

УДК 536.3

<https://doi.org/10.25587/2222-5404-2026-23-2-50-58>

Оригинальная научная статья



Влияние пространственно-зависимого альbedo однократного рассеяния на перенос излучения

А. М. Тимофеев , Г. Н. Егорова 

Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова,

г. Якутск, Российская Федерация

 am.timofeev@s-vfu.ru

Аннотация

Важным параметром для описания переноса излучения в ослабляющей среде является альbedo однократного рассеяния, характеризующее соотношение между процессами рассеяния и поглощения в среде. При рассмотрении радиационного и комбинированного теплообмена альbedo обычно принимается постоянным, что позволяет упростить решение задачи. В то же время оптические свойства могут меняться по глубине среды. В данной работе проведен численный анализ поля излучения в плоском слое поглощающей, рассеивающей, излучающей среды с меняющимся по толщине альbedo однократного рассеяния. Для решения уравнения переноса излучения использован модифицированный метод средних потоков (СП-метод), с помощью которого учитывается широкий круг оптических параметров: зависимость оптических свойств от длины волны падающего излучения, анизотропия рассеяния, отражательная способность на границах слоя. Расчеты выполнены для различных альbedo, описывающих изменение с глубиной соотношения рассеяния и поглощения в ослаблении потока излучения в слое. Полученные результаты свидетельствуют о заметном влиянии профиля альbedo на поле излучения в слое ослабляющей среды и, соответственно, о важности корректного учета данного параметра при решении задач радиационного и комбинированного теплообмена.

Ключевые слова: радиационный теплообмен, поглощающая, рассеивающая, излучающая среда, оптически серая среда, пространственно-зависимое альbedo однократного рассеяния, анизотропное рассеяние, модифицированный метод средних потоков, плоский слой, численное моделирование

Финансирование. Исследование не имело финансовой поддержки

Для цитирования: Тимофеев А. М., Егорова Г. Н. Влияние пространственно-зависимого альbedo однократного рассеяния на перенос излучения. *Вестник СВФУ*. 2026;23(2):50–58. DOI: <https://doi.org/10.25587/2222-5404-2026-23-2-50-58>

Original article

Effect of space-dependent single scattering albedo on radiative transfer

Ayal M. Timofeev  , Gulnara N. Egorova 

M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation

 am.timofeev@s-vfu.ru

Аннотация

An important parameter for describing radiation transfer in a participating medium is the single scattering albedo, which characterizes the relationship between scattering and absorption processes in the medium. When considering radiation and combined heat transfer, the albedo is usually assumed to be constant, which makes it easier to solve the problem. At the same time, the optical properties can vary with the depth of the medium. In this study, a numerical analysis of the radiation field in a flat layer of absorbing, scattering, and emitting medium with a single scattering albedo varying in thickness is carried out. To solve the radiation transfer equation, a modified average fluxes method (AF- method) was used, which takes into account a wide range of optical parameters: the dependence of optical properties on the wavelength of incident radiation, scattering anisotropy, and reflectivity at layer boundaries. Calculations were performed for various albedos describing the change in the scattering and absorption ratio with depth in attenuation of the radiation flux in the layer. The results obtained indicate a noticeable effect of the albedo profile on the radiation field in the layer of the participating medium and, accordingly, the importance of correct consideration of this parameter when solving problems of radiation and combined heat transfer.

Keywords: radiative heat transfer, absorbing, scattering, emitting medium, optically gray medium, space-dependent single scattering albedo, anisotropic scattering, modified average fluxes method, flat layer, numerical modeling

Funding: No funding was received for writing this manuscript

For citation: Timofeev A. M., Egorova G. N. Effect of space-dependent single scattering albedo on radiative transfer. *Vestnik of NEFU*. 2026;23(2):50–58. DOI: <https://doi.org/10.25587/2222-5404-2026-23-2-50-58>

Введение

Исследование радиационного и комбинированного теплообмена в полупрозрачной (поглощающей, рассеивающей, излучающей) среде связано с решением интегродифференциального уравнения переноса излучения [1, 2].

