambda_3) = a_0 + a_1(\ln \lambda_3) + a_2(\ln \lambda_3)^2 \quad (13)$$

Решив систему уравнений (11)–(13) относительно a_0 , a_1 и a_2 можно вычислить оптическую толщину аэрозоля $\tau(\lambda_x)$ на любой длине волны λ_x по формуле:

$$\tau(\lambda_x) = \exp \left[a_{0p} + a_{1p}(\ln \lambda_x) + a_{2p}(\ln \lambda_x)^2 \right] \quad (14)$$

где a_{0p} , a_{1p} , a_{2p} – расчетные значения a_0 , a_1 , a_2 .

Для проверки верности вычисленных значений a_{0p} , a_{1p} и a_{2p} можно осуществить следующую процедуру проверки. Из выражения (10) напомним:

$$a_{2p}(\ln \lambda_x)^2 + a_{1p}(\ln \lambda_x) + a_0 - \ln \tau(\lambda_x) = 0 \quad (15)$$

Из выражения (15) получим:

$$(\ln \lambda_x)^2 + \frac{a_{1p}}{a_{2p}} \ln \lambda_x + \frac{a_0 - \ln \tau(\lambda_x)}{a_{2p}} = 0 \quad (16)$$

Решение квадратного уравнения имеет вид

$$(\ln \lambda_x) = -\frac{a_{1p}}{2a_{2p}} + \sqrt{\frac{a_{1p}^2}{4a_{2p}^2} - \frac{a_0 - \ln \tau(\lambda_x)}{a_{2p}}} \quad (17)$$

Следовательно,

$$\lambda_x = \exp \left(-\frac{a_{1p}}{2a_{2p}} + \sqrt{\frac{a_{1p}^2}{4a_{2p}^2} - \frac{a_0 - \ln \tau(\lambda_x)}{a_{2p}}} \right) \quad (18)$$

Таким образом, при выполнении условия (18) выносятся заключение о том, что коэффициент a_{0p} , a_{1p} и a_{2p} вычислены правильно.

Для осуществления коррекции результата солнечно-фотометрических измерений с учетом (14) составляется корректировочный коэффициент K в виде

$$K = \exp \left[\exp \left[a_{0p} + a_{1p}(\ln \lambda_x) + a_{2p}(\ln \lambda_x)^2 \right] \right] \quad (19)$$

В этом случае любой результат солнечно-фотометрических измерений на длине волны λ_x может быть скорректирован по формуле

$$E(\lambda_x)_k = K \cdot E_0(\lambda_x) \cdot \exp \left\{ -(\tau_a(\lambda_x) + \tau_2(\lambda_x)) \right\} \quad (20)$$

Покажем, что вышеприведенные результаты позволяют обобщить известную формулу Ангстрема. Логарифмируя (5) получим:

$$\ln \tau_a = \ln \beta - \alpha \cdot \ln \lambda \quad (21)$$

С учетом выражений (10) и (21) можно составить следующую систему уравнений:

$$a_0 + a_1(\ln \lambda_1) + a_2(\ln \lambda_1)^2 = \ln \beta - \alpha \cdot \ln \lambda_1 \quad (22)$$

$$a_0 + a_1(\ln \lambda_2) + a_2(\ln \lambda_2)^2 = \ln \beta - \alpha \cdot \ln \lambda_2 \quad (23)$$

Очевидно, что полученное решение относительно α и β будет иметь вид:

$$\alpha = \varphi(\lambda_1, \lambda_2, \beta) \quad (24)$$

$$\beta = \chi(\lambda_1, \lambda_2, \alpha) \quad (25)$$

Решение системы уравнений (24), (25) позволяет нам обобщить формулу (5) следующим образом

$$\tau_a = \chi \lambda^{-\varphi} \quad (26)$$

Таким образом, подтверждается фундаментальный характер формулы (5) как по форме, так и по содержанию.

ВЫВОДЫ

Рассмотрен и решен вопрос об исключении влияния аэрозоля на результат солнечно-фотометрических измерений малых газов атмосферы. λ_i ; $i = \overline{1,3}$. При этом использовано известное обобщение формулы Ангстрема в виде полиномиальной зависимости оптической толщины аэрозоля от логарифма длины волны.

В заключение сформулируем основные выводы проведенного исследования:

1. Проанализированы существующие методы устранения влияния атмосферного аэрозоля на результат солнечно-фотометрических измерений и указаны недостатки этих методов.
2. Предложен новый метод устранения влияния атмосферного аэрозоля на результат солнечно-фотометрических измерений малых газов атмосферы, в качестве основы которого использована обобщенная модель зависимости оптической толщины аэрозоля от длины волны в виде степенного многочлена.
3. Предложено обобщение известной формулы Ангстрема для вычисления оптической толщины аэрозоля. На основе указанного обобщения дана формула для аэрозольной коррекции солнечно-фотометрических измерений.

