

УДК 551.501: 629.195.1

Доктор техн. наук А.Х. Ахмеджанов¹
Канд. техн. наук Т.К. Караданов¹

РАСЧЕТ ИНТЕНСИВНОСТИ РАССЕЯННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ ЕГО ПЕРЕНОСА В АТМОСФЕРЕ ДЛЯ ОПТИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА СПЕКТРА

Ключевые слова: аэрозоль, оптическая толщина, спутниковое зондирование

Выполнена численная реализация задачи переноса коротковолнового излучения в атмосфере при условии однократного рассеяния по данным космического зондирования. Получены расчетные значения интенсивности нисходящего и восходящего рассеянного излучения в атмосфере.

В настоящее время интенсивно развиваются методы и создаются алгоритмы для решения уравнения переноса излучения в приложении к задачам атмосферной оптики. На основе матричных функций Грина разработаны физические основы теории переноса излучения [10]. Исследованы непрерывных свойств решения краевой задачи для уравнения переноса с обобщенными условиями сопряжения на границе раздела сред [11]. Разделение решения уравнения переноса излучения на анизотропную и регулярную части обосновано в [9]. Матрично-операторный подход для метода решения векторного уравнения переноса излучения для стратифицированной среды на основе выделения анизотропной части предлагается в [8]. Вышеуказанные исследования открывают возможности моделирования спутниковых измерений параметров атмосферы и земной поверхности.

На основе математического моделирования получены количественные оценки рассеяния света крупными частицами в расчетах интегральных потоков солнечного излучения в атмосфере [5]. Полученные результаты позволяют построить улучшенную аппроксимацию плоского альbedo для использования в задачах дистанционного зондирования [2]. Выполнено моделирование переноса солнечного излучения в различных атмосферных условиях, предложены различные методы расчета атмосферных функций пропускания и потоков излучения [4].

¹ АО «НЦКИТ» НКА РК, г. Алматы, Казахстан

Разработан новый метод определения микрофизических параметров аэрозоля из спектральных измерений оптической толщины и яркости солнечного ореола [8]. На основе экспедиционных исследований показано, что высокие значения аэрозольной оптической толщины (АОТ) наблюдаются во всем диапазоне спектра (0,3...2,14 мкм) и обусловлены совокупным влиянием выносов аэрозоля (пылевого, антропогенного, дымового) из соседних районов континента. Результаты измерений АОТ над океанами, сравнения со спутниковыми данными и модельными расчетами, роль морской аэрозольной сети Maritime Aerosol Network (MAN), как составляющей сети AERONET представлены в работах [1]. Показано, что в многолетней изменчивости аэрозольной оптической толщины для различных географических регионов не проявляется значимой зависимости от циклов солнечной активности [6].

Спектральные области, в которых сосредоточена коротковолновая и длинноволновая солнечная радиация, практически не перекрываются, следовательно, перенос коротковолновой и длинноволновой радиации можно рассматривать отдельно. При таком подходе уравнение переноса излучения в атмосфере можно упростить. Для длинноволновой радиации пренебрежимо мало рассеяние, тогда как в коротковолновой области мало собственное излучение земли, облаков и атмосферы. В видимой области спектра, где существенно значение рассеяния излучения можно пренебречь поглощением.

Рассмотрим численную реализацию задачи переноса коротковолнового излучения в атмосфере при условии однократного рассеяния по данным космического зондирования.

Представим релеевскую $\tau_{\lambda\rho}$ и аэрозольную $\tau_{\lambda a}$ составляющие оптических толщин в следующем виде:

$$\tau_{\lambda\rho} = \int_0^z \rho \delta_{\lambda\rho} dz, \quad \tau_{\lambda a} = \int_0^z \rho_a \delta_{\lambda a} dz, \quad (1)$$

где $\delta_{\lambda\rho}$ и $\delta_{\lambda a}$ – релеевский и аэрозольный коэффициенты рассеяния, ρ – плотность воздуха, ρ_a – плотность аэрозоля.

Если для всей атмосферной толщии общую оптическую толщину обозначить $\tau_{\lambda o}$, то суммарную оптическую толщину атмосферы для уровня z , состоящую из релеевского и аэрозольного оптических толщин можно записать в следующем виде:

$$\tau_{\lambda}(z) = \tau_{\lambda\rho} + \tau_{\lambda a}. \quad (2)$$

Оптическая толщина слоя атмосферы за счет рэлеевского рассеяния рассчитывается по формуле [7]:

$$\tau_{\lambda\rho} = 0,02152 \frac{1,0455996 - 342,2906\lambda^{-2} - 0,9023085\lambda^2}{1 + 0,0022705988\lambda^{-2} - 85,965863\lambda^2} \frac{\Delta P}{P_s},$$

где λ – длина волны; ΔP – толщина слоя атмосферы; P_s – приземное давление. Среднее значение аэрозольной оптической толщины для данной территории можно найти на геопортале спутниковых данных.

