



УДК 551.583

**ОБ ЭКСТРЕМАЛЬНОМ ХАРАКТЕРЕ ИНТЕГРИРОВАННОЙ ВЕЛИЧИНЫ АЛЬБЕДО
ОДНОКРАТНОГО РАССЕЯНИЯ АТМОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ**Х. Г. Асадов¹, Ф. Г. Аббасзаде¹¹ Национальное аэрокосмическое агентство, г.Баку, Азербайджанская Республика

Решается обратная задача восстановления высотного профиля альбеда однократного рассеяния аэрозоля по данным наземных фотометрических измерений интегральной оптической толщины аэрозоля при условии минимизации интегрального по высоте альбеда однократного рассеяния атмосферного аэрозоля. Решение данной задачи может дать ответ на вопрос о потенциальных возможностях повышения переноса атмосферой солнечной оптической энергии на Землю. Анализ проведен на базе исходного положения о том, что (а) загрязнение атмосферы имеет гомогенный характер, (б) распределение коэффициента экстинкции по высоте подчиняется закону Гаусса, (в) интеграл коэффициента экстинкции атмосферного аэрозоля по высоте равен оптической плотности атмосферного аэрозоля, определяемого с земли с помощью солнечного фотометра. Выдвинута предположение о том, что существует такой оптимальный вид зависимости коэффициента экстинкции от высоты при котором интегральная величина SSA (single scattering albedo-альбеда однократного рассеяния), достигает минимума. Показано, что указанный минимум достигается в том случае, если высотный профиль коэффициента экстинкции $\sigma_{sp}(z)$ в масштабированном виде повторяет профиль, определяемый квадратным корнем из коэффициента рассеяния $\sqrt{\sigma_{sp}(z)}$.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АЛЬБЕДО ОДНОКРАТНОГО РАССЕЯНИЯ; АЭРОЗОЛЬ; ОПТИМИЗАЦИЯ; ФУНКЦИОНАЛ; ЭКСТИНКЦИЯ**DOI:** 10.54252/2304-7380_2021_31_11**1. ВВЕДЕНИЕ**

Хорошо известно, что аэрозоль может существенным образом влиять на перенос солнечного излучения в атмосфере Земли. Степень влияния аэрозоля на прохождение солнечной радиации зависит от таких показателей как оптическая толщина аэрозоля (AOT) и альбеда однократного рассеяния (SSA). Согласно [1] точная оценка показателя SSA аэрозоля является фундаментальной задачей атмосферно – климатических исследований. Следует отметить, что существует большое количество методов для определения SSA. Так, например, в работе [2] был предложен использование измерений оптического радиационного широкополосного потока для определения SSA. В работе [3] был предложен метод, основанный на измерениях спектральных оптических излучений Солнца и неба. В работе [4] была рассмотрена возможность использования спектральной прямой солнечной радиации и широкополосных солнечных радиационных измерений. Использование в этих целях ультрафиолетовой радиации было предложено в работе [5]. Возможность использования спутниковых измерений в этих целях были рассмотрена в работах [6-12]. Однако, во всех этих и других работах рассматривалась исключительно задача об определении SSA атмосферного аэрозоля, без анализа возможности синтеза оптимальной высотной структуры распределения основных оптических показателей, тесно связанных SSA, при которых интегрированная по высоте SSA достиг бы минимума. Такая постановка задачи и ее решение явилось бы существенным вкладом в теорию и практику

радиационно – аэрозольных связей, так как решение данной задачи даст ответ на вопрос о потенциальных возможностях повышения переноса атмосферой солнечной оптической энергии на Землю.

