

Гидрометеорология и экология. 2022. № 67. С. 221—229.
Hydrometeorology and Ecology. 2022; (67): 221—229.

Научная статья
УДК 551.508.95:543.4
doi: 10.33933/2713-3001-2022-67-221-229

Оптимизация спектральных измерений малых газов атмосферы в видимом диапазоне длин волн

Хадиджа Сабир гызы Халилова

Национальная Академия Авиации, Баку, Азербайджанская Республика, x.xalilova@mail.ru

Аннотация. Рассмотрена задача оптимизации дневных зенитных интегрированных измерений атмосферных газов на некотором диапазоне длин волн на фоне атмосферного аэрозоля с учетом известной модификации формулы Ангстрема, данная Кингом и Бирном. Определено, что, при наличии некоторой функциональной связи между выбранной длиной волны измерений и оптической воздушной массой, т. е. временем измерений в течение дня, оптимизация измерений достигается при минимальной величине суммарной оптической толщины аэрозоля за период проводимых измерений, что равносильно повышению достоверности результатов проводимых измерений.

Ключевые слова: аэрозоль, оптическая толщина, оптимизация, атмосфера.

Для цитирования: Халилова Х.С. Оптимизация спектральных измерений малых газов атмосферы в видимом диапазоне длин волн // Гидрометеорология и экология. 2022. № 67. С. 221—229. doi: 10.33933/2713-3001-2022-67-221-229.

Original article

Optimization of spectral measurements of small atmospheric gases in the visible wavelength range

Khadidzha Sabir gyzy Khalilova

National Aviation Academy, Baku, Republic of Azerbaijan, x.xalilova@mail.ru

Summary. The paper considers the problem of optimizing daytime zenith integrated measurements of atmospheric gases over a certain wavelength range against the background of atmospheric aerosol, taking into account the known modification of the Angstrom formula given by King and Byrne. It has been taken into account that the coefficients available in this formula and characterizing the curvature of the characteristics of the dependence of the aerosol optical thickness on the wavelength depend on the time of day, the nature of the measurement zone (coast/continent; city /village), as well as the type of aerosol (fine, coarse). Considering the above, this article forms and solves the problem of optimizing multispectral measurements of small atmospheric gases throughout the day. During the specified time interval, the aerosol, characterized by high variability in time, introduces significant uncertainty in the results of the measurements. A method for optimizing multispectral daytime measurements of small atmospheric gases is proposed. Speaking of daytime measurements of the optical thickness of small atmospheric gases, we mean that such measurements can be carried out using a solar photometer or spectrometer. We assume that the results of the measurements carried out have a random multiplicative error due to the aerosol of the atmosphere. If

some functional relationship exists between the selected measurement wavelength and the optical air mass, i.e. the measurement time during the day, measurement optimization has been determined to be achieved at the minimum value of the total optical thickness of the aerosol during the measurement period, which is equivalent to increasing reliability of the measurement results.

Keywords: aerosol, optical depth, optimization, atmosphere.

For citation: Khalilova H.S. Optimization of spectral measurements of small atmospheric gases in the visible wavelength range. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2022; (67): 221—229. [In Russian]. doi: 10.33933/2713-3001-2022-67-221-229.

Введение

Хотя концентрация малых газов (углекислый, водяной пар, озон, метан и др.) составляет сотые доли процента по сравнению с основными газами атмосферы, они оказывают значительное влияние на климат, радиационную структуру и химическую активность атмосферы. Например, можно указать на защитную функцию стратосферного озона, который защищает все живое на Земле от губительного воздействия ультрафиолетовой радиации Солнца.

Дистанционные измерения всех малых газов в атмосфере в основном осуществляются по спектральному признаку на основе методов адсорбционной, отражательной спектроскопии. Наземные измерения общего количества различных малых газов в атмосфере проводятся с помощью спектрометров или солнечных фотометров. Основным препятствием при проведении наземных измерений малых газов являются аэрозоли и облака. Интегрированные мульти- и гиперспектральные измерения газов с малой концентрацией обычно осуществляется последовательным подключением интегрированных сигналов спектральных каналов на вход цифрового измерителя. Большое количество спектральных каналов и достаточно большое время интегрирования слабых сигналов приводит к большому временному интервалу, требуемому для проведения всех измерений на указанном интервале длин волн. В течение указанного интервала времени аэрозоль, характеризующийся высокой изменчивостью во времени, вносит значительную неопределенность в результаты проводимых измерений [1—3]. Для оценки такой неопределенности атмосферный аэрозоль в настоящее время изучается с привлечением наземных, самолетных и спутниковых средств, оснащенных различными спектро-радиометрами, а также солнечными фотометрами.