При вышеуказанных предположениях уравнение переноса коротковолнового излучения при условии однократного рассеяния излучения будет иметь следующий вид:

$$\frac{dJ_{\lambda}^{\uparrow}}{d\tau_{\lambda}} = -\frac{J_{\lambda}^{\uparrow}}{\cos\theta} + \frac{\chi_{\lambda}}{\cos\theta} S_{\lambda 0} e^{-(\tau_{\lambda 0} - \tau_{\lambda}(z))\sec\theta_0}, \quad (3)$$

где J_{λ}^{\uparrow} – значение восходящего излучения длиной волны λ ,

$\chi_{\lambda} = \chi_{\rho\lambda} \frac{d\tau_{\lambda\rho}}{d\tau_{\lambda}} + \chi_{\lambda a} \frac{d\tau_{\lambda a}}{d\tau_{\lambda}}$ – средняя индикатриса, учитывающая рэлеев-

ское и аэрозольное рассеяния, $\chi_{\rho\lambda}$ и $\chi_{\lambda a}$ – значения индикатрисы рассеяния при рэлеевском и аэрозольном рассеянии. $S_{\lambda 0}$ – интенсивность потока солнечного излучения, приходящего на верхнюю поверхность атмосферы, θ – угол отраженного излучения (угол зондирования), θ_0 – угол прямого солнечного излучения (высота Солнца).

Введение средней индикатрисы рассеяния излучения может быть оправдано тем, что в нижних слоях атмосферы рассеяния определяется в основном аэрозольной составляющей (до 3 км), а на больших высотах (выше 3 км) рэлеевской. Известно, что изменение индикатрисы с высотой не очень сильно влияет на поток рассеяния радиации. Поэтому реальную индикатрису можно заменить осредненным по высоте значением \bar{X}_{λ} .

Обыкновенное неоднородное дифференциальное уравнение (3) будет иметь следующее решение:

$$J_{\lambda}^{\uparrow}(z) = J_{\lambda}^{\uparrow}|_{z=0} e^{-\tau_{\lambda}(z)\sec\theta} + \frac{S_{\lambda 0}\chi_{\lambda}}{\cos\theta} e^{-\tau_{\lambda}(z)\sec\theta} \int_0^{\tau_{\lambda}} e^{-(\tau_{\lambda 0} - t)\sec\theta_0 - t\sec\theta} dt. \quad (4)$$

$$J_{\lambda}^{\uparrow}|_{z=0} = \frac{q_{\lambda}}{\pi} [S_{\lambda 0} \cos\theta_0 e^{-\tau_{\lambda 0}\sec\theta_0} + D_{\lambda}(0)], \quad (5)$$

$$D_{\lambda}(0) = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} J_{\lambda}^{\downarrow} \cos \theta' \sin \theta' d\theta'. \quad (6)$$

где $D_{\lambda}(0)$ – нисходящий спектральный поток рассеянной радиации на уровне земной поверхности, φ – азимут.

Определим значение J_{λ}^{\downarrow} из уравнения

$$\frac{dJ_{\lambda}^{\downarrow}}{d\tau_{\lambda}} = \frac{J_{\lambda}^{\downarrow}}{\cos \theta} - \frac{\chi_{\lambda}}{\cos \theta} S_{\lambda 0} e^{-(\tau_{\lambda 0} - \tau_{\lambda}) \sec \theta_0}, \quad (7)$$

при граничном условии

$$J_{\lambda}^{\downarrow}(z) = \begin{cases} 0 & \text{при } \theta \neq \theta_0, \varphi \neq \varphi_0 \\ S_{\lambda 0} & \text{при } \theta = \theta_0, \varphi = \varphi_0 \end{cases}. \quad (8)$$

Решение задачи (7-8) имеет вид

$$J_{\lambda}^{\downarrow} = \frac{S_{\lambda 0} \chi_{\lambda} \sec \theta}{\sec \theta_0 - \sec \theta} [e^{-(\tau_{\lambda 0} - \tau_{\lambda}) \sec \theta} - e^{-(\tau_{\lambda 0} - \tau_{\lambda}) \sec \theta_0}]. \quad (9)$$

