

ПЕРЕНОС ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В СЛОИСТОЙ АТМОСФЕРЕ

Б.В. Горячев¹, Г.Ю. Григорьев², А.А. Аверкиев¹

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет

²Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

bvg@tpu.ru, grigoriev_gy@nrcki.ru, averkiev_95@mail.ru

Ключевые слова: Радиация, атмосфера, слой, баланс

Аннотация

Рассмотрен перенос излучения в стратифицированной атмосфере. Получены аналитические выражения для расчета коэффициента пропускания, отражательной и поглощательной способности слоистой дисперсной среды. Установлено, что при консервативном рассеянии радиационный баланс атмосферы практически не зависит от высотной стратификации аэрозоля. Показано, что отражательная способность атмосферы слабо зависит от оптической плотности приземного слоя с поглощением при любом значении оптической плотности верхнего слоя и вероятности выживания кванта. Определена значительная зависимость поглощающей способности атмосферы от высотной стратификации атмосферных параметров.

1. Введение

Радиационный баланс атмосферы является ключевым элементом в моделях, которые служат основой для предсказания погоды и климата [1]. Точность вычисления составляющих радиационного баланса зависит от точности используемых методов [2–12], и детального рассмотрения всех эффектов, влияющих на результат.

Целью данной работы является решение задачи переноса излучения в аналитическом виде и определение составляющих радиационного баланса в стратифицированной атмосфере. Аналитическое решение задачи получено с использованием метода многократных отражений [4]. Стратифицированная атмосфера представляется в виде трех плоских слоев, при нормальном падении потока излучения на поверхность дисперсной среды. Внутри каждого слоя оптические параметры среды считаются постоянными. Получены аналитические выражения для определения коэффициента пропускания $A_{123}(\tau, a, \Lambda)$,

отражательной способности $B_{123}(\tau, a, \Lambda)$ и поглощательной способности $C_{123}(\tau, a, \Lambda)$ стратифицированной атмосферы.

2. Теория

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 $\tau_{2x_0} \times \tau_{1y_0} \times \tau_{1z_0}$; третьего слоя $\tau_{3x_0} \times \tau_{1y_0} \times \tau_{1z_0}$; индикатриса рассеяния излучения, характеризуемая степенью вытянутости $a = (\eta + 2\mu) / (\beta + 2\mu)$, η , β , μ – интегральные параметры индикатрисы рассеяния [3, 4]; вероятность выживания кванта в первом слое Λ_1 , во втором – Λ_2 , в третьем – Λ_3 . В данной модели стратифицированной атмосферы, используемой для расчета радиационных характеристик атмосферы, параметры каждого слоя могут быть определены в результате атмосферных исследований [1–3]. На основе метода многократных отражений получены формулы:

$$A_{123} = \frac{F_1 A_3}{F_5}; \quad B_{123} = B_1 + \frac{A_1^2 (A_2^2 B_3 + B_2 F_5)}{F_2 F_5}; \quad C_{123} = C_1 + \frac{A_1}{F_2} \left[F_6 + \frac{A_2 (F_2 F_7 + B_3 F_6)}{F_5} \right].$$

Обозначения:

$$F_1 = A_1(\tau, a, \Lambda) A_2(\tau, a, \Lambda); \quad F_2 = 1 - B_1(\tau, a, \Lambda) B_2(\tau, a, \Lambda);$$

$$F_3 = 1 - B_1(\tau, a, \Lambda) B_3(\tau, a, \Lambda); \quad F_4 = A_1^2(\tau, a, \Lambda) B_2(\tau, a, \Lambda) B_3(\tau, a, \Lambda);$$

$$F_5 = F_2 F_3 - F_4; \quad F_6 = C_2(\tau, a, \Lambda) + C_1(\tau, a, \Lambda) B_2(\tau, a, \Lambda);$$

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 любым способом, определенным в [4].

Рассмотрим некоторые результаты расчетов по данным формулам потоков монохроматического излучения в стратифицированной атмосфере.

Для расчетов используем следующие параметры: два слоя имеют сферическую индикатрису рассеяния излучения ($a=1$), консервативное рассеяние ($\Lambda=1$) и одинаковую оптическую плотность. Третий слой имеет анизотропную

индикатрису рассеяния ($a=10$), различную вероятность выживания кванта и переменную оптическую плотность.

3. Результаты

Результаты расчетов приведены на рис. 1–4. Поперечные оптические размеры дисперсной среды равны $\tau_{1y_0} \times \tau_{1z_0} = 10^5$.

На рис. 1 представлены зависимости коэффициента пропускания A_{123} трехслойной дисперсной среды от оптической плотности поглощающего слоя дисперсной среды.

