

Статистическое моделирование интенсивности световых потоков, отраженных сферической земной поверхностью

В.В. Белов^{1,2}, М.В. Тарасенков^{1*}

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

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

²Томский государственный университет

634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

Поступила в редакцию 3.06.2009 г.

Предложен новый алгоритм метода Монте-Карло для статистической оценки интенсивности видимого излучения в произвольной точке атмосферы, обусловленного отражением солнечных световых потоков сферической земной поверхностью. Алгоритм позволяет осуществлять учет альбедо оптически однородной земной поверхности вне схемы статистического моделирования прямых траекторий блуждания фотонов в среде.

На основе численных экспериментов (в видимом диапазоне длин волн) исследовано влияние неоднородности освещенности земной поверхности на интенсивность излучения световых потоков, отраженных земной поверхностью. Осуществлено сравнение полученных результатов со случаем плоскопараллельной модели атмосферы, исследована азимутальная зависимость интенсивности излучения от земной поверхности.

Ключевые слова: перенос излучения, метод Монте-Карло, сферическая геометрия; radiative transfer, Monte Carlo method, spherical geometry.

Введение

Отраженное земной поверхностью излучение — одна из составляющих процесса формирования изображения объектов, наблюдаемых через рассеивающие и поглощающие среды, включая атмосферу. Модель этого процесса рассмотрена, например, в работах [1–4] и др. Эта модель включает следующие компоненты: нерассеянное и рассеянное излучение от точки (пикселя) наблюдаемого объекта, солнечная (или аналогичная ей) световая дымка и боковой подсвет или поверхностная дымка (т.е. излучение от других точек объекта или фоновой поверхности, влияющих на регистрируемые приемником световые потоки).

В [2, 4] исследованы основные закономерности влияния условий наблюдения на каждый из этих компонентов и, в целом, на качество изображения самосветящихся и отражающих объектов. Разработаны алгоритмы и методы для асимптотически точного [3–6] и приближенного [2, 7] решения стационарного уравнения переноса излучения (УПИ) для количественной оценки одновременно всех или отдельных составляющих световых потоков, участвующих в процессе формирования изображения. Можно считать, что для плоскопараллельной стратифицированной оптической модели аэрозольно-молекулярной атмосферы этих средств достаточно, чтобы решить практически любую задачу теории видения (по крайней мере, если не учитывать поля-

ризационные эффекты и совместное влияние детерминированной и случайной неоднородности оптических свойств атмосферы).

Для сферической модели системы «атмосфера—земная поверхность» существует ряд работ, где предложены варианты решения конкретных задач в теории видения. Например, в работах Института прикладной математики РАН, обобщенных в монографии [3, гл. 8], предложен алгоритм расчета характеристик световых потоков итерационным методом характеристик. В монографии [8] описан и обоснован алгоритм метода Монте-Карло, разработанный в Сибирском отделении РАН для решения УПИ в этих граничных условиях. Характерной чертой такого алгоритма является то, что учет альбедо земной поверхности осуществляется при статистическом моделировании отражения фотона от земной поверхности.

В настоящей статье описан новый алгоритм расчета интенсивности поверхностной дымки (или интегрального бокового подсвета [4]) методом Монте-Карло и приведены результаты решения уравнения переноса излучения, полученные при следующей постановке задачи.

Постановка задачи

Геометрическая схема постановки задачи изображена на рис. 1, а. В точке D расположен приемник оптического излучения, ориентированный в точку A ($0, 0$, радиус Земли R_e) в направлении, заданном вектором $\omega_d = \omega_d(\theta_d, \varphi_d)$. Расстояние от точки A до точки D обозначим как D_h . Поток сол-

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

нечного излучения падает на верхнюю границу атмосферы в направлении $\omega_\odot = \omega_\odot(\theta_\odot, \varphi_\odot = 0)$. Пусть оптически однородная земная поверхность отражает излучение по закону Ламберта, коэффициент отражения $\rho = \text{const}$.

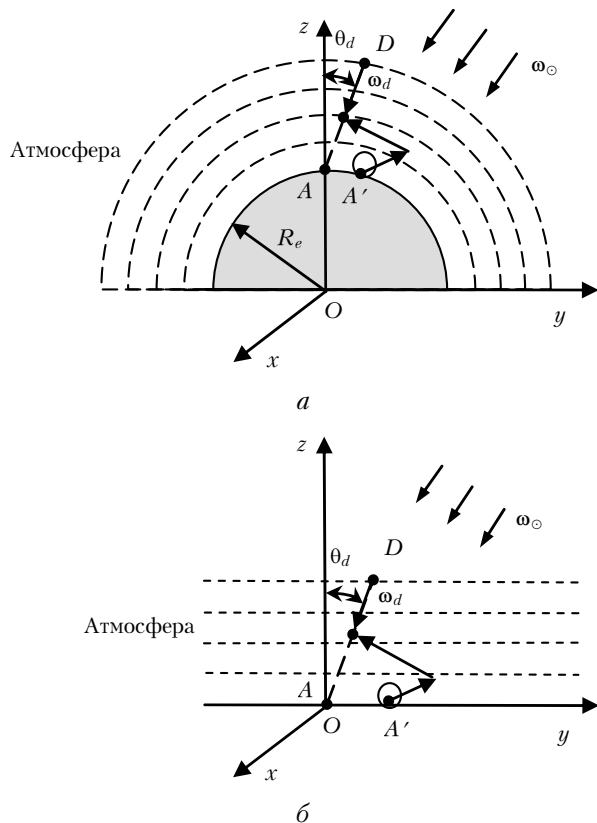


Рис. 1. Геометрическая схема численных экспериментов: *a* – сферическая, *б* – плоскопараллельная системы «атмосфера – земная поверхность»

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 и газовой атмосферы задаются генератором [9].

