

УДК 535.36

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГЛОЩАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ СЛОИСТОЙ ДИСПЕРСНОЙ СРЕДЫ

Горячев Борис Валентинович,

канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры общей физики
Физико-технического института ТПУ, Россия, 634050,
г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: bvg@tpu.ru

Могилиничий Сергей Борисович,

канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры общей физики
Физико-технического института ТПУ, Россия, 634050,
г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: msb@tpu.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью разработки модели взаимодействия солнечного излучения с атмосферой для точного и долговременного предсказания погодных и климатических явлений в атмосфере.

Цель работы: решение задачи переноса излучения в слоистой дисперсной среде в аналитическом виде и определение некоторых общих закономерностей переноса излучения в зависимости от параметров излучения и среды, в частности атмосферы.

Методы исследования: решение уравнения переноса излучения для пространственно ограниченной слоистой дисперсной среды, основанное на точном решении уравнения переноса излучения в одномерной среде.

Результаты: Получены аналитические выражения для расчета коэффициента пропускания, отражательной и поглощательной способности трехслойной дисперсной среды. Показано, что величина поглощения сильно зависит от положения поглощающего слоя внутри дисперсной среды. Наибольшее поглощение наблюдается при верхнем положении поглощающего слоя, наименьшее – при расположении слоя у поверхности (при освещении среды сверху), причем в этом случае поглощение слабо зависит от положения поглощающего слоя. Подобные зависимости выполняются при различной величине оптической плотности дисперсной среды.

Ключевые слова:

Радикация, атмосфера, дисперсная среда, поглощение, слой.

Введение

Исследование поглощательной способности дисперсных сред проводится на основе методов теории переноса излучения и численных методов [1]. При проведении исследований используются различные модели атмосферы [2–5]. Точность получаемых результатов зависит от точности используемых приближений и учета всех эффектов, существенно влияющих на результат, например эффекта пространственной ограниченности дисперсной среды [6–9].

Теория

Целью данной работы является решение задачи переноса излучения в аналитическом виде и определение некоторых закономерностей переноса в слоистой дисперсной среде. Аналитическое решение задачи получено с использованием метода многократных отражений [6]. Дисперсная среда представляется в виде прямоугольного параллелепипеда, разделенного на три плоских слоя при нормальном падении потока излучения на поверхность дисперсной среды. Получены аналитические выражения для определения коэффициента пропускания $A_{123}(\tau, a, \Lambda)$, отражательной способности $B_{123}(\tau, a, \Lambda)$ и поглощательной способности $C_{123}(\tau, a, \Lambda)$ слоистой дисперсной среды.

Введем обозначения: оптические размеры $\tau = \alpha l$ (α – коэффициент ослабления; l – геометрические размеры дисперсной среды) первого слоя параллелепипеда $\tau_{1x_0} \times \tau_{1y_0} \times \tau_{1z_0}$ (излучение распространяется по оси x , поперечные оптические размеры одинаковы для всех слоев и равны $\tau_{1y_0} \times \tau_{1z_0}$), второго слоя

$\tau_{2x_0} \times \tau_{2y_0} \times \tau_{2z_0}$; третьего слоя $\tau_{3x_0} \times \tau_{3y_0} \times \tau_{3z_0}$; индикатриса рассеяния излучения, характеризуемая степенью вытянутости $a = (\eta + 2\mu) / (\beta + 2\mu)$, η , β , μ – интегральные параметры индикатрисы рассеяния [6, 7]; вероятность выживания кванта в первом слое Λ_1 , во втором – Λ_2 , в третьем – Λ_3 . В данной модели дисперсной среды, используемой для расчета радиационных характеристик атмосферы, параметры каждого слоя определяются в результате атмосферных исследований [10–15]. На основе метода многократных отражений получены формулы:

$$B_{123} = B_1 + \frac{F_1^2 B_3^2 + F_4 F_5}{B_3 F_5 F_2};$$

$$C_{123} = C_1 + \frac{A_1}{F_2} \left[F_6 + \frac{A_2 (F_2 F_7 + B_3 F_6)}{F_5} \right].$$