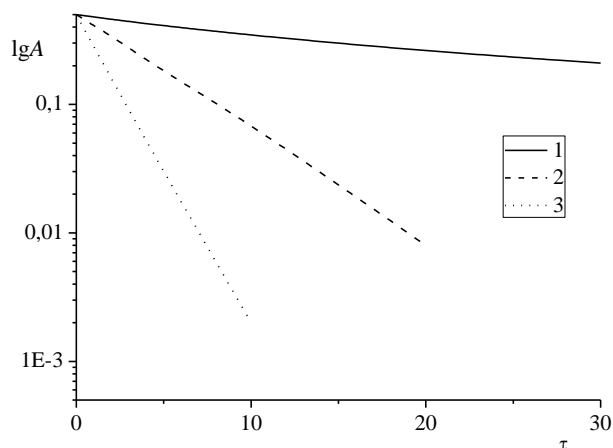
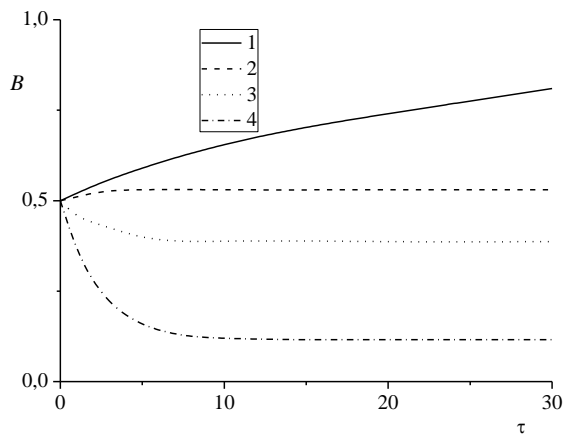


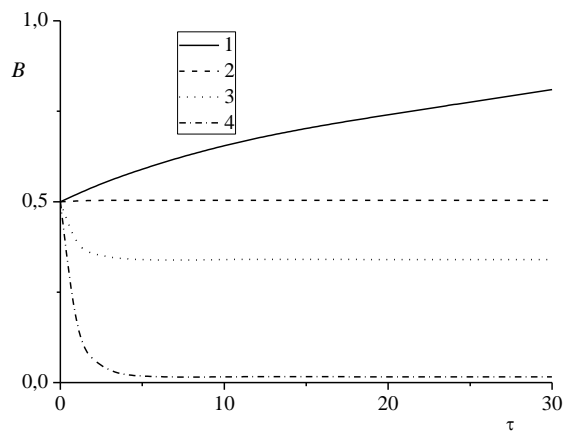
Рис. 1. Зависимость коэффициента пропускания A_{123} трехслойной дисперсной среды от оптической плотности поглощающего слоя дисперсной среды.

1 – вероятность выживания кванта $\Lambda=1$; степень вытянутости индикатрисы рассеяния излучения $a_1=a_2=1, a_3=10$; 2 – $\Lambda=0,9$; $a_1=a_2=1, a_3=10$; 3 – $\Lambda=0,5$; $a_1=a_3=1, a_2=10$; оптическая плотность слоев дисперсной среды $\tau_{1x_0} = \tau_{2x_0} = \tau_{3x_0} = 1$

На рис. 2 представлены зависимости отражательной способности B_{123} трехслойной дисперсной среды от оптической плотности поглощающего слоя дисперсной среды при трех значениях вероятности выживания кванта и одинаковой оптической плотности всех трех слоев.



a)

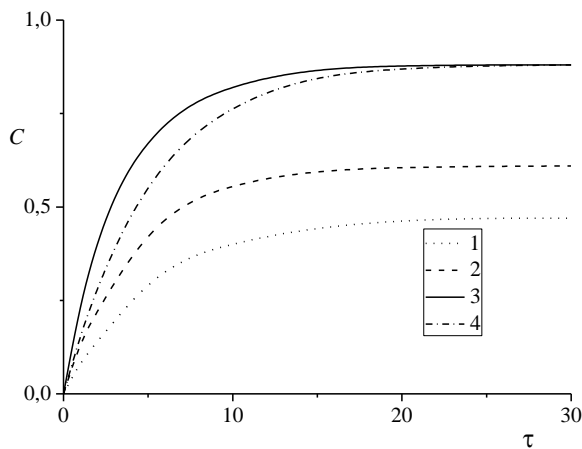


b)