$$\gamma \frac{\partial I_v(\tau_v, \mu)}{\partial \tau_v} + I_v(\tau_v, \mu) = (1 - \omega_v) n_v^2 I_{bv}(T) + \frac{\omega_v}{2} \int_{-1}^1 p_v(\mu, \mu') I_v(\tau_v, \mu') d\mu'. \quad (1)$$

Здесь I_v – интенсивность излучения, I_{bv} – интенсивность излучения черного тела (функция Планка), n_v – спектральный показатель преломления, μ и μ' – косинусы углов падающего и рассеянного лучей, $\tau_v = k_v x$ – спектральная оптическая глубина, x – пространственная координата, $p(\mu, \mu')$ – индикатриса рассеяния (фазовая функция),

$$\omega_v = \beta_v / k_v \quad (2)$$

– спектральное альbedo однократного рассеяния (число Шустера), $k_v = \alpha_v + \beta_v$ – спектральный коэффициент ослабления, α_v и β_v – спектральные коэффициенты поглощения и рассеяния, индекс v (частота) обозначает спектральную величину.

Ввиду сложности и трудоемкости решения уравнения переноса принимаются различные упрощенные модели, касающиеся главным образом рассеяния излучения в среде. В частности, рассматривается обычно случай постоянного альbedo однократного рассеяния. Работы, в которых решается уравнение переноса с меняющимся альbedo, малочисленны и посвящены в основном математическим подходам к его решению при различных представлениях $\omega(x)$ [3–5]. В то же время представляет большой интерес анализ поля излучения в полупрозрачной среде с меняющимся по глубине альbedo рассеяния, особенно при рассмотрении задач комбинированного радиационно-кондуктивного и радиационно-конвективного теплообмена, когда излучение существенно влияет на поле температур.

В настоящей работе проведен численный анализ радиационного теплообмена в плоском слое поглощающей, рассеивающей, излучающей среды с меняющимся по толщине альbedo однократного рассеяния. Альbedo однократного рассеяния (2) характеризует соотношение между рассеянием и поглощением в ослаблении падающего излучения и меняется от 0 до 1. Значение $\omega = 0$ относится к случаю поглощающей излучающей среды, значение $\omega = 1$ относится к случаю рассеивающей (консервативной) среды. Изменение оптических свойств ослабляющей среды может происходить по разным причинам, например, из-за изменения температуры. Так, для снежно-ледовой толщи вследствие повышения температуры меняется зернистость среды, что ведет к изменению коэффициента рассеяния, при этом коэффициент поглощения остается практически неизменным [6].

Постановка задачи и метод решения

Рассмотрим радиационный теплообмен в плоском слое поглощающей, рассеивающей, излучающей среды с меняющимся по толщине альbedo однократного рассеяния $\omega(x)$. Границы слоя являются непрозрачными, диффузно излучающими и отражающими. Распределение температуры в слое является линейным по координате x (что близко к решению уравнения теплопроводности для граничных условий первого рода):

$$T/T_0 = 1 - (T_l/T_0) \cdot x/x_0, \quad (3)$$

где T_0 – температура «горячей» границы (определяющая температура), T_l – температура «холодной» границы, x_0 – толщина слоя.

Для решения задачи используется модифицированный метод средних потоков (СП-метод) [7]. Метод является эффективным инструментом для решения задач радиационного и комбинированного теплообмена в средах с простой конфигурацией, позволяющий учитывать широкий круг оптических параметров [8–9]. Он относится к классу прямых дифференциальных методов и в его основе лежит преобразование интегро-дифференциальной задачи (1) в систему двух нелинейных дифференциальных уравнений:

$$\frac{d}{d\tau_v}(\Phi_v^+ - \Phi_v^-) + (1 - \omega_v)(m_v^+ \Phi_v^+ - m_v^- \Phi_v^-) = (1 - \omega_v)n_v^2 \Phi_{0v}, \quad (4)$$

$$\frac{d}{d\tau_v}(m_v^+ \delta_v^+ \Phi_v^+ - m_v^- \delta_v^- \Phi_v^-) + (1 - \omega_v g_v)(\Phi_v^+ - \Phi_v^-) = 0. \quad (5)$$

