

Параметрическая модель солнечной дымки в видимой и УФ-области спектра

В.В. Белов^{1,2}, М.В. Тарасенков^{1,2}, К.П. Пискунов^{3*}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН

634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

²Томский государственный университет

634034, г. Томск, пр. Ленина, 36

³ФГУ «ФГНИИЦ РЭБ ОЭСЗ»

394030, г. Воронеж, ул. Студенческая, 36

Поступила в редакцию 13.11.2009 г.

Предложена параметрическая модель интенсивности солнечной дымки в видимой и УФ-области спектра, полученная на основе расчетов, выполненных методом Монте-Карло для широкой области оптико-геометрических условий наблюдения земной поверхности из космоса. Ее входными параметрами являются: длина волны (0,2–0,8 мкм), метеорологическая дальность видимости (1–50 км), зенитный угол Солнца (0–75°), высота точки регистрации излучения над поверхностью Земли (5–100 км), зенитный (0–75°) и азимутальный углы ориентации приемной системы (0–180°). Модель характеризуется относительной погрешностью 6–13% для больших высот приемной системы (30–100 км) и погрешностью 9–25% при меньших высотах (5–20 км).

Ключевые слова: солнечная дымка, параметрическая модель, метод Монте-Карло; solar haze, parametrical model, Monte Carlo method.

Введение

При решении задач реконструкции изображений земной поверхности [1, 2], наблюдаемой через атмосферу, или осуществлении атмосферной коррекции реальных изображений [2–7] необходимо учитывать восходящие световые потоки, которые формируются в результате рассеяния в атмосфере в направлении на приемник падающего на планету солнечного излучения, которое не претерпело взаимодействие с земной поверхностью. Интенсивность этого излучения называют солнечной дымкой I , и существует область оптико-геометрических условий наблюдения, где эта компонента изображения является главной причиной ухудшения качества изображения наблюдаемых из космоса фрагментов земной поверхности. Интенсивность I можно получить, решив (при соответствующих граничных условиях) стационарное уравнение переноса излучения, если пренебречь турбулентными процессами в атмосфере как многокомпонентной, аэрозольно-газовой дисперсной среде. Не существует методов общего решения этого уравнения, однако есть ряд приближенных и асимптотически точных методов, которые позволяют оценить солнечную дымку при заданных, как правило модельных, оптических характеристиках атмосферы. Нами получены статистические оценки интенсивностей I

методом Монте-Карло с контролируемой погрешностью (через выборочное среднеквадратическое отклонение) для следующей постановки задачи.

Постановка задачи

Геометрическая схема постановки задачи изображена на рис. 1.

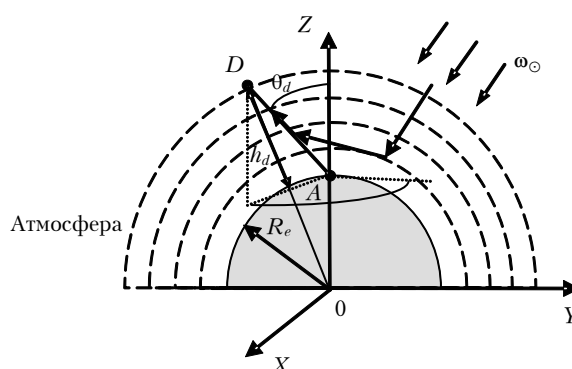


Рис. 1. Сферическая модель системы «атмосфера – земная поверхность» (R_e – радиус Земли)

Требуется оценить интенсивность солнечной дымки I в направлении, заданном вектором $\omega_d = \omega_d(\theta_d, \varphi_d)$, когда оптическая система расположена на высоте h_d . Поток солнечного излучения падает на верхнюю границу атмосферы в направлении $\omega_{\odot} = \omega_{\odot}(\theta_{\odot}, \varphi_{\odot} = 0)$.

* Владимир Васильевич Белов (belov@iao.ru); Михаил Викторович Тарасенков (tmv@iao.ru); Константин Павлович Пискунов.