Таким образом, будем иметь полное решение задачи по данным спутниковой информации в видимой части спектра при условии однократного отражения в атмосфере. Выражение для величины J_{λ}^{\uparrow} переписывается в следующем виде, где q_{λ} – альbedo участка земной поверхности:

$$J_{\lambda}^{\uparrow} = \frac{q_{\lambda}}{\pi} [S_{\lambda 0} \cos \theta_0 e^{-\tau_{\lambda 0} \sec \theta_0} + D_{\lambda}^{\downarrow}(0)] e^{-\tau_{\lambda} \sec \theta} + \frac{S_{\lambda 0} \chi_{\lambda} \sec \theta}{\sec \theta + \sec \theta_0} [e^{-(\tau_{\lambda 0} - \tau_{\lambda}) \sec \theta} - e^{-\tau_{\lambda 0} \sec \theta_0 - \tau_{\lambda} \sec \theta}].$$

Выборка данных значений альbedo земной поверхности производилась с помощью основного программного пакета MOD09 (коэффициент отражения излучения от земной поверхности) для уровня земной поверхности по 7 каналам: 1B MODIS канал 1 (620...670 нм), 2 (841...876 нм), 3 (459...479 нм), 4 (545...565 нм), 5 (1230...1250 нм), 6 (1628...1652 нм), и 7 (2105...2155 нм). Значения альbedo q_{λ} меняется от 0,08 до 0,36 при различных значениях угла визирования и азимута.

Космический снимок сканера MODIS (спутник TERRA) за 7 июля 2015 г. (рис. 1). Распределение интенсивности уходящего излучения (радианс, $\text{вт}/\text{м}^2 \cdot \text{мкм} \cdot \text{ср}$) в районе оз. Балхаш ($44^{\circ}56' \dots 47^{\circ}42'$ с.ш., $73^{\circ}31' \dots 78^{\circ}54'$ в.д.) по 1 каналу с диапазоном 0,62...0,67 мкм (рис. 2). Значения интенсивности уходящего излучения на выделенном участке южного побережья оз. Балхаш ($46^{\circ}0' \dots 46^{\circ}34'$ с.ш., $76^{\circ}34' \dots 76^{\circ}54'$ в.д.) представ-

лены на рис. 3. Здесь значения интенсивности уходящего излучения изменяются от 70 до 85 $\text{Вт}/\text{м}^2\text{мкм}\cdot\text{ср}$.

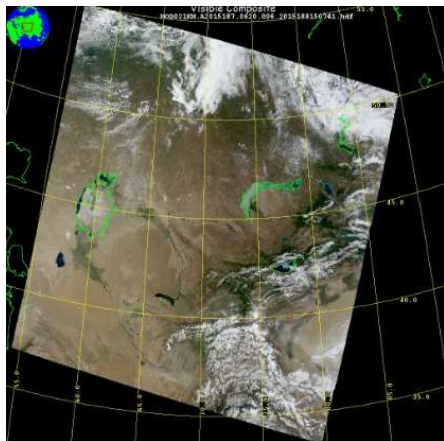


Рис. 1. Космический снимок сканера MODIS (спутник TERRA) за 7 июля 2015 года.

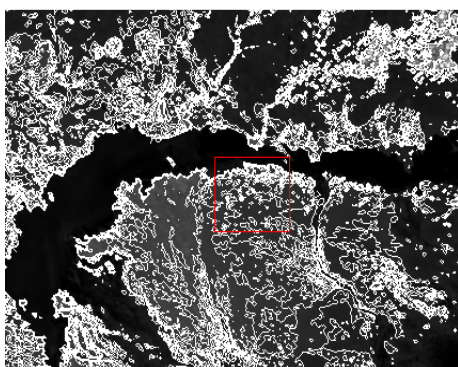


Рис. 2. Распределение интенсивности уходящего излучения (радианс) в районе оз. Балхаш.