Система (4)–(5) дополняется граничными условиями, учитывающими различные эффекты: зеркально-диффузное отражение, преломление для полупрозрачных границ и др. Для непрозрачных границ с диффузным отражением граничные условия СП-системы могут быть записаны следующим образом:

$$\tau_v = 0: \quad \Phi_v^- = \varepsilon_{lv} \Phi_{0v} / 4 + r_{lv} \Phi_v^+, \quad (6)$$

$$\tau_v = \tau_{0v} : \Phi_v^- = \varepsilon_{2v} \Phi_{0v} / 4 + r_{2v} \Phi_v^+ \quad (7)$$

Здесь

$$\Phi_v^\pm(\tau_v) = \pm \frac{2\pi \int_{0(-1)}^{1(0)} I_v(\tau_v, \mu) \mu d\mu}{4\sigma T_0^4} \quad (8)$$

– безразмерные плотности спектральных полусферических потоков,

$$m_v^\pm(\tau_v) = \frac{\int_{0(-1)}^{1(0)} I_v(\tau_v, \mu) d\mu}{\int_{0(-1)}^{1(0)} I_v(\tau_v, \mu) \mu d\mu} \quad \text{и} \quad \delta_v^\pm(\tau_v) = \frac{\int_{0(-1)}^{1(0)} I_v(\tau_v, \mu) \mu^2 d\mu}{\int_{0(-1)}^{1(0)} I_v(\tau_v, \mu) d\mu} \quad (9)$$

– коэффициенты переноса, которые определяются в ходе итерационного решения, $\Phi_{0v}(\tau_v) = I_{bv}(T) / (4\sigma T_0^4)$ – безразмерная плотность потока равновесного излучения, $\tau_{0v} = k_v x_0$ – спектральная оптическая толщина слоя, ε_v и r_v – спектральные полусферические диффузная излучательная и отражательная способности границ, связанные между собой соотношением $\varepsilon_v = 1 - r_v$.

$$g_v = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 p(\mu_0) \mu_0 d\mu_0 \quad (10)$$

– коэффициент асимметрии (средний косинус угла рассеяния) индикатрисы рассеяния [2], постулируемой в виде:

$$p_v(\mu, \mu') = \sum_{n=0}^N a_n P_n(\mu_0), \quad a_0 = 1, \quad (11)$$

где μ_0 – косинус угла между падающим и рассеянным лучами, P_n – полином Лежандра порядка n .

Из найденных в ходе решения системы (4)–(7) спектральных полусферических потоков (8) определяется плотность интегрального результирующего потока излучения:

$$\Phi = \int_0^\infty (\Phi_v^+ - \Phi_v^-) dv \quad (12)$$

и дивергенция потока излучения:

$$P = \frac{d\Phi}{d(x/x_0)} = \int_0^\infty \tau_{0v} (1 - \omega_v) (\Phi_{0v} - (m_v^+ \Phi_v^+ - m_v^- \Phi_v^-)) dv. \quad (13)$$

Метод решения задачи заключается в следующем. В качестве начального приближения для коэффициентов переноса используются осредненные значения $m^\pm = \pm 2$, $\delta^\pm = 1/3$. Указанные значения коэффициентов переноса получаются из соотношений (9) в предположении изотропного поля излучения в соответствующих полусферах. Далее решается СП-система и коэффициенты переноса уточняются по формулам:

$$m_v^{\pm}(\tau_v) = \frac{S_0^{\pm}(\tau_v)}{S_1^{\pm}(\tau_v)}, \quad \delta_v^{\pm}(\tau_v) = \frac{S_2^{\pm}(\tau_v)}{S_0^{\pm}(\tau_v)}, \quad (14)$$

где обобщенные моменты имеют вид (индекс v для краткости опущен):

$$S_n^+(\tau) = c_1 E_{n+2}(\tau) + \int_0^{\tau} (\psi_1(\tau') E_{n+1}(\tau - \tau') - \psi_2(\tau') E_{n+2}(\tau - \tau') + \psi_3(\tau') E_{n+3}(\tau - \tau')) d\tau, \quad (15)$$

$$S_n^-(\tau) = (-1)^n [c_2 E_{n+2}(\tau) + \int_{\tau}^{\tau_0} (\psi_1(\tau') E_{n+1}(\tau' - \tau) - \psi_2(\tau') E_{n+2}(\tau' - \tau) + \psi_3(\tau') E_{n+3}(\tau' - \tau)) d\tau'], \quad (16)$$

$n = 0, 1, 2$.