Обозначения:

$$F_1 = A_1(\tau, a, \Lambda) A_2(\tau, a, \Lambda);$$

$$F_2 = 1 - B_1(\tau, a, \Lambda) B_2(\tau, a, \Lambda);$$

$$F_3 = 1 - B_1(\tau, a, \Lambda) B_3(\tau, a, \Lambda);$$

$$F_4 = A_1^2(\tau, a, \Lambda) B_2(\tau, a, \Lambda) B_3(\tau, a, \Lambda);$$

$$F_5 = F_2 F_3 - F_4;$$

$$F_6 = C_2(\tau, a, \Lambda) + C_1(\tau, a, \Lambda) B_2(\tau, a, \Lambda);$$

$$F_7 = C_3(\tau, a, \Lambda) + C_1(\tau, a, \Lambda) B_3(\tau, a, \Lambda).$$

Радиационные характеристики каждого из слоев $A_i(\tau, a, \Lambda)$, $B_i(\tau, a, \Lambda)$, $C_i(\tau, a, \Lambda)$, где $i = 1, 2, 3$, определяются следующим образом [6]:

$$\begin{aligned}
 A_i(\tau, a, \Lambda) &= \\
 &= \frac{[1 - R_i^2(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda)] \exp[-k_i(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda) \tau_{ix_0}]}{1 - R_i^2(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda) \exp[-2k_i(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda) \tau_{ix_0}]}, \\
 B_i(\tau, a, \Lambda) &= \\
 &= \frac{R_i(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda) \{1 - \exp[-2k_i(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda) \tau_{ix_0}]\}}{1 - R_i^2(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda) \exp[-2k_i(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda) \tau_{ix_0}]}, \\
 C_i(\tau, a, \Lambda) &= \\
 &= \frac{[1 - R_i(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda)] \{1 - \exp[-k_i(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda) \tau_{ix_0}]\}}{1 + R_i(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda) \exp[-k_i(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda) \tau_{ix_0}]}.
 \end{aligned}$$

Переменные коэффициенты $k(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda)$ и $R(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda)$, зависящие от поперечных оптических размеров дисперсной среды, индикатрисы рассеяния излучения и вероятности выживания кванта, разные для каждого слоя и имеют вид:

$$\begin{aligned}
 k_i(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda) &= \sqrt{P_i(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda) [1 - \Lambda_i(\eta - \beta_i)]}; \\
 R_i(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda) &= \frac{k_i(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda) - P_i(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda)}{k_i(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda) + P_i(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda)}.
 \end{aligned}$$

Функция $P(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda)$ определяет рассеяние и поглощение излучения по оси x и в частном случае изотропной индикатрисы рассеяния и полубесконечной среды [6]:

$$P(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda) = \frac{(1 - \Lambda)(27 - 11\Lambda + \Lambda^2)}{3(9 - 7\Lambda + \Lambda^2)}.$$

Результаты

Рассмотрим некоторые результаты расчетов по данным формулам потоков монохроматического излучения в слоистой дисперсной среде.

В качестве модели слоистой дисперсной среды возьмем трехслойную среду со сферической индикатрисой рассеяния излучения и разной вероятностью выживания кванта по слоям. В частном случае дисперсной среды, состоящей из поглощающего и двух рассеивающих слоев, формулы упрощаются и зависят от положения поглощающего слоя внутри среды. При помещении поглощающего слоя первым (по отношению к направлению распространения излучения) формула для поглощательной способности имеет вид:

$$C_{123} = C_1 \left\{ 1 + \frac{A_1}{F_2} \left[B_2 + \frac{A_2 B_3 (F_2 + A_1 B_2)}{F_5} \right] \right\}.$$

При расположении поглощающего слоя внутри дисперсной среды ($C_1 = C_3 = 0$):

$$C_{123} = \frac{C_2 A_1}{F_2} \left(1 + \frac{F_1 B_3}{F_5} \right).$$

При помещении слоя с поглощением в конце дисперсной среды ($C_1 = C_2 = 0$):

$$C_{123} = \frac{C_3 F_1}{F_5}.$$

Результаты расчетов приведены на рис. 1, 2. Поперечные оптические размеры дисперсной среды равны $\tau_{1y_0} \times \tau_{1z_0} = 10^5$. На рис. 1 представлены зависимости поглощающей способности C_{123} трехслойной дисперсной среды от оптической высоты поглощающего слоя, при различных положениях слоя оптической плотности $\tau_{1x_0} = 1$ и при разных значениях вероятности выживания кванта.