2. ПРЕДЛАГАЕМЫЙ МЕТОД

В общем случае, аэрозоль ослабляет солнечную радиацию как прямым, так и косвенным путем. В прямом случае аэрозоль поглощает и рассеивает солнечные лучи. В косвенном случае аэрозоль увеличивает рассеивающую способность облаков и также поглощает солнечную радиацию [13]. В дальнейшем рассматривается только первый механизм ослабления Солнечного излучения атмосферным аэрозолем применительно к некоторой модели аэрозольной загрязненности на фиксированной длине волны. Рассматриваемая далее модель аэрозольной загрязненности атмосферы заключается в следующем:

1. Высотное распределение коэффициента экстинкции подчиняется закону Гаусса.
2. Аэрозольная загрязненность атмосферы имеет гомогенный характер, т.е. в атмосфере преимущественно имеется только один тип аэрозоля.

В подтверждение первого пункта рассматриваемой модели можно рассмотреть единые графики зависимости коэффициента экстинкции от высоты для выбранного типа аэрозоля показанные на рис. 1 [14]. Эти кривые с точностью 20 процентов совпадают с левым крылом семейства кривых Гаусса распределения коэффициента экстинкции по высоте. Что касается второго пункта рассматриваемой модели, то преимущественное загрязнение атмосферы одним типом аэрозоля не является редкостью.

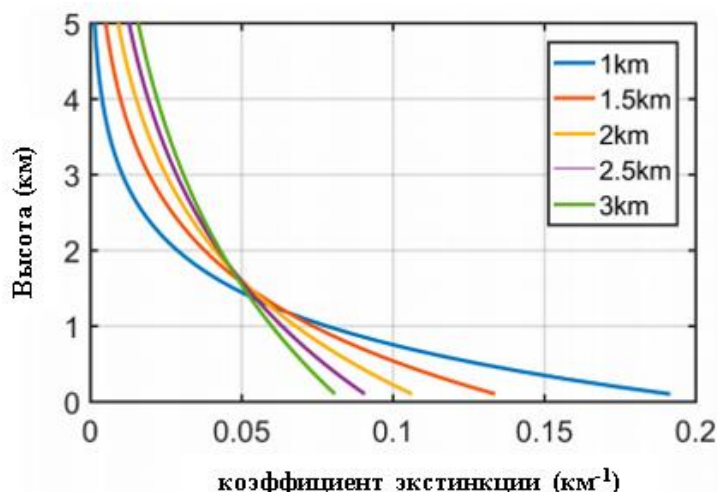


Рис. 1. Экспоненциально уменьшающиеся высотные профили коэффициента экстинкции атмосферного аэрозоля. В правом верхнем угле указаны значения с.к.о. показателя высоты. [14]

Как было отмечено выше, одним из показателей, характеризующих ослабление солнечного излучения атмосферным аэрозолем является альbedo однократного рассеяние $\omega_a(\lambda)$ определяемое как [14]:

$$\omega_a(\lambda) = \frac{\sigma_{sp}(\lambda)}{\sigma_{cp}(\lambda)} \quad (1)$$

где $\sigma_{sp}(\lambda)$ – коэффициент рассеяния аэрозоля; $\sigma_{cp}(\lambda)$ – коэффициент экстинкции аэрозоля, определяемый как

$$\sigma_{cp} = \sigma_{ap}(\lambda) + \sigma_{sp}(\lambda) \quad (2)$$

где $\sigma_{ap}(\lambda)$ – коэффициент абсорбции аэрозоля.

Известно, что оптическая толщина аэрозоля $\tau_a(\lambda)$ определяется по следующей формуле [14]:

$$\tau_a(\lambda) = \int_0^{TOA} \sigma_{cp}(\lambda) dz = \int_0^{TOA} (\sigma_{ap}(\lambda) + \sigma_{sp}(\lambda)) dz \quad (3)$$

где TOA – верхняя граница атмосферы. При этом $\tau_a(\lambda)$ на фиксированной длине волны λ_0 может быть измерен солнечным фотометром.

Далее считаем, что все предполагаемые операции проводятся на фиксированной длине волны λ_0 где влияние релеевского рассеяния и поглощения Шапюи озона незначительно, и формулы (1), (2), (3) верны для любой величины z .