Модель атмосферы задана набором оптически однородных слоев, ограниченных сферическими поверхностями, в каждом из которых для аэрозольной и молекулярной составляющих определены коэффициенты рассеяния, поглощения и индикатрисы рассеяния.

Оптические характеристики молекулярной атмосферы определены генератором [8]. Данный генератор учитывает кроме основных (азот и кислород) следующие газы: H₂O, CO₂, O₃, N₂O, CO, CH₄, NO, SO₂, NO₂ и NH₃. Их концентрация меняется в зависимости от модели атмосферы (лето средних широт, зима средних широт и т.д.). Молекулярное поглощение учтено для указанного набора центров длин волн в пределах спектрального разрешения, задаваемого генератором моделей. Аэрозольное рассеяние и поглощение, равно как и молекулярное рассеяние, учитываются для центрального значения спектральных подынтервалов, так как такие характеристики слабо изменяются в этих подынтервалах и могут быть заменены на их средние значения.

Оптические характеристики аэрозоля задаются типом аэрозоля (фоновый, морской или городской) и метеорологической дальностью видимости. Она, в свою очередь связывается с суммарным коэффициентом ослабления у земной поверхности формулой Кошмидера [8]:

$$S_M = 3,912/\sigma_{\text{ext}}, \quad (1)$$

где σ_{ext} — суммарный коэффициент ослабления излучения у поверхности Земли при $\lambda = 0,55$ мкм. Индикатрисы аэрозольного рассеяния рассчитываются на основе теории Ми.

Прежде чем построить параметрическую модель солнечной дымки, мы осуществили статистическое моделирование процесса формирования I методом Монте-Карло. В основу программ расчетов были положены алгоритмы построения сопряженных траекторий с применением весовых оценок (метод плотности столкновений). Основы этих алгоритмов подробно изложены в [9]. Численные эксперименты выполнены для следующих диапазонов значений варьируемых оптико-геометрических параметров задачи: длина волны $\lambda = 0,2 \div 0,4$ мкм с шагом 0,05 мкм и $\lambda = 0,4 \div 0,8$ мкм с шагом 0,1 мкм; метеорологическая дальность видимости $S_M = 1 \div 50$ км; зенитный угол Солнца и ориентации приемной системы $0 \leq \theta_{\odot} \leq 90^\circ$ и $0 \leq \theta_d \leq 90^\circ$ соответственно; высота приемной системы $h_d = 5 \div 100$ км и азимутальный угол между этими направлениями $\varphi_d = 0 \div 180^\circ$.

Для тестирования алгоритма проведено сравнение расчетов, полученных для плоскопараллельной и сферической моделей атмосферы. Результаты сравнения представлены в табл. 1, где приведена относительная погрешность

$$\delta = \frac{|I_S - I_P|}{I_S} \cdot 100\%. \quad (2)$$

Здесь I_S, I_P — результаты расчетов солнечной дымки для сферической и плоскопараллельной геометрии.

Таблица 1

Пример сравнения результатов расчетов интенсивности солнечной дымки для плоской и сферической геометрии в видимом диапазоне длин волн при высоте оптической системы $h_d = 100$ км

Область исходных параметров	$\delta, \%$
$0 \leq \theta_{\odot} \leq 60^\circ$ и $0 \leq \theta_d \leq 60^\circ$	6 (5)
$60^\circ < \theta_{\odot} \leq 75^\circ$ или $60^\circ < \theta_d \leq 75^\circ$	17 (6)

Из табл. 1 следует, что для зенитных углов $0 \leq \theta_{\odot} \leq 60^\circ, 0 \leq \theta_d \leq 60^\circ$ результаты расчетов интенсивности солнечной дымки для сферической и плоской геометрии атмосферы близки. Этими данными подтверждается известный факт, что сферичность земной поверхности следует учитывать при углах $\theta_{\odot}, \theta_d \rightarrow 90^\circ$. Очевидно, что если алгоритм, учитывающий сферичность атмосферы, работает правильно, то при $R_e \rightarrow \infty$ значение δ должно стремиться к нулю. В скобках (табл. 1) приведены значения δ , рассчитанные нами для $R_e = 100\,000$ км.