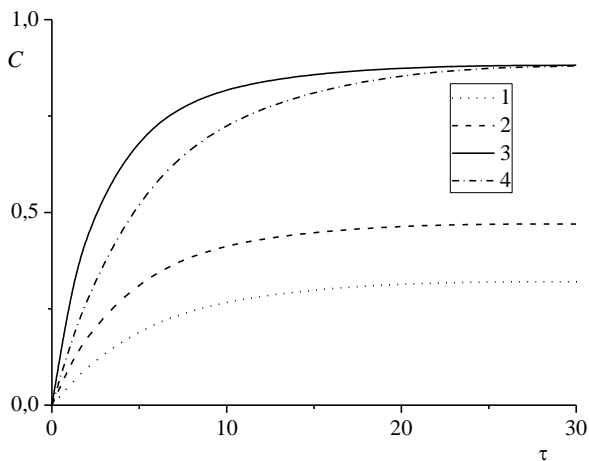
Рис. 2. Зависимость отражательной способности B_{123} трехслойной дисперсной среды от оптической плотности поглощающего слоя дисперсной среды. Вероятность выживания кванта a) $\Lambda=0,9$; b) $\Lambda=0,5$. 1 – $\Lambda=1$; степень вытянутости индикатрисы рассеяния излучения $a_1=a_2=1, a_3=10$; 2 – $a_1=a_2=1, a_3=10$; 3 – $a_1=a_3=1, a_2=10$; 4 – $a_2=a_3=1, a_1=10$; оптическая плотность слоев дисперсной среды $\tau_{1x_0} = \tau_{2x_0} = \tau_{3x_0} = 1$

На рис. 3 представлены зависимости поглощательной способности C_{123} трехслойной дисперсной среды от оптической плотности поглощающего слоя дисперсной среды. Вероятность выживания кванта в поглощающем слое $\Lambda=0,9$.

Рисунки *a)* и *b)* соответствуют значениям оптической плотности слоев, равным 1 и 2.



a)

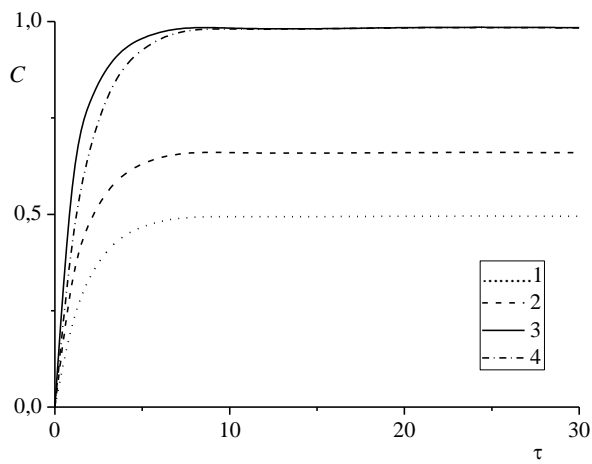


b)

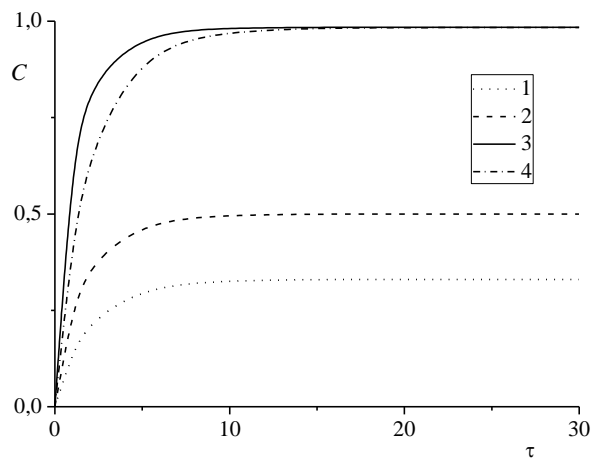
Рис. 3. Зависимость поглощательной способности C_{123} трехслойной дисперсной среды от оптической плотности поглощающего слоя дисперсной среды. Вероятность выживания кванта $\Lambda=0,9$. 1 – $a_1=a_2=1, a_3=10$; 2 – $a_1=a_3=1, a_2=10$; 3 – $a_2=a_3=1, a_1=10$; 4 – один слой $a=10$;

a) оптическая плотность слоев дисперсной среды $\tau_{1x_0} = \tau_{2x_0} = \tau_{3x_0} = 1$; *b)* $\tau_{1x_0} = \tau_{2x_0} = \tau_{3x_0} = 2$

На рис. 4 представлены те же данные, что и на рис. 3, но при $\Lambda=0,5$.



a)



b)

Рис. 4. Зависимость поглощательной способности C_{123} трехслойной дисперсной среды от оптической плотности поглощающего слоя дисперсной среды. Вероятность выживания кванта $\Lambda=0,5$. 1 – $a_1=a_2=1, a_3=10$; 2 – $a_1=a_3=1, a_2=10$; 3 – $a_2=a_3=1, a_1=10$; 4 – один слой $a=10$;

a) оптическая плотность слоев дисперсной среды $\tau_{1x_0} = \tau_{2x_0} = \tau_{3x_0} = 1$; b) $\tau_{1x_0} = \tau_{2x_0} = \tau_{3x_0} = 2$

4. Заключение

Таким образом, по результатам работы можно сделать следующие выводы.