В качестве примера можно указать всемирную наземную сеть «AERONET», состоящую из 600 наземных автоматических измерительных станций [4], созданных на базе солнечного фотометра «CIMEL CE 318». Получаемые с помощью этих измерителей результаты позволяют изучать влияние аэрозоля на величину оптической радиации, поступающей на поверхность Земли, создавать физико-химические модели атмосферы, осуществлять валидацию спутниковых данных и проводить атмосферную коррекцию этих данных.

В аэрозольных измерениях в настоящее время используется разнообразный арсенал измерительных средств, к которым можно отнести следующие: вышеупомянутый солнечный / небесный радиометр CIMEL CE 318 (наземные измерительные сети AERONET, AEROCAN, PHOTONS, RIMA) [5], солнечный / небесный радиометр PREDE POMOZ (наземный измерительный сеть SKYNET) [6], прецизионный

фильтровый радиометр PFR, созданный в Швеции (PMOD/WRC) [7], радиометры SPO1A и SPO2, используемые в Национальной сети Австралии и др.

Основными параметрами, измеряемыми в глобальной сети AERONET, являются оптическая толщина аэрозоля и водяной пар в атмосфере. Цель статьи заключается в рассмотрении возможности оптимизации длительных многоспектральных измерений малых газов атмосферы путем выбора оптимальной функциональной связи между длиной волны проводимых измерений и оптической воздушной массой.

Методы исследования

В общем случае, измерения малых газов атмосферы осуществляются на основе закона Бугера—Бера, математическое выражение которого применительно к видимой области в упрощенном виде имеет вид:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp[-m(\tau_{\text{аэп}} + \tau_2)], \quad (1)$$

где $I(\lambda)$ — оптический сигнал на входе измерителя; $I_0(\lambda)$ — солнечная постоянная применительно к длине волны λ ; m — оптическая воздушная масса, зависящая от времени дня; $\tau_{\text{аэп}}$ — оптическая толщина аэрозоля; τ_2 — оптическая толщина измеряемого газа.

Далее рассматривается случай, когда длина волны λ изменяется в зависимости от времени дня, или то же самое, от m . Выражение (1) представим в виде:

$$I(\lambda(m)) = I_0(\lambda(m)) \exp[-m\tau_{\text{аэп}}(\lambda(m))] \exp[-m\tau_2(\lambda(m))]. \quad (2)$$

В выражении (2) применительно к видимой области множитель $\exp[-m\tau_{\text{аэп}}(\lambda(m))]$ можно представить как пропускание атмосферы. С позиций измерительной техники пропускание атмосферы в данном случае определяет мультипликативную погрешность $I(\lambda(m))$. С этой точки зрения, при проведении длительных дневных атмосферных измерений суммарный эффект аэрозольного фактора нестабильности пропускания атмосферы может быть учтен следующей логарифмической оценкой:

$$y = \ln \tau_{\text{аэп}}(\lambda(m)).$$

Хорошо известно, что базовым для измерения оптической толщины аэрозоля является формула Ангстрема [9]:

$$\tau_a(\lambda) = \beta \cdot \lambda^{-\alpha}, \quad (3)$$

где β — коэффициент мутности атмосферы Ангстрема, определяемый как $\beta = \tau_a(\lambda)$ при $\lambda = 1,0$ мкм; α — показатель Ангстрема.

Несмотря на исходное предположение о постоянстве значения α , исследования, проведенные в [10, 12], показали, что получаемое из (1) выражение

$$\ln \tau_a(\lambda) = \ln \beta - \alpha \ln \lambda \quad (4)$$

на практике себя не оправдывает, поэтому линия, показывающая зависимость $\ln \tau_a(\lambda)$ от $\ln \lambda$, искривляется.