Для проверки правильности наших алгоритмов мы сравнили результаты расчетов, полученные с использованием программы, с данными из [10, с. 91–110] для постановки задачи, сформулированной там же на с. 91–92 для плоскопараллельной модели атмосферы. Результаты наших расчетов и часть результатов из [10], полученных Дево методом сферических гармоник и Михайловым, Кузнецовым методом Монте-Карло, представлены в табл. 2–4 для нескольких вариантов расчетов в зависимости от вероятности выживания квантов κ и зенитного угла Солнца ($\cos\theta_{\odot}$). Расчеты проведены при солнечной постоянной $S_{\lambda} = 1$.

Таблица 2

Интенсивность солнечной дымки, полученная нами, Вт/(м² · мкм · ср)

$\cos\theta_d$	Варианты расчетов				
	$\kappa = 1;$ $\cos\theta_{\odot} = 1$	$\kappa = 0,9;$ $\cos\theta_{\odot} = 1$	$\kappa = 0,9; \cos\theta_{\odot} = 0,5$		
			$\varphi_d = 0^\circ$	$\varphi_d = 90^\circ$	$\varphi_d = 180^\circ$
1	3,48E-02	2,69E-02	2,25E-02	2,25E-02	2,26E-02
0,8	4,18E-02	3,06E-02	6,64E-02	3,24E-02	3,06E-02
0,6	5,57E-02	3,88E-02	1,55E-01	4,79E-02	3,94E-02
0,4	7,81E-02	5,33E-02	3,38E-01	6,98E-02	5,24E-02
0,2	9,65E-02	6,63E-02	6,66E-01	8,99E-02	6,69E-02

Таблица 3

Интенсивность солнечной дымки, полученная Дево методом сферических гармоник [10]

$\cos\theta_d$	Варианты расчетов				
	$\kappa = 1;$ $\cos\theta_{\odot} = 1$	$\kappa = 0,9;$ $\cos\theta_{\odot} = 1$	$\kappa = 0,9; \cos\theta_{\odot} = 0,5$		
			$\varphi_d = 0^\circ$	$\varphi_d = 90^\circ$	$\varphi_d = 180^\circ$
1	3,62E-02	2,79E-02	2,28E-02	2,28E-02	2,28E-02
0,8	4,30E-02	3,15E-02	6,50E-02	3,23E-02	3,20E-02
0,6	5,61E-02	3,91E-02	1,51E-01	4,75E-02	4,12E-02
0,4	7,88E-02	5,35E-02	3,29E-01	6,93E-02	5,50E-02
0,2	9,76E-02	6,69E-02	6,56E-01	8,93E-02	7,09E-02

Таблица 4

Интенсивность солнечной дымки, полученная Михайловым и Кузнецовым методом Монте-Карло [10]

$\cos\theta_d$	Варианты расчетов				
	$\kappa = 1;$ $\cos\theta_\odot = 1$	$\kappa = 0,9;$ $\cos\theta_\odot = 1$	$\kappa = 0,9; \cos\theta_\odot = 0,5$		
			$\varphi_d = 0^\circ$	$\varphi_d = 90^\circ$	$\varphi_d = 180^\circ$
1	3,50E-02	2,70E-02	2,37E-02	2,37E-02	2,37E-02
0,8	4,21E-02	3,09E-02	6,40E-02	3,32E-02	3,15E-02
0,6	5,51E-02	3,86E-02	1,50E-02	4,73E-02	3,97E-02
0,4	7,76E-02	5,33E-02	3,33E-1	6,85E-02	5,05E-02
0,2	9,60E-02	6,66E-02	6,70E-1	8,65E-02	6,45E-02

Из данных, представленных в табл. 2–4, следует, что максимальное отличие значений составляет 5,6% при расчете методом сферических гармоник и 5% методом Монте-Карло, что может быть связано с различными генераторами псевдослучайных чисел и разным среднеквадратическим отклонением результатов расчетов.

