



УДК 551.510

МЕТОД ВЫЧИСЛЕНИЯ МНГОВОЛНОВОЙ СОЛНЕЧНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ РАДИАЦИИ НА ВЕРХНЕЙ ГРАНИЦЕ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ АЭРОЗОЛЬНОЙ АТМОСФЕРЫ

Х. Г. Асадов¹, С. Н. Абдуллаева²

¹Национальное аэрокосмическое агентство, г. Баку

²Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, г. Баку

Предложен метод вычисления многоволновой солнечной радиации на верхней границе многокомпонентной аэрозольной атмосферы. Показано, что учет многокомпонентной структуры атмосферного аэрозоля позволяет разработать новую методику определения потока оптической радиации на верхней границе атмосферы. При этом необходимо иметь информацию об основных структурных компонентах аэрозоля атмосферы и о значениях показателя Ангстрема для структурных компонентов атмосферного аэрозоля. Разработана методика проведения соответствующих вычислений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АТМОСФЕРА, АЭРОЗОЛЬ, ОПТИЧЕСКИЙ ПОТОК, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СЕТЬ, ОПТИЧЕСКАЯ ТОЛЩИНА, ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ.

1. ВВЕДЕНИЕ

Хорошо известно, что аэрозоль является одним из основных компонентов, наиболее сильно влияющих на энергетику радиационных полей атмосферы планеты. Исследование атмосферного аэрозоля осуществляется как в глобальном (сети AERONET [1], GAO [2]), так и в региональном масштабе ([3], [4] и др.). Широко масштабные исследования атмосферного аэрозоля ведутся в таких направлениях как:

- Исследования распределения аэрозольных частиц по размерам (модальность распределения) [5, 6];
- Исследования явлений поглощения и рассеяния оптической радиации аэрозольными частицами [7, 8];
- Исследование структурного состава атмосферного аэрозоля [9, 10];
- Исследование динамических явлений, связанных с аэрозольными частицами (фазовые переходы, увлажнение, образования смешанных частиц и т. д.) [11, 12].

Вместе с тем, можно с уверенностью сказать, что в плане оптических радиационных исследований изучение оптико–физических характеристик аэрозоля не является самоцелью и служит задачей определения и оценки оптических радиационных потоков, поступающих как в атмосферу земли, так и на поверхность планеты.

В этом плане особую важность и актуальность имеет задача точной оценки оптической радиации, поступающей на верхнюю границу атмосферы. В настоящей статье предлагается метод оценки оптической радиации, поступающей на верхнюю границу атмосферы путем проведения наземных солнечно-фотометрических измерений на различных длинах волн, с учетом структурного состава атмосферного аэрозоля.

2. ПРЕДЛАГАЕМЫЙ МЕТОД

Отметим, что подобная задача и ранее ставилась, и решалась в работах [13, 14] в плане различения атмосферного аэрозоля по фракциям (мелкодисперсные $P_{0.1}$; среднедисперсные $P_{2.5}$ и крупнодисперсные P_{10}).

Однако в этих работах оптическая толщина каждой из указанных фракций оценивалась классической формулой Ангстрема, что вызвало немалые споры. В настоящей статье, в отличие от многофракционного подхода, примененного в вышеуказанных работах, применяется структурный подход, т. е. суммарная оптическая толщина аэрозольного слоя атмосферы оценивается в качестве алгебраической суммы пяти основных видов аэрозоля [15]:

- Сажа (black carbon, BC);
- Органический углерод (OC);
- Пыль (DU);
- Сульфаты (SU);
- Морская соль (SEA).

Согласно [15] вышеуказанные типы аэрозоля наиболее распространены во всех регионах мира и учтены во всех климатических моделях.

Таким образом, исходным положением для дальнейших исследований является положение о том, что (а) суммарная оптическая толщина атмосферного аэрозоля $\tau_{\Sigma}(\lambda_i)$ на длине волны λ_i может быть определена как:

$$\tau_{\Sigma}(\lambda_i) = \sum_{j=1}^5 \tau_j(\lambda_i) \quad (1)$$

где τ_1 – оптическая толщина BC; τ_2 – OC; τ_3 – DU; τ_4 – SU; τ_5 – SEA.