Следовательно для фиксированной высоты z можно ввести следующий показатель

$$W_a(z) = \frac{\sigma_{sp}(z)}{\sigma_{cp}(z)} \quad (4)$$

С учетом Гауссовой аппроксимации графиков, представленных на рис. 1, площади, остающиеся под этими кривыми, согласно принятой модели с точностью 20 процентов равны друг – другу. С другой стороны, известно, что оптическая толщина атмосферного аэрозоля, измеренная наземными средствами может быть определена в качестве интеграла коэффициента экстинкции по высоте.

Следовательно, имеем

$$\tau_a(\lambda) = \int_0^{TOA} \sigma_{cp}(z) dz \quad (5)$$

С другой стороны, с учетом гауссова распределения в принятой модели конкретного типа аэрозоля имеем

$$\tau_a(\lambda) = \int_0^{TOA} \sigma_{cp}(z) dz = C \quad (6)$$

где $C = \text{const}$.

Введем на рассмотрение новый показатель, χ , определяющий интегральную величину $W_a(z)$

$$\chi = \int_0^{TOA} W_a(z) dz \quad (7)$$

С учетом (7) и (4) получим

$$\chi = \int_0^{TOA} \frac{\sigma_{sp}(z)}{\sigma_{cp}(z)} dz \quad (8)$$

Задача оптимизации формируется следующим образом: Следует вычислить оптимальную функцию $\sigma_{cp}(z)$ при которой нижеуказанный функционал цели достигает минимума

$$F = \int_0^{TOA} \frac{\sigma_{sp}(z)}{\sigma_{cp}(z)} dz + \gamma \left[\int_0^{TOA} \sigma_{cp}(z) dz - C \right] \quad (9)$$

где γ – множитель Лагранжа.

3. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ МИНИМИЗАЦИИ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ВЕЛИЧИНЫ SSA

Согласно [15], оптимальная функция $\sigma_{cp}(z)$ приводящая функционал F к его экстремальной величине, должна удовлетворять условию

$$\frac{d \left\{ \frac{\sigma_{sp}(z)}{(\sigma_{cp}(z))} + \gamma \cdot \sigma_{cp}(z) \right\}}{d(\sigma_{cp}(z))} = 0 \quad (10)$$

Из выражения (10) находим

$$\frac{-\sigma_{sp}(z)}{(\sigma_{cp}(z))^2} + \gamma = 0 \quad (11)$$

Из (11) имеем:

$$(\sigma_{cp}(z)) = \sqrt{\frac{\sigma_{sp}(z)}{\gamma}} \quad (12)$$

С учетом (6) и (12) находим:

$$\int_0^{TOA} \sqrt{\frac{\sigma_{sp}(z)}{\gamma}} dz = C \quad (13)$$

Из (13) получим

$$\gamma = \frac{1}{C^2} \left[\int_0^{TOA} \sqrt{\sigma_{sp}(z)} dz \right]^2 \quad (14)$$

Учитывая (14) в (11) получим

$$\sigma_{cp}(z) = \frac{C \sqrt{\sigma_{sp}(z)}}{\int_0^{TOA} \sqrt{\sigma_{sp}(z)} dz} \quad (15)$$

Так как производная (11) по $\sigma_{sp}(z)$ оказывается положительной величиной то согласно базовым положениям функционального анализа [15], при условии (15) показатель F т.е. интегрированная величина альbedo однократного рассеяния достигает минимума,

Приняв в (16)

$$\frac{C}{\int_0^{TOA} \sqrt{\sigma_{sp}(z)} dz} = C_1 \quad (16)$$

Получим

$$\sigma_{cp}(z) = C_1 \cdot \sqrt{\sigma_{sp}(z)} \quad (17)$$

Таким образом, условие $F \rightarrow \min$ достигается при условии, если высотный профиль $\sigma_{cp}(z)$ будет в масштабированном виде повторять профиль $\sqrt{\sigma_{sp}(z)}$, что иллюстрируется на рис. 2.