Модель солнечной дымки

На основе анализа характера поведения интенсивности солнечной дымки в зависимости от фиксированной длины волны, дальности видимости, зенитного угла Солнца и при произвольном расположении приемника нами предложено аппроксимировать эту компоненту следующим образом:

$$I(\lambda_0, S_{M,0}, \theta_{\odot,0}, h_{d,0}, \theta_d, \varphi_d) = -\frac{B + \sqrt{B^2 - 4AC_{13}}}{2A \cos\theta_d}, \quad (3)$$

$$A = C_{11} \cos^2\theta_d + C_{i1}(\sin\theta_d \cos\varphi_d)^2 + C_{i2} \cos\theta_d \sin\theta_d \cos\varphi_d - (\sin\theta_d \sin\varphi_d)^2, \quad (4)$$

$$B = C_{12} \cos\theta_d + C_{i3} \sin\theta_d \cos\varphi_d, \quad (5)$$

$$i = \begin{cases} 2 & \text{при } 0 \leq \varphi_d \leq 90^\circ \\ 3 & \text{при } 90 \leq \varphi_d \leq 180^\circ, \end{cases} \quad (6)$$

где C_{11} – C_{13} – константы аппроксимации при $\varphi_d = 90^\circ$; C_{21} – C_{23} – константы аппроксимации для ситуаций, когда $0 \leq \varphi_d < 90^\circ$; константы C_{31} – C_{33} используются для $90^\circ < \varphi_d \leq 180^\circ$. Все константы найдены методом наименьших квадратов.

С целью проверки точности аппроксимации было проведено сравнение расчетных и аппроксимационных значений (табл. 5) для вышеуказанных диапазонов значений исходных параметров: λ , S_M , θ_\odot , θ_d , h_d , φ_d . Расчет относительной погрешности проведен по формуле

$$\delta_1 = \frac{|I_S - I_A|}{I_S} \cdot 100\%, \quad (7)$$

где I_S , I_A – расчетное значение интенсивности солнечной дымки и восстановленное по формулам (3)–(6).

Таблица 5

Оценка сверху (%) относительной погрешности аппроксимации δ_1 для длин волн УФ- и видимого диапазонов

λ , мкм	Диапазон h_d , км		
	100	50–30	20–5
<i>УФ-диапазон</i>			
0,2	8,28	8,83	–
0,25	8,36	10,51	–
0,3	10,75	13,30	18,88
0,35	6,22	7,76	8,85
<i>Видимый диапазон</i>			
0,4	7,61	9,65	8,97
0,5	7,67	9,85	11,64
0,6	9,15	12,25	12,69
0,7	11,37	13,17	15,31
0,8	12,91	12,57	24,86

Расчеты методом Монте-Карло и по формулам (3)–(6) проводились для длины волны $\lambda = 0,2$ мкм до высоты $h_d = 30$ км, а для $\lambda = 0,25$ мкм до $h_d = 50$ км, так как при меньших значениях h_d интенсивность солнечной дымки $I \rightarrow 0$.

Заметим, что в табл. 5 приведена оценка сверху погрешности при заданных длине волны и высоте оптической системы для всего диапазона S_M , θ_\odot и θ_d . При $\theta_d \leq 60^\circ$, $h_d = 100$ км оценки сверху погрешности в зависимости от λ принимают следующие значения:

λ , мкм	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
δ_1 , % <	4,8	5,4	4,9	4,1	5,6	6,1	7,7	9,1	12,9

Большие значения погрешности при $\lambda \geq 0,6$ мкм наблюдаются при больших метеодальностях и связаны с тем, что вследствие аэрозольного рассеяния и небольшой кратности рассеяния характер изменения интенсивности солнечной дымки по углам (θ_d , φ_d) становится сложным и не описывается зависимостью (3)–(6).