Аналогичные экспериментальные результаты легли в основу теоретических изысканий, проведенных в [13]. Согласно [13], зависимость между $\ln \tau_a(\lambda)$ и $\ln \lambda$ может быть аппроксимирована более точно следующим эмпирическим выражением:

$$\ln \tau_a(\lambda) = \alpha_0 + \alpha_1 \ln \lambda + \alpha_2 (\ln \lambda)^2. \quad (5)$$

Согласно [13], коэффициент α_2 характеризует кривизну линий. И также кривизна этих линий является показателем размеров аэрозольных частиц. Отрицательная кривизна линий показывает доминирование в атмосфере мелкодисперсного аэрозоля. Положительная кривизна показывает доминирование крупнодисперсного аэрозоля [14].

Согласно [14], условие доминирования крупнодисперсного аэрозоля имеет вид (размер аэрозоля > 1 мкм):

$$(\alpha_2 - \alpha_1) < 1. \quad (6)$$

Условие доминирования мелкодисперсного аэрозоля (размер аэрозоля < 1 мкм):

$$(\alpha_2 - \alpha_1) > 2. \quad (7)$$

При

$$2 > (\alpha_2 - \alpha_1) > 1 \quad (8)$$

считается, что большинство аэрозольных частиц имеет размер < 1 мкм.

Вместе с тем, величина $\tau_a(\lambda)$, как и показатель Ангстрема, подвержены дневным изменениям. Согласно [15], дневное изменение показателя Ангстрема различно по двум признакам:

- 1) «берег» или «континент»;
- 2) «город» или «село».

В соответствии с результатами исследований, изложенных в [15], на различных характерных зонах, соответствующих вышеприведенным двум признакам, в городских береговых и континентальных зонах, наблюдается более плавное дневное изменение. Что касается сельской зоны, то в этом случае изменение α носит более нестабильный характер.

С учетом вышеизложенного в настоящей статье формируется и решается задача оптимизации многоспектральных измерений малых газов атмосферы в течение всего дня.

Говоря о дневных измерениях оптической толщины малых газов атмосферы, нужно иметь в виду, что такие измерения могут быть проведены с помощью солнечного фотометра или спектрометра. Считаем, что результаты проводимых измерений имеют случайную мультипликативную погрешность из-за аэрозоля атмосферы. В общем случае применительно к формуле (1) оптическую толщину атмосферного аэрозоля обозначим как

$$\tau_a = f(m, \lambda, a, \beta), \quad (9)$$

где m — оптическая воздушная масса, в простейшем случае определяемая как $\text{arccos}(z)$; z — зенитный угол Солнца.

Так как зенитный угол z является функцией времени, то и оптическая воздушная масса также изменяется во времени. Таким образом, изменение показателя Ангстрема во времени также означает изменение α по оптической воздушной массе. Следовательно, формулу (5) можно переписать как:

$$\ln \tau_a(\lambda) = \alpha_0 + \alpha_1(m) \ln \lambda + \alpha_2(m)(\ln \lambda)^2. \quad (10)$$

В общем виде оптимизационная задача формулируется в следующем виде: минимизировать целевую функцию с учетом ограничений на управляемые переменные.

Ограничения в данном случае формируются следующим образом:

- измерения τ выполняются в течение всего дня на разных длинах волн;
- длина волны проводимых измерений является функцией m , т. е. измерения в течение дня проводятся на разных длинах волн.

Рассмотрим следующую сумму:

$$\gamma = \sum_{i=1}^n \ln \tau_a(\lambda) = \sum_{i=1}^n \left[\alpha_0 + \alpha_{1,i}(m) \ln \lambda(m) + \alpha_{2,i}(m) [\ln \lambda(m)]^2 \right]. \quad (11)$$

При $n \rightarrow \infty$ сумму (11) можно представить в виде интеграла:

$$\chi = \int_1^{m_{\max}} \left[\alpha_0 + \alpha_1(m) \ln \lambda(m) + \alpha_2(m) [\ln \lambda(m)]^2 \right] dm, \quad (12)$$

где χ — условное обозначение целевого функционала.