(б) оптическая толщина каждой из указанных структурных составляющих определяется по формуле Ангстрема:

$$\tau_j(\lambda_i) = \beta_j \cdot \lambda_i^{\alpha_j} \quad (2)$$

где β_j — аэрозольная мутность атмосферы применительно к j -й компоненте.

Допускаем, что измерения на поверхности земли осуществляются по схеме закона Бугера – Бера, т. е.:

$$I(\lambda_i) = I_0(\lambda_i) \exp \left[- \left(\sum_{j=1}^5 \tau_j(\lambda_i) \right) m \right] \quad (3)$$

В выражении (3) приняты следующие обозначения:

$I(\lambda_i)$ — оптический поток на нижней границе атмосферы на длине волны λ_i ;
 $I_0(\lambda_i)$ — оптический поток на верхней границе атмосферы;
 m — оптическая воздушная масса.

После проведения измерений по схеме (3) на длинах волн $\lambda_i, i = \overline{1, n}$; $n=5$; вычисляется относительный коэффициент:

$$\gamma_1 = \frac{\prod_{i=1}^{n-1} [I_0(\lambda_i)]^{k_{i1}}}{I_0(\lambda_n)^{k_{n1}}} \quad (4)$$

где k_{i1} — весовые коэффициенты; $\sum_{i=1}^{n-1} k_{i1} = 1$; здесь второй индекс k показывает принадлежность k γ_1 .

С учетом (3) и (4) получаем:

$$\gamma = \frac{\prod_{i=1}^{n-1} I_o(\lambda_i)^{k_{i1}} \cdot \exp\left[-k_{i1} \sum_{j=1}^n \tau_j(\lambda_i) \cdot m\right]}{I_o(\lambda_n)^{k_{n1}} \cdot \exp\left[-k_{n1} \left(\sum_{j=1}^n \tau_j(\lambda_n)\right)\right]} \quad (5)$$

Из выражений (5) ясно, что для устранения влияния аэрозоля на величину γ должны быть выполнены следующие условия (при $n=5$):

$$\begin{aligned} k_{11}\tau_1(\lambda_1) + k_{21}\tau_1(\lambda_2) + k_{31}\tau_1(\lambda_3) + k_{41}\tau_1(\lambda_4) &= k_{51}\tau_1(\lambda_5) \\ k_{11}\tau_2(\lambda_1) + k_{21}\tau_2(\lambda_2) + k_{31}\tau_2(\lambda_3) + k_{41}\tau_2(\lambda_4) &= k_{51}\tau_2(\lambda_5) \\ k_{11}\tau_3(\lambda_1) + k_{21}\tau_3(\lambda_2) + k_{31}\tau_3(\lambda_3) + k_{41}\tau_3(\lambda_4) &= k_{51}\tau_3(\lambda_5) \\ k_{11}\tau_4(\lambda_1) + k_{21}\tau_4(\lambda_2) + k_{31}\tau_4(\lambda_3) + k_{41}\tau_4(\lambda_4) &= k_{51}\tau_4(\lambda_5) \\ k_{11}\tau_5(\lambda_1) + k_{21}\tau_5(\lambda_2) + k_{31}\tau_5(\lambda_3) + k_{41}\tau_5(\lambda_4) &= k_{51}\tau_5(\lambda_5) \end{aligned} \quad (6)$$