На рис. 2 представлены примеры сравнения расчетных и аппроксимационных значений интенсивности солнечной дымки при вариации входных оптико-геометрических параметров.

Таким образом, рассмотренная нами параметрическая модель позволяет оценивать интенсивность солнечной дымки в схемах зондирования поверхности Земли в видимом и УФ-диапазонах длин волн при вариациях метеорологических дальностей видимости в диапазоне 1–50 км, зенитных углов Солнца и приемника до 75° . Предлагаемые аппроксимационные формулы получены для оптических моделей атмосферы [8]. Отметим, что предложенная параметризация будет работать для всех узловых длин волн диапазона 0,2–0,8 км.

На основе предложенной параметризации создана программа приближенного определения интенсивности солнечной дымки без проведения статистического моделирования.

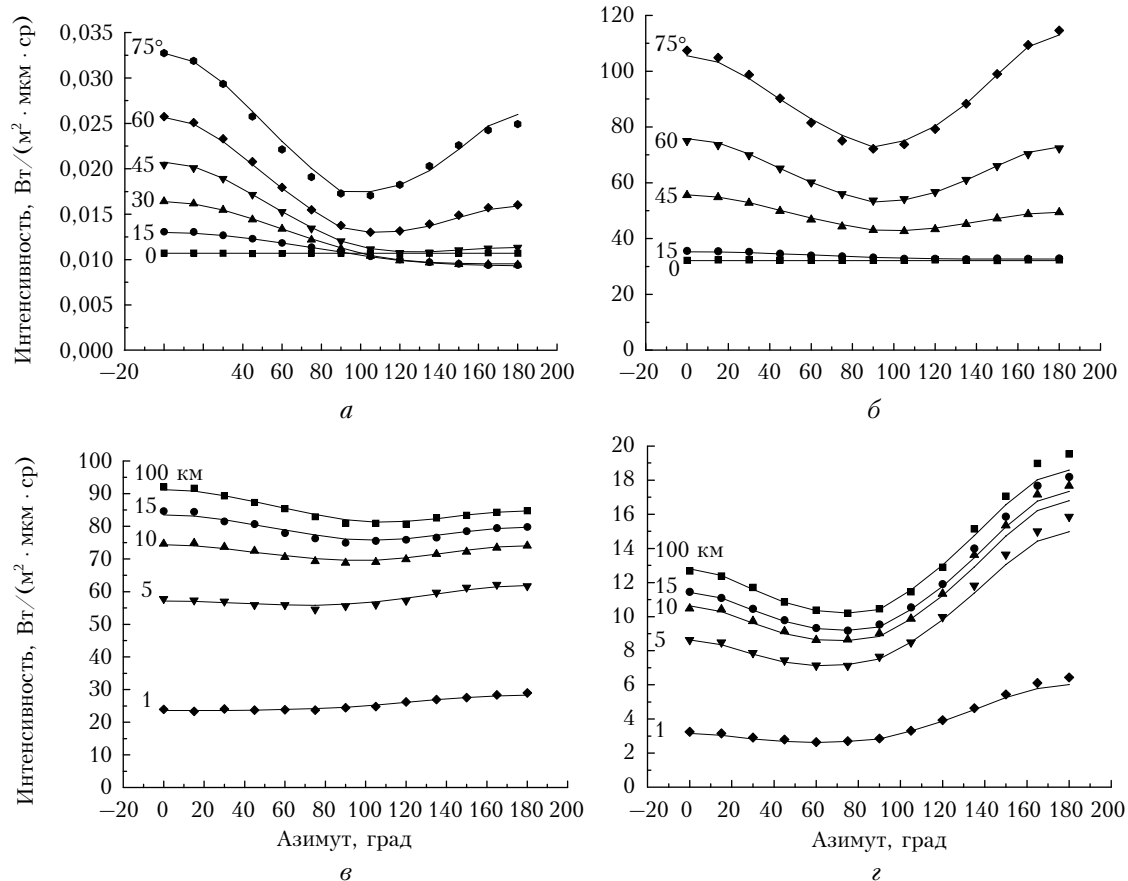


Рис. 2. Сравнение расчетных и аппроксимационных значений интенсивности солнечной дымки: *а, б* – для фиксированных θ_d ; *в, г* – для фиксированных h_d . Точки – расчетные значения в узловых точках, сплошные линии – аппроксимационные. *а* – $\lambda = 0,2$ мкм, $\theta_\odot = 60^\circ$, $h_d = 100$ км; *б* – $\lambda = 0,35$ мкм, $S_M = 25$ км, $\theta_\odot = 75^\circ$, $h_d = 100$ км; *в* – $\lambda = 0,4$ мкм, $S_M = 5$ км, $\theta_\odot = 60^\circ$, $\theta_d = 30^\circ$; *г* – $\lambda = 0,8$ мкм, $S_M = 15$ км, $\theta_\odot = 45^\circ$, $\theta_d = 60^\circ$

1. Золотухин В.Г., Усиков Д.А., Грунин В.А. Учет рассеяния света в атмосфере при обработке космических снимков земной поверхности // Исслед. Земли из космоса. 1980. № 3. С. 58–68.
2. Белов В.В., Афонин С.В. От физических основ, теории и моделирования к тематической обработке спутниковых изображений. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2005. 266 с.
3. Becker F., Li Z.L. Towards a local split window method over land surface // Int. J. Remote Sens. 1990. V. 11. N 3. P. 369–393.
4. Головкин В.А. Современные технологии устранения влияния атмосферы на многоспектральные измерения высокого пространственного разрешения из космоса // Исслед. Земли из космоса. 2006. № 2. С. 11–23.