1. Получены аналитические выражения для расчета коэффициента пропускания, отражательной и поглощательной способности слоистой дисперсной среды.
2. При консервативном рассеянии радиационный баланс атмосферы практически не зависит от высотной стратификации аэрозоля.
3. Отражательная способность атмосферы слабо зависит от оптической плотности приземного слоя с поглощением при любом значении оптической плотности верхнего слоя.
4. Коэффициент пропускания слоистой атмосферы слабо зависит от высотного распределения атмосферных параметров при любой величине вероятности выживания кванта в поглощающем слое.
5. Поглощающая способность атмосферы сильно зависит от высотной стратификации атмосферных параметров и может быть больше (или меньше) коэффициента поглощения одного слоя с поглощением в зависимости от его высоты.
6. Отражающая способность атмосферы слабо зависит от распределения поглощающей субстанции по высоте при любом значении вероятности выживания кванта.
7. Поглощающая способность атмосферы имеет резко выраженную зависимость с насыщением от величины оптической толщи поглощающего слоя (например, при $\tau > 5$ поглощающая способность атмосферы не зависит от величины оптической плотности).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kokhanovsky, A.A. [Aerosol Optics. Light Absorption and Scattering by Particles in the Atmosphere] Springer, Berlin, New York, 153 (2008).
2. Kokhanovsky, A.A., Budak, V.P., Cornet, C., et al. "Benchmark results in vector atmospheric radiative transfer" // J. Quant. Spectr. Radiat. Transfer. V. 111. P. 1931-1946 (2010).

3. Matvienko, G.G., Pogodaev, V.A. "Atmospheric and ocean optics as uncompleted task of interaction of optical radiation with a propagation medium" // Atmospheric and oceanic optics. V. 25. No. 01. P. 5-10 (2012).
4. Goryachev, B.V., Grigoriev, G.Yu. "Effect of target shape on the flow characteristics of atomic particles" // Izvestiya vuzov. Physics. T. 57. No. 11/2. P. 287-291 (2014).
5. Goryachev, B.V., Mogilnitskiy, S.B. "The influence absorb stratification on absorptivity of atmosphere" // Proc. SPIE. V. 9292 : Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. 92920D. doi:10.1117/12.2075424 (2014). <http://dx.doi.org/10.1117/12.2075424>
6. Larionov, V.V., Nikitenkov, N.N., Tyurin, Yu.I. "Diffusion of hydrogen in steels under conditions of electron irradiation" // Journal of technical physics. 86. V. 5. 155-158 (2016).
7. Lukin, I.P. "Coherence of the vortex Bessel beam reflected from the rough surface" // Proc. SPIE. 9680. 21st International Symposium Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 96801K. doi:10.1117/12.2205568 (2015).
<http://dx.doi.org/10.1117/12.2205568>
8. Penner, I.E., Balin, Yu.S., Kokhanenko, G.P., Belan, B.D., Arshinov, M.Y., et al. "Detection of aerosol plumes from associated gas flaring by laser sensing" // Proc. SPIE 9680. 21st International Symposium Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. 96804D. doi:10.1117/12.2205797 (2015).
<http://dx.doi.org/10.1117/12.2205797>
9. Lukin, V.P., Nosov, V.V., Nosov, E.V and Torgaev, A.V. "Influence of atmospheric turbulence scales" // Proc. SPIE 9680. 21st International Symposium Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. 96806X. doi:10.1117/12.2205784 (2015).
<http://dx.doi.org/10.1117/12.2205784>
10. Kozlov, V.S., Rakhimov, R.F. and Shmargunov, V.P. "Variability of condensation properties of mixed smoke at different stages of its long evolution" // Proc. SPIE 9680. 21st International Symposium Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 968030. doi:10.1117/12.2204944 (2015).
<http://dx.doi.org/10.1117/12.2204944>
11. Balin, Yu.S., Samoilova, S.V., Penner, I.E. "Spaceborne and under-satellite laser sensing of aerosol and cloud fields of troposphere" // Atmospheric and oceanic optics. V. 20. No. 09. 767-772 (2007).