Выражение (12) является целевым функционалом рассматриваемой оптимизационной задачи, цель которой является вычисление такой оптимальной функции $\lambda(m)$, при которой целевой функционал (12) достиг бы минимальной величины. Данная задача является типичной задачей вариационного исчисления, для решения которой следует вычислить следующее уравнение [16]:

$$\frac{d \left\{ \alpha_0 + \alpha_1(m) \ln \lambda(m) + \alpha_2(m) [\ln \lambda(m)]^2 \right\}}{d\lambda(m)} = 0. \quad (13)$$

Из условия (13) получаем:

$$\frac{\alpha_1(m)}{\lambda(m)} + \frac{2\alpha_2(m) \ln \lambda(m)}{\lambda(m)} = 0. \quad (14)$$

Из выражения (14) находим:

$$\alpha_1(m) = 2\alpha_2(m) \ln \left(\frac{1}{\lambda(m)} \right). \quad (15)$$

Из выражения (15) имеем:

$$\ln \left(\frac{1}{\lambda(m)} \right) = \frac{\alpha_1(m)}{2\alpha_2(m)} \quad (16)$$

или

$$\lambda(m) = \exp\left[-\frac{\alpha_1(m)}{2\alpha_2(m)}\right]. \quad (17)$$

Таким образом, при решении (17) целевой функционал (12) достигает экстремальной величины. Определим тип экстремума. Условие достижения максимума, согласно [16], имеет вид:

$$\chi_1 = \frac{d^2 \left\{ \alpha_0 + \alpha_1(m) \ln \lambda(m) + \alpha_2(m) [\ln \lambda(m)]^2 \right\}}{d\lambda(m)} < 0, \quad (18)$$

где χ_1 — условное обозначение второй производной интегранта, т. е. подинтегрального выражения в (12) по $\lambda(m)$.

С учетом (18) получим:

$$\gamma_1 = -\frac{\alpha_1(m)}{\lambda^2(m)} + 2\alpha_2(m) \left[\frac{1}{\lambda^2(m)^2} - \frac{\ln \lambda(m)}{\lambda^2(m)} \right]. \quad (19)$$

Таким образом, условие достижения максимума имеет вид:

$$\alpha_1(m) + 2\alpha_2(m) \ln \lambda(m) > 2\alpha_2(m) \quad (20)$$

или

$$\lambda(m) = \exp\left[1 - \frac{\alpha_1(m)}{2\alpha_2(m)}\right]. \quad (21)$$

Сравнивая условия (17) и (21), приходим к выводу, что условие (21) никогда не выполняется.

Следовательно, предлагаемый метод измерений с выбором длины волны по формуле (17) в зависимости от величины m может привести к достижению минимального воздействия аэрозольной нестабильности на результат измерений.

В результате проведенной оптимизации по критерию достижения минимума интегрированной в некотором диапазоне оптической воздушной массы оптической толщины атмосферного аэрозоля получено выражение оптимальной зависимости длины волны от оптической воздушной массы, при которой критерий оптимизации достигает минимума. Это обеспечивает измерение малых газов с высокой достоверностью в течение дня.

Приведем конкретный пример использования предлагаемого метода.

Допустим, что в результате проведенного анализа получено три решения в виде:

$$\lambda_1(m) = \exp\left[-\frac{\alpha_1(m)}{2\alpha_2(m)}\right], \quad (22)$$

$$\lambda_2(m) = \exp\left[-\frac{\alpha_1(m)}{\alpha_2(m)}\right], \quad (23)$$

$$\lambda_3(m) = \exp \left[-\frac{\alpha_1(m)}{4\alpha_2(m)} \right]. \quad (24)$$

Так как выражение (22) по величине больше значения (23) и меньше (24), то верность предложенного метода можно доказать, если значения $\ln \tau_a(\lambda)$, вычисленные по формуле (10) с учетом (22), (23) и (24) при (22), достигнем минимума. Проведенные вычисления показывают, что это условие выполняется.

При условии (22) получено:

$$\ln \tau_a(\lambda) = a_0 - \frac{\alpha_1(m)^2}{4\alpha_2(m)}. \quad (25)$$

При условии (23) получено:

$$\ln \tau_a(\lambda) = a_0. \quad (26)$$

При условии (24) получено:

$$\ln \tau_a(\lambda) = a_0 - \frac{3\alpha_2(m)^2}{16\alpha_2(m)}. \quad (27)$$

Как видно из выражений (25), (26), (27), при условии (22) получается минимальная величина $\ln \tau_a(\lambda)$, а следовательно и целевого функционала (12).

Таким образом, верность предложенного метода можно считать доказанной.