5. Thome K., Palluconi F., Takashima T., Masuda K. Atmospheric correction of ASTER // IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens. 1998. V. 36. N 4. P. 1199–1211.
6. Sobrino J.A., Jiménez-Muñoz J.C., Paolini L. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5 // Remote Sens. Environ. 2004. V. 90. N 4. P. 434–440.
7. Афонин С.В., Белов В.В., Соломатов Д.В. Решение задач температурного мониторинга земной поверхности из космоса на основе RTM-метода // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21. № 12. С. 1056–1063.
8. Kneizys F.X., Shettle E.P., Anderson G.P., Abreu L.W., Chetwynd J.H., Selby J.E.A., Clough S.A., Gallery W.O. User Guide to LOWTRAN-7. ARGL-TR-86-0177. ERP 1010. Hanscom AFB. MA 01731.
9. Марчук Г.И., Михайлов Г.А., Назаралев М.А., Дарбинян Р.А., Каргин Б.А., Еленов Б.С. Метод Монте-Карло в атмосферной оптике. Новосибирск: Наука, 1976. 284 с.
10. Перенос радиации в рассеивающих и поглощающих атмосферах. Стандартные методы счета / Ред. Ж. Ленобль; Пер. Ж.К. Золотовой. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. 263 с.

V.V. Belov, M.V. Tarasenkova, K.P. Piskunov. Parametrical model of solar haze intensity in the visible and UV ranges of the spectrum.

A parametrical model of solar haze intensity in the visible and UV ranges of the spectrum is suggested. The model is based on Monte Carlo calculations performed for a wide range of variation of the optical and geometrical conditions of observations of the Earth's surface from space. Its input parameters are the wavelength (0.2–0.8 μm), meteorological visibility range (1–50 km), solar zenith angle (0–75°), altitude of the observation point above the Earth's surface (5–100 km), and zenith (0–75°) and azimuth angles (0–180°) of orientation of the receiving system. The model is characterized by a relative error of 6–13% for high receiving system altitudes (30–100 km) and an error of 9–25% for smaller altitudes (5–20 km).

Параметрическая модель солнечной дымки в видимой и УФ-области спектра