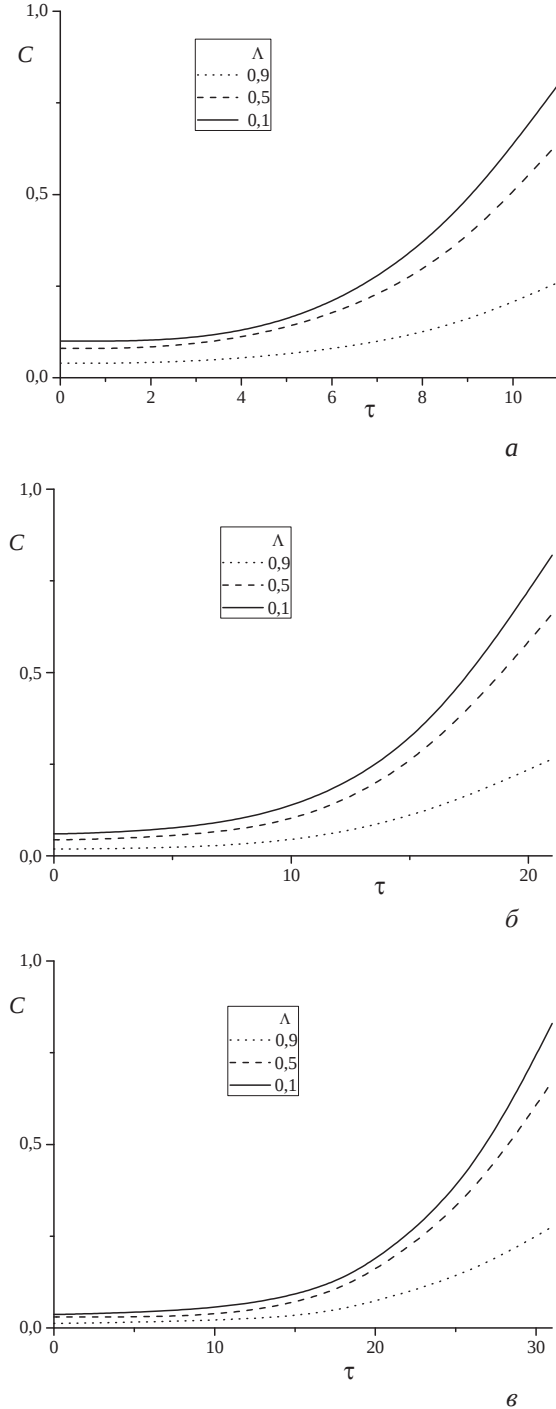


Рис. 1. Зависимость поглощательной способности C_{123} трехслойной дисперсной среды от высоты поглощающего слоя, степень вытянутости индикатрисы рассеяния излучения $a_1 = a_2 = a_3 = 1$: а) оптическая плотность слоев дисперсной среды $\tau_{x_0} = \tau_{1x_0} + \tau_{2x_0} + \tau_{3x_0} = 11$; б) $\tau_{x_0} = 21$; в) $\tau_{x_0} = 31$