Заключение

Сформулирована и решена задача оптимизации длительных дневных измерений малых газов атмосферы в видимом диапазоне длин волн. Для анализа влияния атмосферного аэрозоля на достоверность результатов измерений используется модификация известной формулы Ангстрема, данная Кингом и Бирном. При этом учитываются, что коэффициенты, входящие в эту формулу и характеризующие кривизну характеристики $\ln \tau_a(\lambda) = f(\ln \lambda)$, зависят от таких параметров, как время дня, характер зоны проводимых измерений (берег / континент; город / село), тип аэрозоля (мелкодисперсный, крупнодисперсный). Согласно полученным результатам, минимизация влияния атмосферного аэрозоля на достоверность проводимых измерений малых газов может быть достигнута при выявленном порядке оптимального выбора длины волны измерений в зависимости от оптической воздушной массы.

Список литературы

1. *Braslau N., Dave J.V.* Effect of aerosols on the transfer of solar emery through realistic model atmospheres. Partly absorbing aerosols // *J. Appl. Meteor.* 1973. Vol. 12. P. 616—619.
2. *Grassi H.* Calculated circumsolar radiations as a function of aerosol type, field of view, wavelength and optical depth // *Appl. Opt.* 1971. Vol. 10. P. 2542—2543.
3. *Kitakoga S., Inoue Y., Kuji M., Hayasaka T.* Characteristic of naerosol properties of haze and yellow sand examined from SKYNET measurements over East China Sea // *J. Meteor. Soc. Japan.* 2014. Vol. 92A. P. 57—69.

4. Holben B.N., Eck T.I., Slutsker I., Tanre D., Buis J.P., Setzer A., Vermote E., Reagan J.A., Kaufman Y.J., Nakajima T., Lavenu F., Jankowiak I., Smirnov A. AERONET – a federate instrument network and data archive for aerosol characterization // Remote Sens. Environ. 1998. Vol. 66(1). P. 1—16.
5. Dubovik O., King M.D. A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements // Journal of Geophysical Research. 2000. Vol. 105(D16). P. 20673—20696.
6. Ki D.H., Sohn B.J., Nakajima T., Takamura T., Takemura T., Choi B.C., Yoon S.C. Aerosol optical properties over east Asia determined from ground – based sky radiation measurements // Journal of Geophysical Research. 2004. Vol. 109. D02209. doi: 10.1029/2003JD003387.
7. Wehrli C. Calibrations of filter radiometers for determination of atmospheric optical depth // Metrologia. 2000. Vol. 37. P. 419—422. doi: 10.1088/0026-1394/37/5/16.
8. Mitchell R.M., Forgan B.W. Aerosol measurements in Australian outback: intercomparison of sun photometers // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2003. Vol. 20. P. 54—66.
9. Angstrom A.K. On the atmospheric transmissions of sun radiation and on the dust in the air // Geogr. Ann. 1929. Vol. 12. P. 130—159.
10. Eck T.F., Holben B.N., Reid J.S., Dubovik O., Smirnov A., O'Neill N.T., Slutsker I., Kinne S. Wavelength dependence of the optical depth of biomass burning, urban and desert dust aerosols // Journal of Geophysical Research. 1999. Vol. 104. No. D24. P. 31,333—31,349.
11. Junge C.E. The size distribution and aging of natural aerosols as determined from electrical and optical measurements in the atmosphere // J. Meteorol. 1955. Vol. 12. P. 13—25.
12. Eck T.F., Holben B.N., Dubovik O., Smirnov A., Slutsker I., Lobert J.M., Ramanathan V. Column-integrated aerosol optical properties over the Maldives during the northeast monsoon for 1998—2000 // Journal of Geophysical Research. 2001. Vol. 106. No. D22. P. 28,555—28,566.
13. King M.D., Byrne D.M. A method for inferring total ozone content from spectral variation of total optical depth obtained with a solar radiometer // J. Atmos. Sci. 1976. Vol. 33. P. 2242—2251.
14. Schuster G.L., Dubovik O., Holben B.N. Angstrom exponent and bimodal aerosol size distributions // J. Geophys. Res. 2006. Vol. 111. P. 07207. doi: 10.1029/2005JD006328.
15. Lennartson E.M., Wang J., Gu J., Garcia L.C., Ge C., Gao M., Choi M., Saide P.E., Carmichael G.R., Kim J., Janz S.J. Diurnal variation of aerosol optical depth and PM_{2.5} in South Korea: a synthesis from AERONET, satellite (GOCI), KORUS-AQ observation and the WRF-Chem model // Atmos. Chem. Phys. 2018. Vol. 18. P. 15125—15144. doi: 10.5194/acp-18-15125-2018.
16. Эльсольц Л.Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. М.: Наука, 1974. 432 с.