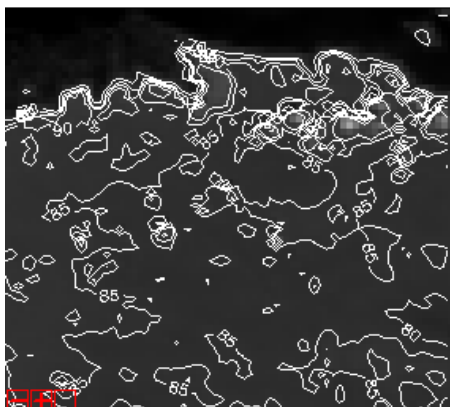


Рис. 3. Значения интенсивности уходящего излучения ($\text{Вт}/\text{м}^2\text{мкм}\cdot\text{ср}$) на выделенном участке южного побережья оз. Балхаш.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афонин С.В., Энгель М.В., Майор А.Ю. и др. Результаты комплексного аэрозольного эксперимента в переходной зоне материк-океан (Приморье и Японское море). Часть 2. Анализ пространственной и временной изменчивости характеристик аэрозоля по спутниковым данным и лидарным измерениям // Оптика атмосферы и океана. – 2010. – Т. 23. – № 9. – С. 811-819.
2. Басс Л.П., Гермогенова Т.А., Николаева О.В. и др. Численное моделирование краевых эффектов в оптике аэрозоля и облаков // Оптика атмосферы и океана. – 2009. – Т. 22. – № 2. – С. 201-206.
3. Веретенников В.В. Совместное определение микроструктуры и показателя преломления аэрозоля по данным солнечной фотометрии // Оптика атмосферы и океана. – 2007. – Т. 20. – № 3. – С. 214-221.
4. Журавлева Т.Б. Моделирование переноса солнечного излучения в различных атмосферных условиях. Часть I: Детерминированная атмосфера; Часть 2: Стохастическая облачность // Оптика атмосферы и океана. – 2008. – Т. 21. – № 2. – С. 99-114; №3. – С. 189-202.
5. Рублев А.Н., Горчакова И.А., Удалова Т.А.. Влияние крупных частиц на оценки оптических и радиационных характеристик пылевого аэрозоля // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 2011. – Т. 47. – № 2. С. 1-11.
6. Сакерин С.М., Горбаренко Е.В., Кабанов Д.М. Особенности многолетней изменчивости аэрозольной оптической толщины атмосферы и оценки влияния различных факторов // Оптика атмосферы и океана. – 2008. – Т. 21. – № 7. – С. 625-631.
7. Bodhaine B.A., Wood N.B., Dutton E.G., Slusser J.R. On Rayleigh Optical Depth Calculations // J. Atmos. Oceanic Technol. – 1999. – Vol. 16. – P. 1854-1861.
8. Budak V.P., Klyuykov D.A., Korkin S.V. Complete matrix solution of radiative transfer equation for PILE of horizontally homogeneous slabs // J.Q.S.R.T. 2010. doi: 10.1016/j.jqsrt.2010.08.028 (in press).
9. Budak V.P., Korkin S.V. On the solution of a vectorial radiative transfer equation in an arbitrary three-dimensional turbid medium with anisotropic scattering // J.Q.S.R.T. 2008. – V. 109. – P. 220-234.
10. Budak V.P., Veklenko B.A. Boson peak, flickering noise, backscattering processes and radiative transfer in random media // J.Q.S.R.T. 2011, doi: 10.1016/j.jqsrt.2010.10.007.

11. Prokhorov I.V. On the Structure of the Continuity Set of the Solution to a Boundary-Value Problem for the Radiation Transfer Equation. Math. Notes. 2009. V. 86. № 1-2. P. 234-248.

Поступила 22.06.20165

Техн. ғылымд. докторы. А.Х. Ахмеджанов
Техн. ғылымд. канд. Т.К. Караданов

**ОПТИКАЛЫҚ СПЕКТР ДИАПАЗОНЫ ҮШІН
АТМОСФЕРАДА ОНЫҢ АУДАРУ САНДЫҚ МОДЕЛЬДЕР
НЕГІЗІНДЕ ШАШЫРАНДЫ СӘУЛЕЛЕР
ҚАРҚЫНДЫЛЫҒЫН ЕСЕПТЕУ**

Түйін сөздер: аэрозоль, оптикалық қалыңдығы, спутниктік зондтау

Ғарышты зондтау мәліметі бойынша тырлек шашырау жағдайда атмосферада қысқа толқынды сәуле тасымалдауынаң сандық есептері жүзеге асырылды. Атмосферада жоғары және төмен бағытталған шашыраңды сәулелердің қарқындылық мәндерінің есептері алынды.

Akhmedzhanov A.Kh., Karadanov T.K.

**CALCULATION OF THE INTENSITY OF SCATTERED RADIATION
BASED ON OF NUMERICAL MODELS OF ITS TRANSFER INTO THE
ATMOSPHERE FOR THE OPTICAL SPECTER RANGE**

Keywords: aerosol optical thickness, satellite remote sensing

This article shows the numerical implementation of the short-wave radiation transfer problem in the atmosphere in condition of single scattering according to the space probe. The value of the intensity of downstream and upstream of the scattered radiation in the atmosphere was calculated.