Здесь

$$c_1 = \frac{\varepsilon_1 \Phi_0(0)}{2} + 2r_1 \Phi^-(0) = m^+(0) \Phi^+(0), \quad (17)$$

$$c_2 = \frac{\varepsilon_2 \Phi_0(\tau_0)}{2} + 2r_2 \Phi^+(\tau_0) = -m^-(\tau_0) \Phi^-(\tau_0), \quad (18)$$

$$\psi_1(\tau) = \frac{1-\omega}{2} \Phi_0(\tau) + \frac{\omega}{2} (m^+(\tau) \Phi^+(\tau) - m^-(\tau) \Phi^-(\tau)) - \frac{1}{3} \psi_3(\tau), \quad (19)$$

$$\psi_2(\tau) = \frac{1}{2} \omega a_1 (\Phi^+(\tau) - \Phi^-(\tau)), \quad (20)$$

$$\psi_3(\tau) = \frac{3}{8} \omega a_2 \left(3 \cdot (m^+(\tau) \delta^+(\tau) \Phi^+(\tau) - m^-(\tau) \delta^-(\tau) \Phi^-(\tau)) \right) - (m^+(\tau) \Phi^+(\tau) - m^-(\tau) \Phi^-(\tau)), \quad (21)$$

где

$$E_n(\tau) = \int_0^{\tau} e^{-\frac{\tau}{\mu}} \cdot \mu^{n-2} \cdot d\mu \quad (22)$$

– интегрально-экспоненциальная функция.

Соотношения для коэффициентов переноса (14) получаются из формального решения уравнения переноса (1) с указанными граничными условиями при $N=2$ в разложении (11) для индикатрисы рассеяния.

Итерационный процесс повторяется до выполнения критерия конца итераций. На каждом шаге итераций краевая задача (4)–(7) решается методом матричной факторизации или прогонки, а интегралы в (15)–(16) вычисляются с помощью стандартных квадратурных формул. Быстрая сходимость метода (3–4 итерации) позволяет эффективно использовать его для широкого класса задач радиационного и комбинированного теплообмена.

Анализ результатов

В работе рассмотрена задача для следующих типичных значений определяющих параметров: $T_f/T_0 = 0.5$, $\tau_0 = 1$, $r_1 = r_2 = 0.1$. Среда считается оптически серой. Расчеты выполнены для следующих профилей альbedo однократного рассеяния $\omega(x)$ (рис. 1):

- 1 – постоянный: $\omega = 0.55625$;
 2 – линейно возрастающий: $\omega = 0.1625 + (0.95 - 0.1625) x / x_0$;
 3 – линейно убывающий: $\omega = 0.95 - (0.95 - 0.1625) x / x_0$;
 4 – ступенчатый возрастающий:
 $\omega = 0.05$, $0 < x / x_0 < 0.375$;
 $\omega = 0.45 \cos(8\pi x) + 0.5$, $0.375 < x / x_0 < 0.5$;
 $\omega = 0.95$, $0.5 < x / x_0 < 1$;
 5 – ступенчатый убывающий:
 $\omega = 0.95$, $0 < x / x_0 < 0.5$;
 $\omega = 0.45 \cos(8\pi x) + 0.5$, $0.5 < x / x_0 < 0.625$;
 $\omega = 0.05$, $0.625 < x / x_0 < 1$;