References

1. Braslau N., Dave J.V. Effect of aerosols on the transfer of solar energy through realistic model atmospheres. Partly absorbing aerosols. J. Appl. Meteor. 1973, 12: 616—619.
2. Grassi H. Calculated circumsolar radiations as a function of aerosol type, field of view, wavelength and optical depth. Appl. Opt. 1971, 10: 2542—2543.
3. Kitakoga S., Inoue Y., Kuji M., Hayasaka T. Characteristic of aerosol properties of haze and yellow sand examined from SKYNET measurements over East China Sea. J. Meteor. Soc. Japan, 2014, 92A: 57—69.
4. Holben B.N., Eck T.I., Slutsker I., Tanre D., Buis J.P., Setzer A., Vermote E., Reagan J.A., Kaufman Y.J., Nakajima T., Lavenu F., Jankowiak I., Smirnov A. AERONET — a federate instrument network and data archive for aerosol characterization. Remote Sens. Environ. 1998, 66(1): 1—16.
5. Dubovik O., King M.D. A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements. Journal of Geophysical Research. 2000, 105(D16): 20673—20696.
6. Ki D.H., Sohn B.J., Nakajima T., Takamura T., Takemura T., Choi B.C., Yoon S.C. Aerosol optical properties over east Asia determined from ground – based sky radiation measurements. Journal of Geophysical Research. 2004, 109, D02209. doi: 10.1029/2003JD003387.
7. Wehrli C. Calibrations of filter radiometers for determination of atmospheric optical depth. Metrologia. 2000, 37: 419—422. doi: 10.1088/0026-1394/37/5/16.

8. Mitchell R.M., Forgan B.W. Aerosol measurements in Australian outback: intercomparison of msun photometers. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2003, 20: 54—66.
9. Angstrom A.K. On the atmospheric transmissions of sun radiation and on the dust in the air. *Georg. Ann.* 1929, 12: 130—159.
10. Eck T.F., Holben B.N., Reid J.S., Dubovik O., Smirnov A., O'Neill N.T., Slutsker I., Kinne S. Wavelength dependence of the optical depth of biomass burning, urban and desert dust aerosols. *Journal of Geophysical Research*. 1999, 104, D24: 31,333—31,349.
11. Junge C.E. The size distribution and aging of natural aerosols as determined from electrical and optical measurements in the atmosphere. *J. Meteorol.* 1955, 12: 13—25.
12. Eck T.F., Holben B.N., Dubovik O., Smirnov A., Slutsker I., Lobert J.M., Ramanathan V. Column-integrated aerosol optical properties over the Maldives during the northeast monsoon for 1998—2000. *Journal of Geophysical Research*. 2001, 106, D22: 28,555—28,566.
13. King M.D., Byrne D.M. A method for inferring total ozone content from spectral variation of total optical depth obtained with a solar radiometer. *J. Atmos. Sci.* 1976, 33: 2242—2251.
14. Schuster G.L., Dubovik O., Holben B.N. Angstrom exponent and bimodal aerosol size distributions. *J. Geophys. Res.* 111. 07207. doi: 10.1029/2005JD006328, 2006.
15. Lennartson E.M., Wang J., Gu J., Garcia L.C., Ge C., Gao M., Choi M., Saide P.E., Carmichael G.R., Kim J., Janz S.J. Diurnal variation of aerosol optical depth and PM_{2.5} in South Korea: a synthesis from AERONET, satellite (GOCI), KORUS-AQ observation and the WRF-Chem model. *Atmos. Chem. Phys.* 2018, 18: 15125—15144. doi: 10.5194/acp-18-15125-2018.
16. Elsgolts L.E. *Differentsial'nyye uravneniya i variatsionnoye ischisleniye*. Differential equations and variational calculus. Moscow: Science, 1974: 432 p.

Информация об авторе

Халилова Хадиджа Сабир гызы, преподаватель, Национальная Академия Aviации, Баку, Азербайджанская Республика, x.xalilova@mail.ru.

Information about author

Khalilova Khadidzha Sabir gyzy, Lecturer, National Aviation Academy, Baku, Republic of Azerbaijan

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 16.12.2021.

Принята к публикации после доработки 20.04.2022.

The article was received on 16.12.2021.

The article was accepted after revision on 20.04.2022.