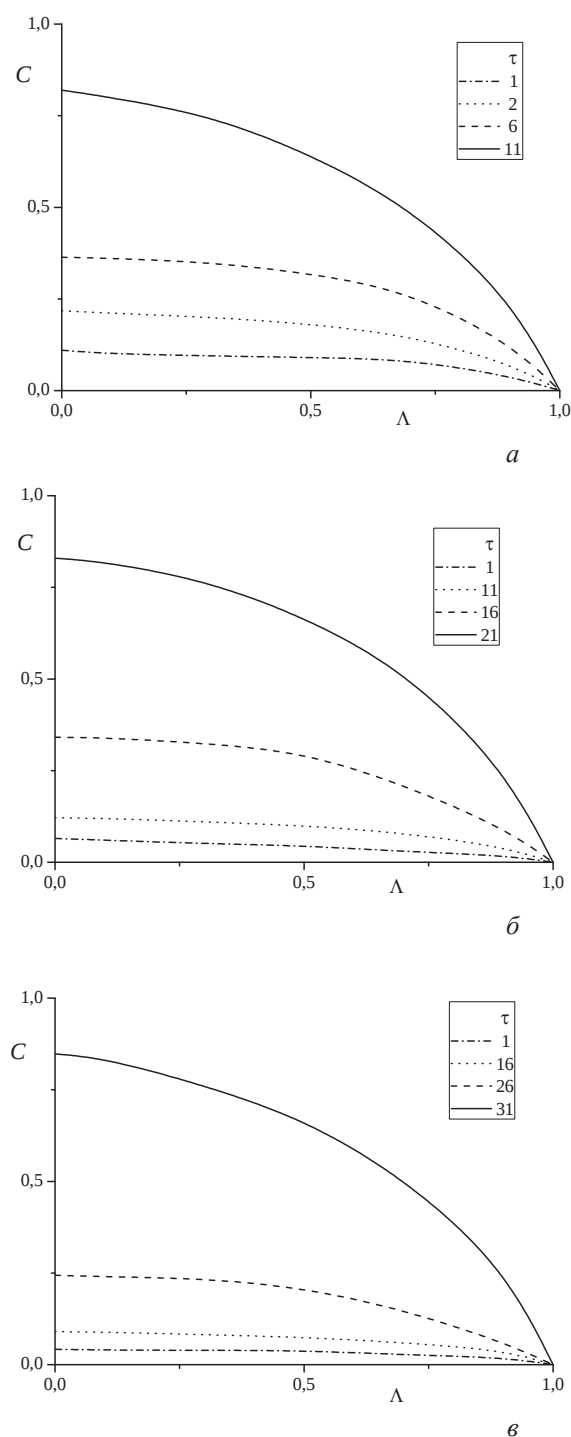


Рис. 2. Зависимость поглощательной способности C_{123} трех-
слойной дисперсной среды от вероятности выживания
кванта поглощающего слоя, степень вытянутости
индикатрисы рассеяния излучения $a_1=a_2=a_3=1$: а) оп-
тическая плотность слоев дисперсной среды
 $\tau_{\text{ж}}=\tau_{1\text{ж}}+\tau_{2\text{ж}}+\tau_{3\text{ж}}=11$; б) $\tau_{\text{ж}}=21$; в) $\tau_{\text{ж}}=31$

Представленные на рис. 1 данные показывают, что величина поглощения сильно зависит от положения поглощающего слоя внутри дисперсной среды. Наибольшее поглощение наблюдается при верхнем положении поглощающего слоя, наименьшее – при расположении слоя у поверхности, причем в этом случае поглощение слабо зависит от положения поглощающего слоя. Подобные зависимости наблюдаются при различной величине оптической плотности атмосферы $\tau_{\text{ж}}$, и влияние $\tau_{\text{ж}}$ на поглощательную способность невелико.

Рис. 2 иллюстрирует влияние вероятности выживания кванта на поглощательную способность атмосферы. Из полученных данных следует, что зависимость поглощательной способности атмосферы от величины вероятности выживания кванта при различных положениях поглощающего слоя наибольшая при верхнем положении слоя и практически не зависит от Λ при нижнем положении слоя (при наличии рассеивающего слоя дисперсной среды над приземным слоем, например, облачности). Подобные зависимости выполняются при разных оптических плотностях атмосферы.