Список литературы

1. Barreto A., Cuevas E., Damiri B., Guirado C., Berkoff T., Berjon A. J., Hernandez Y., Almansa F., Gil M. A new method for nocturnal aerosol measurements with a lunar photometer prototype // *Atmos. Meas. Tech.* 2013. Vol. 6. pp. 585-598. <https://doi.org/10.5194/amt-6-585-2013>.
2. Campanelli M. T., Estelles V., Tomasi C., Nakajima T., Malvestuto V., Martinez-Lozano J. A. Application of the SKYRAD improved Langley plot method for the in situ calibration of CIMEL sun-sky photometers // *Appl. Optics.* 2007. Vol. 46. pp. 2688-2702.
3. Oneill N. T., Ignatov A., Holben B. N., Eck T. F. The lognormal distribution as a reference for reporting aerosol optical depth statistic; Empirical tests using multi-year? Multi-site AERONET sunphotometer data // *J. Geophys. Res.* 2003. Vol. 27. pp. 3333-3336.
4. Bodhaine B. A., Mondonca B. G., Harris J. M., Miller J. M. Seasonal variations in aerosols and atmospheric transmission at Mauna Loa Observatory // *J. Geophys. Res-Oceans.* 1981. Vol. 86. Pp. 7395-7398. <https://doi.org/10.1029/JCO86iCO8p07395>. Bodhaine B. A., Harris J. M., Ogren J. A.,

- Hofmann D. J. Aerosol optical properties at Mauna Loa Observatory : Longrange transport from Kuwait? // *Geophys. Res. Lett.* 1992. Vol. 19. pp. 581-584. <https://doi.org/10.1029/92GL00524> .
5. Holben B. N., Eck T. F., Slutsker I., Smirnov A., Sinyuk A., Schafer J., Giles D., Dubovnik O. AERONET's Version 2.0 quality assurance criteria. *Proc. SPIE.* 2006. 6408. 6408Q8. <https://doi.org/10.1117/12.706524> .
 6. Kazadsis S., Veselovskii I., Amiridis V., Grobner J., Suvorina A., Nyeki S., Gerasopoulos E., Kouremeti N., Taylor M., Tsekeri A., Wehrli C. Aerosol microphysical retrievals from precision filter radiometer direct solar radiation measurements and comparison with AERONET // *Atmos. Mea. Tech.* 2014. Vol. 7. Pp. 2013-2025. <https://doi.org/10.5194/amt-7-2013-2014> .
 7. Holben B. N., Eck T. F., Slutsker I., Tanre D., Buis J. P., Setzer A., Vermote E., Reagan J. A., Kaufman Y. J., Nakajima T., Lavenu F., Jankowak I., Smirnov A. AERONET – federate instrument network and data archive for aerosol characterization. *Remote Sens // Environ.* 1998. Vol. 66. pp. 1-16.
 8. Гущин, Г. К., Виноградов, Н. А. Суммарный озон в атмосфере. Ленинград : Гидрометеониздат, 1983. С. 223.
 9. Toledano C., Cachorro V. e., Berjon A., A. M de Frutos, Sorribas M., B. A. de la Morena, Goloub P. Aerosol optical depth and Angstrom exponent climatology at El Arenosillo AERONET site (Huelva, Spain).
 10. Асадов Х.Г., Сулейманов Ш.Т. Синтез трехволновых скорректированных измерителей малых компонент атмосферы в ультрафиолетовом диапазоне // *Метрология.* 2007. № 9. С. 3-7.
 11. Gregory L. Schuster, Oleg Dubovik, Brent N. Holben. Angstrom exponent and bimodal aerosol size distributions // *Journal of Geophysical Research.* 2006. Vol. 111. No. D07207. Doi:10.1029/2005JD006328.
 12. Kirti Soni , Sachchidanand Singh , Tarannum Bano , R. S. Tanwar & Shambhu Nath (2011) Wavelength Dependence of the Aerosol Angstrom Exponent and Its Implications Over Delhi, India, *Aerosol Science and Technology*, 45:12, 1488-1498, DOI: 10.1080/02786826.2011.601774

PARAMETRIC CORRECTION OF EFFECT OF ATMOSPHERIC AEROSOL ON RESULTS OF SUN PHOTOMETRIC MEASUREMENTS

Abdullayeva S. N.¹, Agaev F. F.²

¹Azerbaijan state University of oil and industry, Baku, Azerbaijan Republic

²National Aerospace Agency, Baku, Azerbaijan Republic

One of major problems upon utilization of sun photometers for measurements of low gases concentration in atmosphere is effect of atmospheric aerosol. This conclusion is direct result of Bouguer-Ber equation relative to ultraviolet zone of electromagnetic spectrum. Due to this reason different methods are used to remove such effect. The existing methods to remove effect of atmospheric aerosol on result of sun-photometric measurements are analyzed and shortages of these methods are defined. Existing two wavelength and three wavelength methods are based on approximated linear model of atmospheric aerosol optical depth. Taking into account the above said the task on development of modified methods for full accounting of effect of atmospheric aerosol on results of sun photometric measurements of atmospheric low gases may be considered as actual task. The known methods of parametric correction for removal of atmospheric aerosol effect on results of sun photometric measurements are considered. The new