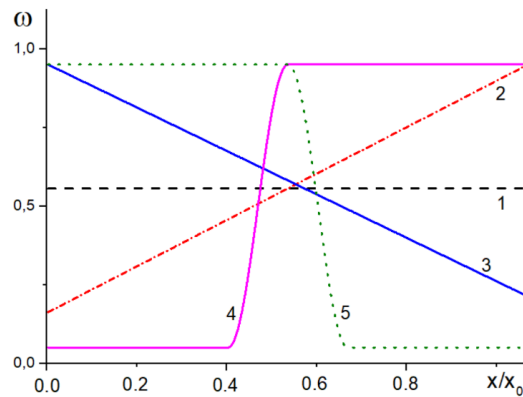


Рис. 1. Профили альbedo однократного рассеяния $\omega(x)$
Fig. 1. Single-scattering albedo profiles $\omega(x)$

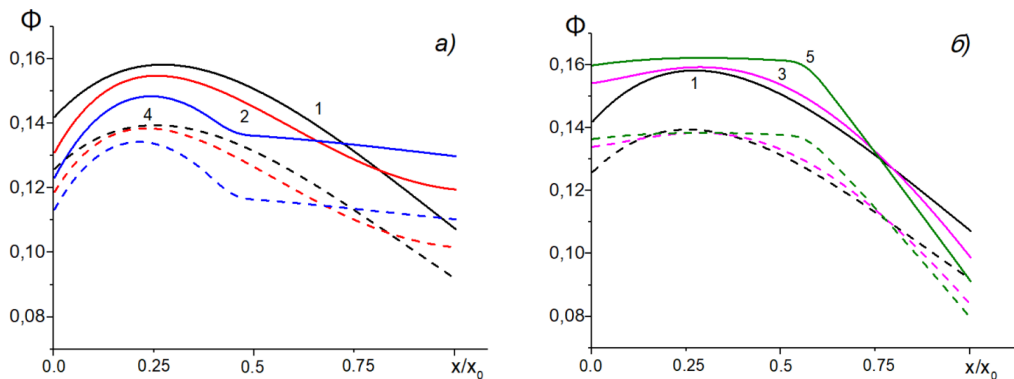


Рис. 2. Влияние альbedo на радиационные потоки.
 Цифры соответствуют профилям альbedo. Сплошные кривые – анизотропное рассеяние ($g=0.57$), штриховые кривые – изотропное рассеяние ($g=0$)
Fig. 2. Effect of albedo on radiation fluxes.
 The numbers correspond to the albedo profiles. Solid curves represent anisotropic scattering ($g=0.57$), dashed curves represent isotropic scattering ($g=0$)

Выбранное значение для постоянного альbedo $\omega = 0.55625$ соответствует среднему значению для профилей альbedo 2–5.

На рис. 2а и рис. 2б приведены результаты расчетов радиационного потока соответственно для профилей альbedo 2, 4 и 3, 5. Видно, что поле излучения

для постоянного осредненного альбеда (кривые 1) заметно отличается от поля излучения в случае меняющегося альбеда (кривые 2–5). Радиационные потоки в ослабляющей среде убывают от горячей границы в сторону холодной. Но в отличие от поглощающей неизлучающей среды, где убывание потока излучения происходит по экспоненциальному закону Бугера, в излучающей среде наблюдается сначала возрастание радиационного потока вблизи горячей границы слоя, вызванное собственным излучением среды. В преимущественно рассеивающей среде (при больших значениях ω) по сравнению с преимущественно поглощающей средой (малые значения ω) ослабление потока излучения происходит меньше. Соответственно уровни радиационного потока выше на участках, где больше ω , и ниже, где альбеда меньше. Иллюстрацией этого, например, является рис. 2б для убывающего по глубине альбеда $\omega(x)$.

В непоглощающей рассеивающей среде поле излучения не взаимодействует с полем температур, и графики радиационных потоков выходят на пологий режим. Это хорошо видно на рис. 2 для кривых 4 и 5 на участках, где значения $\omega = 0.95$.