Выводы

1. Получены аналитические выражения для расчета коэффициента пропускания, отражательной и поглощательной способности трехслойной дисперсной среды.
2. Показано, что величина поглощения сильно зависит от положения поглощающего слоя внутри дисперсной среды. Наибольшее поглощение наблюдается при верхнем положении поглощающего слоя, наименьшее – при расположении слоя у поверхности, причем в этом случае поглощение слабо зависит от положения поглощающего слоя. Подобные зависимости наблюдаются при различной величине оптической плотности атмосферы $\tau_{\text{ж}}$, и влияние $\tau_{\text{ж}}$ на поглощательную способность невелико.
3. Зависимость поглощательной способности атмосферы от величины вероятности выживания кванта при различных положениях поглощающего слоя наибольшая при верхнем положении слоя и практически не зависит от Λ при нижнем положении слоя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ленобль Ж. Перенос радиации в рассеивающих и поглощающих атмосферах. – Л.: Гидрометеоиздат, 1990. – 264 с.
2. Kokhanovsky A.A., Budak V.P., Cornet C., et al. Benchmark results in vector atmospheric radiative transfer // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. – 2010. – V. 111. – P. 1931–1946.
3. Восстановление коэффициентов аэрозольного ослабления оптического излучения на протяженной приземной трассе по данным измерений параметров аэрозоля в локальном объеме / Ю.А. Пхалагов, В.Н. Ужegov, В.С. Козлов, М.В. Панченко, С.А. Терпугова, Е.П. Яушева // Оптика атмосферы и океана. – 2013. – Т. 26. – № 06. – С. 478–483.
4. Поток солнечной радиации в безоблачной атмосфере Западной Сибири: сравнение результатов моделирования и натурных измерений / Т.Б. Журавлева, С.М. Сакерин, Т.В. Бедарева, Д.М. Кабанов, И.М. Насртдинов, Т.Ю. Чеснокова // Оптика атмосферы и океана. – 2013. – Т. 26. – № 11. – С. 985–994.
5. Матвиенко Г.Г., Погодаев В.А. Оптика атмосферы и океана – неоконченный урок взаимодействия оптического излучения со средой распространения // Оптика атмосферы и океана. – 2012. – Т. 25. – № 01. – С. 5–10.
6. Горячев Б.В., Могилиничский С.Б. Некоторые особенности переноса излучения в пространственно ограниченных дисперсных средах // Известия Томского политехнического университета. – 2000. – Т. 303. – № 3. – С. 91–104.
7. Горячев Б.В., Могилиничский С.Б. Влияние отражающей поверхности на радиационный баланс дисперсной среды // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 2. – С. 39–42.
8. Горячев Б.В., Могилиничский С.Б. Перенос оптического излучения в слоистой дисперсной среде с отражающей поверхностью // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. – № 2. – С. 78–81.
9. Горячев Б.В., Могилиничский С.Б. Исследование отражательной способности слоистой дисперсной среды // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 2. – С. 63–66.
10. Griesheimer D.P., Millman D.L., Willis C.R. Analysis of distances between inclusions in finite binary stochastic materials // J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer. – 2011. – V. 112. – P. 577–598.
11. Kassianov E., Veron D. Stochastic radiative transfer in Markovian mixtures: Past, present, and future // J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer. – 2011. – V. 112. – P. 566–576.
12. Coupled ocean-atmosphere radiative transfer model in the framework of software package SCIATRAN: Selected comparisons to model and satellite data / M. Blum, V.V. Rozanov, J.P. Burrows, A. Bracher // Advances in Space Research. – 2012. – V. 49. – P. 1728–1742.
13. Synergetic cloud fraction determination for SCIAMACHY using MERIS / C. Schlundt, A.A. Kokhanovsky, von Hoyningen-Huene W., T. Dinter, L. Istomina, J.P. Burrows // Atmos. Meas. Tech. – 2011. – V. 4. – P. 319–337.
14. Multiple scattering in a dense aerosol atmosphere / S. Mukai, T. Yokomae, I. Sano, M. Nakata, A. Kokhanovsky // Atmos. Meas. Tech. Discuss. – 2012. – V. 5. – P. 881–907.
15. Otto S. Analytical properties of the radiance in atmospheric radiative transfer theory // J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer. – 2014. – V. 133. – P. 329–350.

Поступила 21.11.2013 г.

UDC 535.36

THE RESEARCH OF LAYERED DISPERSION MEDIA ABSORPTION

Boris V. Goryachev,

Cand. Sc., Tomsk Polytechnic University,
Russia, 634021, Tomsk, Lenin avenue, 30. E-mail: bvg@tpu.ru

Sergey B. Mogilnitsky,

Cand. Sc., Tomsk Polytechnic University,
Russia, 634021, Tomsk, Lenin avenue, 30. E-mail: msb@tpu.ru

The urgency of the discussed issue is caused by the need to develop the model for interaction between the sun radiation and atmosphere for the exact and long-term forecast of weather and climate phenomena in the atmosphere.

The main aim of the study is to solve the problem on radiation transfer in the layered dispersed media analytically and to identify the general laws on radiation transfer depending on the radiation parameters and media.

The methods used in the study: solution of the radiation transfer equation for space-limited layered dispersed media; the equation solution is based on the exact solution of the radiation transfer equation in one-dimensional media.

The results: the authors have studied the radiation transfer in multilayer dispersed media. The analytical formulae for calculating the transmission coefficient, reflectance and absorption of dispersion media consisting of three plane layers were obtained. It was shown that absorption of dispersed media depends strongly on absorption layer position in dispersed media. The highest absorption value is registered at upper position of the absorbing layer; the lowest value is marked at the layer lower position when the light falls from above. In this case the absorption slightly depends on the absorbing layer position. Similar characteristics were obtained for different values of optical thickness of dispersion media.