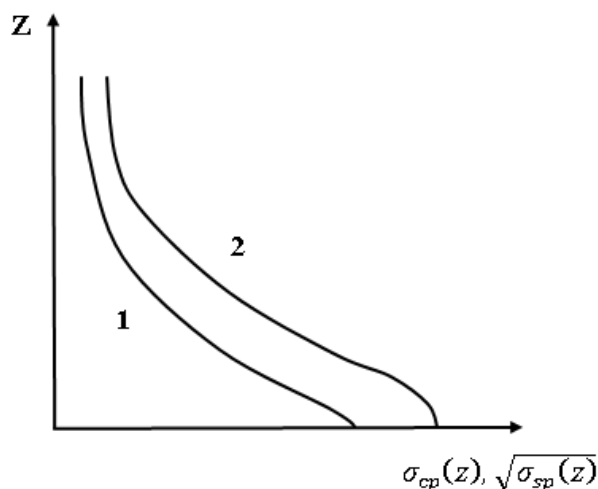


Рис. 2. Примерные кривые $\sigma_{cp}(z)$ и $\sigma_{sp}(z)$ при которых, при $C_1 = 1$ достигается условия $F = \min$. Цифрами указаны: 1-кривая показателя $\sigma_{cp}(z)$; 2-кривая показателя $\sqrt{\sigma_{sp}(z)}$

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сформулирована и решена задача минимизации интегральной по высоте значения альbedo однократного рассеяния. Составлена задача безусловной вариационной оптимизации базирующаяся на следующих положениях:

1. Интеграл коэффициента экстинкции атмосферного аэрозоля по высоте равен оптической плотности атмосферного аэрозоля, определяемого с земли с помощью солнечного фотометра.
2. Рассмотрена модель загрязненности атмосферы аэрозолем, в которой возможно существование такого оптимального вида функциональной зависимости коэффициента экстинкции от высоты при котором интегральная величина SSA достигает минимума.

Решение составленной оптимизационной задачи позволило определить оптимальный вид указанной функциональной зависимости. Показано, что указанный минимум достигается, если высотный профиль $\sigma_{cp}(z)$ в масштабированном виде повторяет профиль $\sqrt{\sigma_{sp}(z)}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sun T., Che H., Qi B., Wang Y., Dong Y., Xia X., Wang H., Gui K., Zheng Y., Zhao H., Ma Q., Du R., Zhang X. Aerosol optical characteristics and their vertical distributions under enhanced haze pollution events: effect of the regional transport of different aerosol types over eastern China// Atmos. Chem. Phys. 2018. Vol. 18. Pp. 2949-2971.
2. Herman B. M., Browning R. S., Deluisi J. J. Determination of the effective imaginary term of the complex refractive index of method// J. Atmos. Sci. 1975. Vol. 32. Pp. 918-925.
3. Dubovik O., Smirnov O. S., Holben B. N., King M. D., Kaufman Y. J., Eck T. F., Slutsker I. Accuracy assessment of aerosol optical properties retrieved from AERONET Sun and sky radiance measurements// J. Geophys. Res. 2000. Vol. 105(D8). Pp. 9791-9806.
4. Zhao F., Li Z. Estimation of aerosol single scattering albedo from solar direct spectral radiance and total broadband irradiances measured in China// J. Geophys. Res. 2007. Vol. 112. D22S03. DOI:10.1029/2006JD007384.
5. Petters J. L., Saxena V K., Slusser J. R., Wenny B. N., Madronich S. Aerosol single scattering albedo retrieved from measurements of surface UV irradiance and a radiative transfer model// J. Geophys. Res. 2003. Vol. 108(D9). Pp. 4288. DOI:10.2019/2002JD002360.
6. Kaufman Y. J. Satellite sensing of aerosol absorption// J. Geophys. Res. 1987. Vol. 92. Pp. 4307-43176.
7. Kaufman Y. J., Martins J. V., Remer L. A., Schoeberl M. R., Yamasoe M. A. Satellite retrieval of aerosol absorption over the oceans using sunglint// Geophys. Res. Lett. 2002. Vol. 29(19). Pp. 1928. DOI:10.1029/2002GL015403.
8. Yang H., Gordon H. R. Retrieval of the columnar aerosol phase function and single-scattering albedo from sky radiance over land: simulations// Appl. Opt. 1998. Opt. 37. Pp. 978-997.