С учетом выражения (2) уравнения системы (6) принимают следующий вид

$$\begin{aligned} k_{11}\lambda_1^{-\alpha_1} + k_{21}\lambda_2^{-\alpha_1} + k_{31}\lambda_3^{-\alpha_1} + k_{41}\lambda_4^{-\alpha_1} &= k_{51}\lambda_5^{-\alpha_1} \\ k_{11}\lambda_1^{-\alpha_2} + k_{21}\lambda_2^{-\alpha_2} + k_{31}\lambda_3^{-\alpha_2} + k_{41}\lambda_4^{-\alpha_2} &= k_{51}\lambda_5^{-\alpha_2} \\ k_{11}\lambda_1^{-\alpha_3} + k_{21}\lambda_2^{-\alpha_3} + k_{31}\lambda_3^{-\alpha_3} + k_{41}\lambda_4^{-\alpha_3} &= k_{51}\lambda_5^{-\alpha_3} \\ k_{11}\lambda_1^{-\alpha_4} + k_{21}\lambda_2^{-\alpha_4} + k_{31}\lambda_3^{-\alpha_4} + k_{41}\lambda_4^{-\alpha_4} &= k_{51}\lambda_5^{-\alpha_4} \\ k_{11}\lambda_1^{-\alpha_5} + k_{21}\lambda_2^{-\alpha_5} + k_{31}\lambda_3^{-\alpha_5} + k_{41}\lambda_4^{-\alpha_5} &= k_{51}\lambda_5^{-\alpha_5} \end{aligned} \quad (7)$$

Приняв $k_{51}=1$ система (7) решается относительно $k_{11} \hat{=} k_{41}$.

С учетом полученных решений $k_{11} \hat{=} k_{41}$ параметр γ может быть вычислен как:

$$\gamma_1 = \frac{I_0(\lambda_1)^{k_{11}} \cdot I_0(\lambda_2)^{k_{21}} \cdot I_0(\lambda_3)^{k_{31}} \cdot I_0(\lambda_4)^{k_{41}}}{I_0(\lambda_5)} \quad (8)$$

Логарифмируя (8) получим:

$$\ln \gamma_1 = k_{11} \ln I_0(\lambda_1) + k_{21} \ln I_0(\lambda_2) + k_{31} \ln I_0(\lambda_3) + k_{41} \ln I_0(\lambda_4) - \ln I_0(\lambda_5) \quad (9)$$

Очевидно, что для вычисления $\ln I_0(\lambda_i)$ необходимо иметь пять уравнений типа (9).

Такие уравнения могут быть получены путем повтора всей серии процедур ((5)÷(9)) для следующих показателей $\gamma_2, \gamma_3, \gamma_4, \gamma_5$ аналогично тому, как это было для γ_1 .

$$\gamma_2 = \frac{I_0(\lambda_2)^{k_{12}} \cdot I_0(\lambda_3)^{k_{22}} \cdot I_0(\lambda_4)^{k_{32}} \cdot I_0(\lambda_5)^{k_{42}}}{I_0(\lambda_1)^{k_{52}}} \quad (10)$$

$$\gamma_3 = \frac{I_0(\lambda_1)^{k_{13}} \cdot I_0(\lambda_3)^{k_{23}} \cdot I_0(\lambda_4)^{k_{33}} \cdot I_0(\lambda_5)^{k_{43}}}{I_0(\lambda_2)^{k_{53}}} \quad (11)$$

$$\gamma_4 = \frac{I_0(\lambda_1)^{k_{14}} \cdot I_0(\lambda_2)^{k_{24}} \cdot I_0(\lambda_4)^{k_{34}} \cdot I_0(\lambda_5)^{k_{44}}}{I_0(\lambda_3)^{k_{54}}} \quad (12)$$

$$\gamma_5 = \frac{I_0(\lambda_1)^{k_{15}} \cdot I_0(\lambda_2)^{k_{25}} \cdot I_0(\lambda_3)^{k_{35}} \cdot I_0(\lambda_5)^{k_{45}}}{I_0(\lambda_4)^{k_{55}}} \quad (13)$$

После повтора процедур (5)÷(9) для всех γ_i получим следующую систему уравнений относительно $\ln I_0(\lambda_i); i = \overline{1,5}$.