Key words:

Radiation, atmosphere, dispersion media, absorption, layer.

REFERENCES

1. Lenoble J. *Perenos radiatsii v rasseivayushchikh i pogloshchayushchikh atmosferaakh* [Radiative transfer in scattering and absorbing atmospheres: standard computational procedures]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1990. 264 p.
2. Kokhanovsky A.A., Budak V.P., Cornet C., et al. Benchmark results in vector atmospheric radiative transfer. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 2010, vol. 111, pp. 1931–1946.
3. Pkhalagov Yu.A., Uzhegov V.N., Kozlov V.S., Panchenko M.V., Terpugova S.A., Yausheva E.P. Vosstanovlenie koeffitsientov aerolnogo oslableniya opticheskogo izlucheniya na protyazhennoy prizemnoy trasse po dannym izmereniy parametrov aerolya v lokalnom obeme [Retrieval of the aerosol extinction coefficients on a long near-ground path by the data on the aerosol parameters in a local volume]. *Atmospheric and oceanic optics*, 2013, vol. 26, no. 6, pp. 478–483.
4. Zhuravleva T.B., Sakerin S.M., Bedareva T.V., Kabanov D.M., Nasrtdinov I.M., Chesnokova T.Yu. Potoki solnechnoy radiatsii v bezoblachnoy atmosfere Zapadnoy Sibiri: sravnenie rezultatov modelirovaniya i naturnykh izmereniy [Solar radiation fluxes in the clear atmosphere of Western Siberia: a comparison of calculations with measurements]. *Atmospheric and oceanic optics*, 2013, vol. 26, no. 11, pp. 985–994.
5. Matvienko G.G., Pogodaev V.A. Optika atmosfery i okeana – neokonchennyy urok vzaimodeystviya opticheskogo izlucheniya so sredoy rasprostraneniya [Atmospheric and ocean optics as uncompleted task of interaction of optical radiation with a propagation medium]. *Atmospheric and oceanic optics*, 2012, vol. 25, no. 1, pp. 5–10.
6. Goryachev B.V., Mogilnitsky S.B. Nekotorye osobennosti perenosa izlucheniya v prostranstvenno ogranichennykh dispersnykh sredakh [Some special of radiation transfer in space-limited dispersion media]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2000, vol. 303, no. 3, pp. 91–104.
7. Goryachev B.V., Mogilnitsky S.B. Vliyanie otrazhayushchey poverkhnosti na radiatsionny balans dispersnoy sredy [The influence of reflective surface on radiation balance of dispersion media]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, no. 2, pp. 39–42.
8. Goryachev B.V., Mogilnitsky S.B. Perenos opticheskogo izlucheniya v sloistoy dispersnoy srede s otrazhayushchey poverkhnostyu [Optical radiation transfer in layered dispersion media with reflective surface]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 322, no. 2, pp. 78–81.
9. Goryachev B.V., Mogilnitsky S.B. Issledovanie otrazhatelnoy sposobnosti sloistoy dispersnoy sredy [The research of layered dispersion media reflectance]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 2, pp. 63–66.
10. Griesheimer D.P., Millman D.L., Willis C.R. Analysis of distances between inclusions in finite binary stochastic materials. *J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer*, 2011, vol. 112, pp. 577–598.
11. Kassianov E., Veron D. Stochastic radiative transfer in Markovian mixtures: Past, present, and future. *J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer*, 2011, vol. 112, pp. 566–576.
12. Blum M., Rozanov V.V., Burrows J.P., Bracher A. Coupled ocean-atmosphere radiative transfer model in the framework of software package SCIATRAN: Selected comparisons to model and satellite data. *Advances in Space Research*, 2012, vol. 49, pp. 1728–1742.
13. Schlundt C., Kokhanovsky A.A., von Hoyningen-Huene W., Dinter T., Istomina L., Burrows J.P. Synergetic cloud fraction determination for SCIAMACHY using MERIS. *Atmos. Meas. Tech.*, 2011, vol. 4, pp. 319–337.
14. Mukai S., Yokomae T., Sano I., Nakata M., Kokhanovsky A. Multiple scattering in a dense aerosol atmosphere. *Atmos. Meas. Tech. Discuss.*, 2012, vol. 5, pp. 881–907.
15. Otto S. Analytical properties of the radiance in atmospheric radiative transfer theory. *J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer*, 2014, vol. 133, pp. 329–350.