9. Wang M., Gordon H. R. Retrieval of the columnar aerosol phase function and single-scattering albedo from sky radiance over the ocean: simulations// *Appl. Opt.* 1993. Vol. 32. Pp. 4598-4609.
10. Torres O., Bhartia P. K., Sinyuk A., Welton E.J., Holben B. Total ozone mapping spectrometer measurements of aerosol absorption from space: comparison to SAFARI 2000 ground-based observations// *J. Geophys. Res.* 2005. Vol. 110. D10s18. DOI:10.1029/2004JD004611.
11. Hu R-M., Martin R. V., Fairlie T. D. Global retrieval of columnar aerosol single scattering albedo from space-based observations// *J. Geophys. Res.* 2007. Vol. 112. D02204. DOI:10.1029/2005JD006832.
12. Moosmuller H., Arnott W. P., Rogers C. F., Chow J. C., Frazier C. A., Sherman L. E., Dietrich D. L. Photoacoustic and filter measurements related to aerosol light absorption during the northern front range air quality study (Colorado, 1996/1997)// *J. Geophys. Res.* 1998. Vol. 103. Pp.28149-28157.
13. Li C., Li J., Dubovik O., Zeng Z-C., Yung Y. L. Impact of aerosol vertical distribution on aerosol optical depth retrieval from passive satellite sensors// *Remote Sensing*
14. Chameides W. L., Yu H., Liu S. C., Bergin M., Zhou X., Merans L., Wang G., Kiang C.S., Saylor R. D., Luo C., Huang Y., Steiner A., Giorgi F. Case study of thr effects of atmospheric aerosols and regional hazer on agriculture: an opportunity to enhance crop yields in China through emission controls.
15. Эльсгольц Л. Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление// М. Наука. 1974. Стр. 432.

ON THE EXTREME CHARACTER OF THE INTEGRATED VALUE OF ALBEDO OF SINGLE SCATTERING OF THE ATMOSPHERIC AEROSOL

Asadov H. G., Abaszadeh F. G.

The inverse problem of reconstructing the high-altitude profile of the albedo of single aerosol scattering from ground-based photometric measurements of the integral optical thickness of the aerosol is solved, provided that the altitude integral albedo of single scattering of atmospheric aerosol is minimized. The solution of this problem can provide an answer to the question about the potential possibilities of increasing the transfer of solar optical energy by the atmosphere to the Earth. The analysis was carried out on the basis of the initial position that (a) atmospheric pollution is homogeneous, (b) the distribution of the extinction coefficient over height obeys the Gaussian law, (c) the integral of the extinction coefficient of atmospheric aerosol over height is equal to the optical density of atmospheric aerosol determined from the ground using a solar photometer. It has been suggested that there is such an optimal type of dependence of the extinction coefficient on the height at which the integral value of SSA (single scattering albedo-albedo of single scattering) reaches a minimum. It is shown that the specified minimum is achieved if the high-altitude profile of the extinction coefficient $\sigma_{cp}(z)$ in scaled form repeats the profile determined by the square root of the scattering coefficient $\sqrt{\sigma_{sp}(z)}$.

KEYWORDS: SINGLE SCATTERING ALBEDO; AEROSOL; OPTIMIZATION; FUNCTIONAL; EXTINCTION