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ КОРРЕКЦИЯ ВЛИЯНИЯ АТМОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ НА РЕЗУЛЬТАТ СОЛНЕЧНО-ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

method for removal of such effect is suggested based on generalized model of dependence of aerosol optical depth on wavelength in form of powered polynomial. The matter of suggested method is that non-variable coefficients of said polynomial could be calculated by solution of system composed of three equations formed by known modified Angstrom equation for chosen three wavelength. As a result of calculation of said constants the optical depth of aerosol can be calculated for any chosen wavelength. The generalization of Angstrom formula for calculation of aerosol optical depth is suggested. On the bases of such generalization the new formula for aerosol correction of sun photometric measurements is suggested.

Keywords: atmosphere; aerosol; correction; sun photometer; optical depth

References

1. Barreto A., Cuevas E., Damiri B., Guirado C., Berkoff T., Berjon A. J., Hernandez Y., Almansa F., Gil M. A new method for nocturnal aerosol measurements with a lunar photometer prototype. *Atmos. Meas. Tech.*, 2013, Vol. 6, Pp. 585-598. <https://doi.org/10.5194/amt-6-585-2013>.
2. Campanelli M. T., Estelles V., Tomasi C., Nakajima T., Malvestuto V., Martinez-Lozano J. A. Application of the SKYRAD improved Langley plot method for the in situ calibration of CIMEL sun-sky photometers. *Appl. Optics*, 2007, Vol. 46, Pp. 2688-2702.
3. Oneill N. T., Ignatov A., Holben B. N., Eck T. F. The lognormal distribution as a reference for reporting aerosol optical depth statistic; Empirical tests using multi-year? Multi-site AERONET sunphotometer data. *J. Geophys. Res.*, 2003, Vol. 27, Pp. 3333-3336.
4. Bodhaine B. A., Mondonca B. G., Harris J. M., Miller J. M. Seasonal variations in aerosols and atmospheric transmission at Mauna Loa Observatory. *J. Geophys. Res-Oceans*, 1981, Vol. 86, Pp. 7395-7398. <https://doi.org/10.1029/JCO86iCO8p07395>.
5. Bodhaine B. A., Harris J. M., Ogren J. A., Hofmann D. J. Aerosol optical properties at Mauna Loa Observatory : Longrange transport from Kuwait? *Geophys. Res. Lett.*, 1992. Vol. 19, Pp. 581-584. <https://doi.org/10.1029/92GL00524>.
6. Holben B. N., Eck T. F., Slutsker I., Smirnov A., Sinyuk A., Schafer J., Giles D., Dubovnik O. AERONET's Version 2.0 quality assurance criteria. *Proc. SPIE.* 2006, 6408. 6408Q8. <https://doi.org/10.1117/12.706524>.
7. Kazadsis S., Veselovskii I., Amiridis V., Grobner J., Suvorina A., Nyeki S., Gerasopoulos E., Kouremeti N., Taylor M., Tsekeri A., Wehrli C. Aerosol microphysical retrievals from precision filter radiometer direct solar radiation measurements and comparison with AERONET. *Atmos. Meas. Tech.*, 2014, Vol. 7, Pp. 2013-2025. <https://doi.org/10.5194/amt-7-2013-2014>.
8. Holben B. N., Eck T. F., Slutsker I., Tanre D., Buis J. P., Setzer A., Vermote E., Reagan J. A., Kaufman Y. J., Nakajima T., Lavenu F., Jankowak I., Smirnov A. AERONET – federate instrument network and data archive for aerosol characterization. *Remote Sens. Environ.*, 1998, Vol. 66, Pp. 1-16.
9. Gushhin G. K., Vinogradov N. A. Summarnyj ozon v atmosfere. L, Gidrometeoizdat, 1983, p. 223 (in Russian).
10. Toledano C., Cachorro V. e., Berjon A., A. M de Frutos , Sorribas M., B. A. de la Morena, Goloub P. Aerosol optical depth and Angstrom exponent climatology at El Arenosillo AERONET site (Huelva, Spain).
11. Asadov H.H., Sulejmanov Sh.T. Sintez trehvolnovykh skorrektirovannyh izmeritelej malyh komponent atmosfery v ul'trafiolotovom diapazone. *Metrologija*, 2007, № 9, pp. 3-7 (in Russian).
12. Gregory L. Schuster, Oleg Dubovik, Brent N. Holben. Angstrom exponent and bimodal aerosol size distributions. *Journal of Geophysical Research*, 2006, Vol. 111, No. D07207. Doi:10.1029/2005JD006328.
13. Kirti Soni , Sachchidanand Singh , Tarannum Bano , R. S. Tanwar & Shambhu Nath (2011) Wavelength Dependence of the Aerosol Angstrom Exponent and Its Implications Over Delhi, India, *Aerosol Science and Technology*, 45:12, 1488-1498, DOI: 10.1080/02786826.2011.601774

Поступила в редакцию 03.03.2020 г.