$$\begin{aligned} \ln \gamma_1 &= k_{11} \ln I_0(\lambda_1) + k_{21} \ln I_0(\lambda_2) + k_{31} \ln I_0(\lambda_3) + k_{41} \ln I_0(\lambda_4) - k_{51} \ln I_0(\lambda_5) \\ \ln \gamma_2 &= k_{12} \ln I_0(\lambda_1) + k_{22} \ln I_0(\lambda_2) + k_{32} \ln I_0(\lambda_3) + k_{42} \ln I_0(\lambda_4) - k_{52} \ln I_0(\lambda_5) \\ \ln \gamma_3 &= k_{13} \ln I_0(\lambda_1) + k_{23} \ln I_0(\lambda_2) + k_{33} \ln I_0(\lambda_3) + k_{43} \ln I_0(\lambda_4) - k_{53} \ln I_0(\lambda_5) \\ \ln \gamma_4 &= k_{14} \ln I_0(\lambda_1) + k_{24} \ln I_0(\lambda_2) + k_{34} \ln I_0(\lambda_3) + k_{44} \ln I_0(\lambda_4) - k_{54} \ln I_0(\lambda_5) \\ \ln \gamma_5 &= k_{15} \ln I_0(\lambda_1) + k_{25} \ln I_0(\lambda_2) + k_{35} \ln I_0(\lambda_3) + k_{45} \ln I_0(\lambda_4) - k_{55} \ln I_0(\lambda_5) \end{aligned} \quad (14)$$

Таким образом, решение системы уравнений (14) относительно искомым оптических радиационных потоков позволяет вычислить значения потока оптической радиации на верхней границе атмосферы проводя измерения $I(\lambda_i); \gamma_i$; имея информацию об $\alpha_i; i = \overline{1,5}$.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, учет известной многокомпонентной структуры атмосферного аэрозоля позволил разработать новую методику определения потока оптической радиации на верхней границе атмосферы, исходя из следующей информации:

1. Основные структурные компоненты аэрозоля атмосферы.
 2. Значения показателя Ангстрема для структурных компонентов атмосферного аэрозоля.
- Разработанная методика определения потока оптической радиации на верхней границе атмосферы заключается в следующем:
1. Проведение наземных фотометрических измерений по схеме (3) на длинах волн λ_i ; $i = \overline{1,5}$;
 2. Вычисление весовых коэффициентов $k_{11} \div k_{51}$;
 3. Вычисление параметра γ_l на основе проведенных измерений и вычисленных величин $k_{11} \div k_{51}$;
 4. Формирование уравнения (9) для вычисленной величины $\ln \gamma_l$;
 5. Повтор операций (2÷4) для аналогичных параметров $\gamma_2 \div \gamma_5$ и формирование уравнений аналогичных (9);
 6. Совместное решение всех полученных уравнений типа (9) относительно $\ln I_0(\lambda_i)$; $i = \overline{1,5}$.

4. ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Показана возможность вычисления многоволновых величин потоков оптической радиации на верхней границе атмосферы, имея исходную информацию о структуре атмосферного аэрозоля и аппроксимируя оптическую толщину каждой из структурных компонентов известной формулой Ангстрема.
2. Разработана методика проведения соответствующих вычислений.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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., Smirnov A. AERONET — A federated instrument network and data archive for aerosol characterization// Rem. Sens. Environ. 1998. Vol. 66. Pp. 1-16.
2. Kazadsis S., Kouremeti N., Diemoz H., Grobner J., Forgan B. W., Campanelli M., Estelles V., Lantz K., Michalsky J., Garlund T., Cuevas E., Toledano C., Becker R., Nyeki S., Kosmopolous P. G., Tatsiankou V., Vuilleumier L., Denn F. M., Ohkawara N., Ijima O., Goloub P., Raptis P. I., Milner M., Behrens K., Barreto A., Martucci G., Hall E., Wendell J., Fabbri B. E., Wehrli C. Results from the fourth WMO filter radiometer comparison for aerosol optical depth measurements// Atmos. Chem. Phys. 2018. Vol. 18. Pp. 3185-3201. <https://doi.org/10.5194/acp-18-3185-2018>.
3. Bosenberg J., Ansmann A., Baldasano J. M., Balis D., Bockmann C. B., Calpini B., Chaikovsky A. EARLINET: a European aerosol research Lidar network, in Dabas. Loth C. and Pelon J// Laser Remote Sensing. Ecole Polytechnique, Palaiseau, France. 2001. Pp. 155-158.
4. Papalardo G., Bosenberg J., Amodeo A., Ansmann A., Apituley A., Alados-Arbaledos L., Balis D. EARLINET for long term observation of aerosol over Europe, 24th Int'l Laser Radar Conf. 2008. Pp. 711-714.
5. Smolik J., Dimal V., Schwarz J., Lazaridis M., Havarnek V. Size resolved mass concentration and elemental composition of atmospheric aerosols over the Eastern Mediterranean area// Atmospheric Chemistry and Physics. European Geosciences Union. 2003. Vol. 3(6). Pp. 2207-2216. fffhal-00295376f.
6. Schuster G. L., Dubovik O., Holben B. N. Angstrom exponent and bimodal aerosol size distributions// J. Geophys. Res. 2006. Vol. 111. D07207. DOI 10.1029/2005JD006328.