Рассеяние излучения в неоднородной среде может носить анизотропный характер, при котором интенсивность излучения зависит от направления. В уравнении переноса излучения (1) это явление учитывается индикатрисой рассеяния (фазовой функцией) [1, 2]. Фундаментальным параметром индикатрисы рассеяния является коэффициент асимметрии g , представляющий собой количество излучения, рассеянного в прямом направлении. Например, $g = 1, 0$ и -1 соответствуют полному прямому рассеянию, изотропному рассеянию и полному обратному рассеянию соответственно. По сравнению с изотропным рассеянием (штриховые кривые) сильное анизотропное рассеяние «вперед» приводит к увеличению переноса излучения в сторону холодной границы, уровень которого повышается с увеличением значения параметра асимметрии g (рис. 2).

На рис. 3 показано поведение дивергенции потока излучения, представляющей интерес при решении задач комбинированного теплообмена. Дивергенция потока излучения, взятая с отрицательным знаком, рассматривается как объемный источник тепла в уравнении энергии. При данном распределении температуры излучение приводит к выделению тепла вблизи холодной границы, в то время как у горячей границы формируются стоки тепла из-за поглощения и «высвечивания» в сторону холодной границы. В рассеивающей среде (при значениях ω близких 1) величина дивергенции потока излучения стремится к нулю («консервативная среда»), что хорошо видно из графиков кривых 4 и 5 на соответствующих участках.

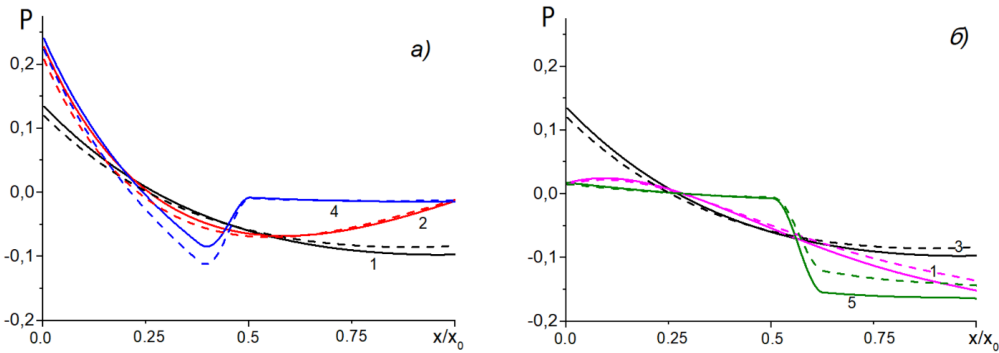


Рис. 3. Влияние альбеда на дивергенцию потока излучения

Обозначения соответствуют рис. 2

Fig. 3. Effect of albedo on radiation flux divergence. The designations are the same as in Fig. 2

Из анализа графиков также следует, что результаты расчетов дивергенции радиационного потока для изотропного и анизотропного рассеяния отличаются незначительно. Слабое влияние анизотропии рассеяния на поведение дивергенции радиационного потока объясняется тем, что последняя, являясь интегралом по сфере, слабо связана с формой индикатрисы рассеяния.

Заключение

Альбе́до однократного рассеяния является ключевым параметром, определяющим распределение радиационного потока в слое поглощающей, рассеивающей, излучающей среды. Его изменение (как по величине, так и по пространственной неоднородности) напрямую влияет на распределение радиационного потока и дивергенции потока излучения внутри слоя.

Для решения уравнения переноса излучения, необходимого для анализа поля излучения для различных альбе́до рассеяния, использован модифицированный метод средних потоков (СП-метод). Метод является эффективным инструментом для решения задач радиационного и комбинированного теплообмена в средах с простой конфигурацией, позволяющим учитывать широкий круг оптических параметров: зависимость оптических свойств от длины волны падающего излучения, анизотропию рассеяния, отражательную способность границ слоя.

Выполненные расчеты свидетельствуют о важной роли профиля альбе́до однократного рассеяния на поле излучения в слое ослабляющей среды. Использование осредненного значения $\omega = \text{const}$ для расчета поля излучения с меняющимся по толщине слоя альбе́до $\omega(x)$ приводит к существенному различию в результатах расчета радиационных потоков.

Таким образом, точный учет альбе́до однократного рассеяния критически важен для корректного моделирования радиационного и комбинированного теплообмена в различных природных и технических системах.