7. Cohan D. S., Xu J., Greenwald R., Bergin M. H., Chameides W. L. Impact of atmospheric aerosol light scattering and absorption on terrestrial net primary productivity// *Global Biogeochem. Cycles*. 2002. Vol. 16(4). Pp. 1090. DOI 10.1029/2001GB001441.
8. Bergstorm R. W., Pilewski P., Russell P. B., Redeman J., Bond T. C. Spectral absorption properties of atmospheric aerosols// *Atmospheric Chemistry and Physics*. European Geosciences Union. 2007. Vol. 7(23). Pp. 5937-5943. fhal-00296388f.
9. Ramanathan V., Crutzen P. J., Lelieveld J. The Indian ocean experiment: an integrated analysis of the climate forcing and effects of the great Indo – Asian haze// *J. Geophys. Res.* 2001. D106. Vol. 398.
10. Tarasova T. A., Gorchakova I. A., Sviridenkov M. A. Estimation the radiative forcing of smoke aerosol from radiation measurements at the Zvenigorod Scientific station in the summer of 2001// *Izv. Akad. Nauk. Fiz. Atmos. Okeana*. 2004. Vol. 40. Pp. 514-524. *Izv. Atmos. Ocean Phys.* 2004. Vol. 40. Pp. 454-463.
11. Dawson K. W., Ferrare R. A., Moore R. H., Clayton M. B., Eloronta E. W. Ambient aerosol hygroscopic growth from combined Raman Lidar and HSRL// *Journal of Geophysical Research: Atmosphere*. 2020. Vol. 125. №7. DOI 10.1029/2019JD031708.
12. WT, Li Z., Chen J., Wang Y., Wu H., Jin X., Liang C., Li S., Wang W., Cribb M. Hygroscopicity of different types of aerosol particles: case studies using multi – instrument data in megacity Beijing, China// *Remote*.
13. Asadov H. H., Mirzabalayev I. M., Aliyev D. Z., Agayev J. A., Azimova S. R., Nabiyeva N. A., Abdullayeva S. N. Synthetic of corrected multi – wavelength spectrometers for atmospheric trace gases// *Chinese optics letters*. 2009. №7 (5). Pp. 361-363. DOI 10.3788/col20090705.0361.
14. Мехтиев А. III., Асадов Х. Г., Исмаилов К. Х. Космические исследования. 2013. Том. 51. №5. С. 436-440.
15. He Y., Sun Z., Shi G. Modification of the SUNFLUX solar radiation scheme with a new data// *Adv, Atmos. Sci.* 2017. Vol. 34. Pp. 1301-1315. <https://doi.org/10.1007/s00376-016-6262-0>.

A METHOD FOR CALCULATION OF MULTI-WAVELENGTH SOLAR OPTICAL RADIATION AT THE UPPER BORDER OF MULTI-COMPONENT AEROSOL ATMOSPHERE

H. H. Asadov, S. N. Abdullaeva

A method for calculation of multi-wave solar radiation at the upper border of multi-component aerosol atmosphere is suggested. It is shown that accounting of multi-component structure of atmospheric aerosol make it possible to develop a methodic for determination of optical radiation flux at the upper boundary of atmosphere. For this purposes the presence of information about major structural components of atmospheric aerosol and about Angstrom exponent of structural components of atmospheric aerosol is necessary. The methodic for carrying out of relevant calculations is developed.

KEYWORDS: ATMOSPHERE; OPTICAL FLUX, MEASURING NETWORK, OPTICAL DEPTH, PHOTOMETRIC MEASUREMENTS.