Л и т е р а т у р а / R e f e r e n c e s

1. Оцисик М.Н. Сложный теплообмен. Москва: Мир; 1976.
2. Özışık MN. *Radiative Transfer and Interaction with Conduction and Convection*. Moscow: Mir; 1976 (in Russ.).
3. Modest MF. *Radiative Heat Transfer*, Second ed. New York: Acad. Press. 2003
4. Cengel YA, Özışık MN. Radiation transfer in an anisotropically scattering plane-parallel medium with space-dependent albedo $\omega(x)$. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 1985;34(3):263–270.
5. Haggag MH, Machali HM, Madkour M. The solution of radiation transfer problem for a slab with space-dependent albedo and anisotropic scattering. *Astrophys Space Sci*. 1988;147:295–306.
6. Lobato FS, Steffen JrV, Neto AS. Estimation of space-dependent single scattering albedo in a radiative transfer problem using differential evolution. *Inverse Problems in Science and Engineering*. 2012;20(7):1043–1055.
7. Warren SG. Optical properties of snow. *Rev. Geophys. Space Phys*. 1982;20:67–89.
8. Рубцов Н.А., Тимофеев А.М., Саввинова Н.А. *Комбинированный теплообмен в полупрозрачных средах*. Новосибирск: Изд-во СО РАН; 2003.
9. Rubtsov NA, Timofeev AM, Savvinova NA. *Combined Heat Transfer in Semi-Transparent Media*. Novosibirsk: SB RAS Publishing House; 2003 (in Russ.).
10. Тимофеев А.М. Влияние оптических свойств на радиационно-кондуктивный теплообмен в двухслойной полупрозрачной системе. *Теплофизика и аэромеханика*. 2020;27(1):135–142.
11. Timofeev AM. Effect of optical properties on radiative-conductive heat transfer in a system of two semitransparent layers. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2020;27(1):135–142 (in Russ.).
12. Слепцов С.Д., Саввинова Н.А. Численное исследование теплового состояния слоя анизотропно рассеивающего излучение льда. *Теплофизика и аэромеханика*. 2021;28(6):957–962.
13. Sleptsov SD, Savvinova NA. Numerical investigation of the thermal state of a layer of anisotropically scattering ice. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2021;28(6):957–962.

Сведения об авторах

ТИМОФЕЕВ Айал Михайлович – д. ф.-м. н., профессор, ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова», Якутск, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-5771-937X>, Researcher ID: A-6389-2017, Scopus Author ID: 57198428433, SPIN: 8135-0385, e-mail: am.timofeev@s-vfu.ru

ЕГОРОВА Гульнара Николаевна – аспирант, старший преподаватель, ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова», Якутск, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0009-8007-0239>, ResearcherID: AAO-9290-2020, e-mail: fluke_fgn@mail.ru

About the authors

Ayal M. TIMOFEEV – Doct. Sci. (Physics and Mathematics), Professor, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-5771-937X>, Researcher ID: A-6389-2017, Scopus Author ID: 57198428433, SPIN: 8135-0385, e-mail: am.timofeev@s-vfu.ru

Gulnara N. EGOROVA – postgraduate student, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0009-8007-0239>, ResearcherID: AAO-9290-2020, e-mail: fluke_fgn@mail.ru

Вклад авторов

Тимофеев А.М. – разработка концепции, руководство исследованием, методология, программное обеспечение

Егорова Г.Н. – проведение исследования, проведение статистического анализа, верификация данных, редактирование рукописи

Authors' contribution

Ayal M. Timofeev – conceptualization, supervision, methodology, software

Gulnara N. Egorova – investigation, проведение статистического анализа, validation, writing - review & editing

Конфликт интересов

Тимофеев Айал Михайлович является членом редколлегии журнала *Вестник Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова*

Conflict of interests

Ayal M. Timofeev is a member of the editorial board of *Vestnik of North-Eastern Federal University*

Поступила в редакцию / Submitted 09.04.2026

Поступила после рецензирования / Revised 30.04.2026

Принята к публикации / Accepted 05.05.2026