Требуется создать алгоритм метода Монте-Карло для оценки интенсивности I_{surf} в точке D в направлении минус ω_d , который позволяет учесть альбедо земной поверхности после осуществления статистического моделирования. На базе этого алгоритма необходимо установить основные закономерности влияния на I_{surf} оптических условий наблюдения (заданных метеорологической дальностью видимости $S_M = 1 \div 25$ км) и геометрических параметров схемы наблюдения (угла $0^\circ \leq \theta_\odot \leq 90^\circ$, $0^\circ \leq \theta_d \leq 90^\circ$ и $1 \leq D_h \leq 100$ км). Кроме того, требуется оценить условия, при которых влиянием сферичности можно пренебречь, и оценить размеры сферической поверхности, в пределах которой сформируется поверхностная дымка.

Алгоритм статистической оценки I_{surf}

Прежде чем рассмотреть алгоритм статистического оценивания поверхностной дымки с учетом сферичности, обратимся к аналогичному алгоритму, реализованному нами для плоскостратифицированной оптической модели «атмосфера – земная поверхность» (рис. 1, б). Очевидно, не требуется доказательств, что для этой схемы формирования светового поля в системе «атмосфера – земная поверхность» освещенность земной поверхности (совпадающей с плоскостью xOy) $E(x, y) = \text{const}$ и, следовательно, $I_{surf}(D) = \text{const}$, если фиксируется направление ω_d , а точка D – любая точка в атмосфере или на ее верхней границе. Тогда идея алгоритма сводится к следующему. В схеме прямого моделирования из фиксированной точки земной поверхности (например, точки A') в соответствии с заданной диаграммой излучения (отражения) моделируются траектории движения фотонов в среде. Из каждой точки столкновения осуществляется локальная оценка:

$$L_c = \psi_c \chi_c g_c(\omega_c, -\omega_d) \exp[-\tau_c(-\omega_d)], \quad (1)$$

где ψ_c – «вес» фотона в момент столкновения; χ_c – вероятность выживания кванта; ω_c – направление движения фотона до точки столкновения; g_c – индикатриса рассеяния в этой точке; τ_c – оптическая длина отрезка из точки столкновения в направлении $(-\omega_d)$. Здесь χ_c и g_c соответствуют аэрозольной или молекулярной составляющей атмосферы. Искомая интенсивность находится как оценка математического ожидания суммы L_c (с учетом освещенности земной поверхности).

В отличие от этой модели в сферической освещенность земной поверхности не является постоянной величиной и зависит от координат точки A' . Поэтому очевидно, что и $I_{surf}(D) \neq \text{const}$ и, как следствие, уравнение (1) для ее оценки применять нельзя. С другой стороны, $I_{surf}(D)$ для фиксированного направления ω_d есть сумма интенсивностей излучений, рассеянных в направлении приемника из точек столкновения фотонов, расположенных на луче AD . Следовательно, локальной оценкой (1) можно воспользоваться, если осуществить перенос всей траектории таким образом, чтобы последняя точка столкновения оказалась на луче AD , а точка A переместилась в точку A' на земной поверхности. Этот прием используется, например, при решении нестационарного уравнения переноса излучения в работе [10] и реализует свертку входного сигнала с импульсной реакцией канала формирования выходного сигнала. В данном случае это можно записать следующим образом:

$$I_{surf}(D, \omega_d) = \iint E(x_A, y_A) h(x_A, y_A; x_{A'}, y_{A'}) dx_A dy_A, \quad (2)$$

где (x_A, y_A) , $(x_{A'}, y_{A'})$ – координаты точек A и A' соответственно (см. рис. 1, а); $h(x_A, y_A; x_{A'}, y_{A'})$ – импульсная реакция или функция размытия точки (ФРТ) канала формирования бокового подсвета [4].

Блок-схема моделирования траекторий движения фотонов от точки излучения (в нашем случае она совпадала с точкой A) и локальной оценки приведена на рис. 2.

Эта схема отличается от общепринятых и описанных, например, в [8] только блоками переноса траектории и определения освещенности в фиктивной точке излучения A' , в которую перемещается при сдвиге траектории точка A . Последняя процедура не требует пояснений, так как если известна освещенность как функция координат точки на сфере (а она предварительно рассчитывается), то при найденных координатах точки эта процедура тривиальна. Рассмотрим подробнее блок переноса траектории для осуществления локальной оценки (1):

1. Рассчитываются координаты точки столкновения (x_1, y_1, z_1) , и запоминаются точки предыдущего (x, y, z) или начальные координаты (если имеет место первое столкновение).

2. Определяются расстояния между центром Земли (точка O), источником (точка A), последним столкновением (назовем ее точкой B) и предпоследним столкновением (назовем ее точкой C):

$$l_{AB} = \sqrt{x_1^2 + y_1^2 + (z_1 - R_e)^2}, \quad (3)$$

$$l_{AC} = \sqrt{x^2 + y^2 + (z - R_e)^2}, \quad (4)$$

$$l_{BC} = l, \quad (5)$$

$$l_{OA} = R_e, \quad (6)$$

$$l_{OB} = r_1 = \sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2}, \quad (7)$$

$$l_{OC} = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}, \quad (8)$$

где l – длина свободного пробега между последними столкновениями.

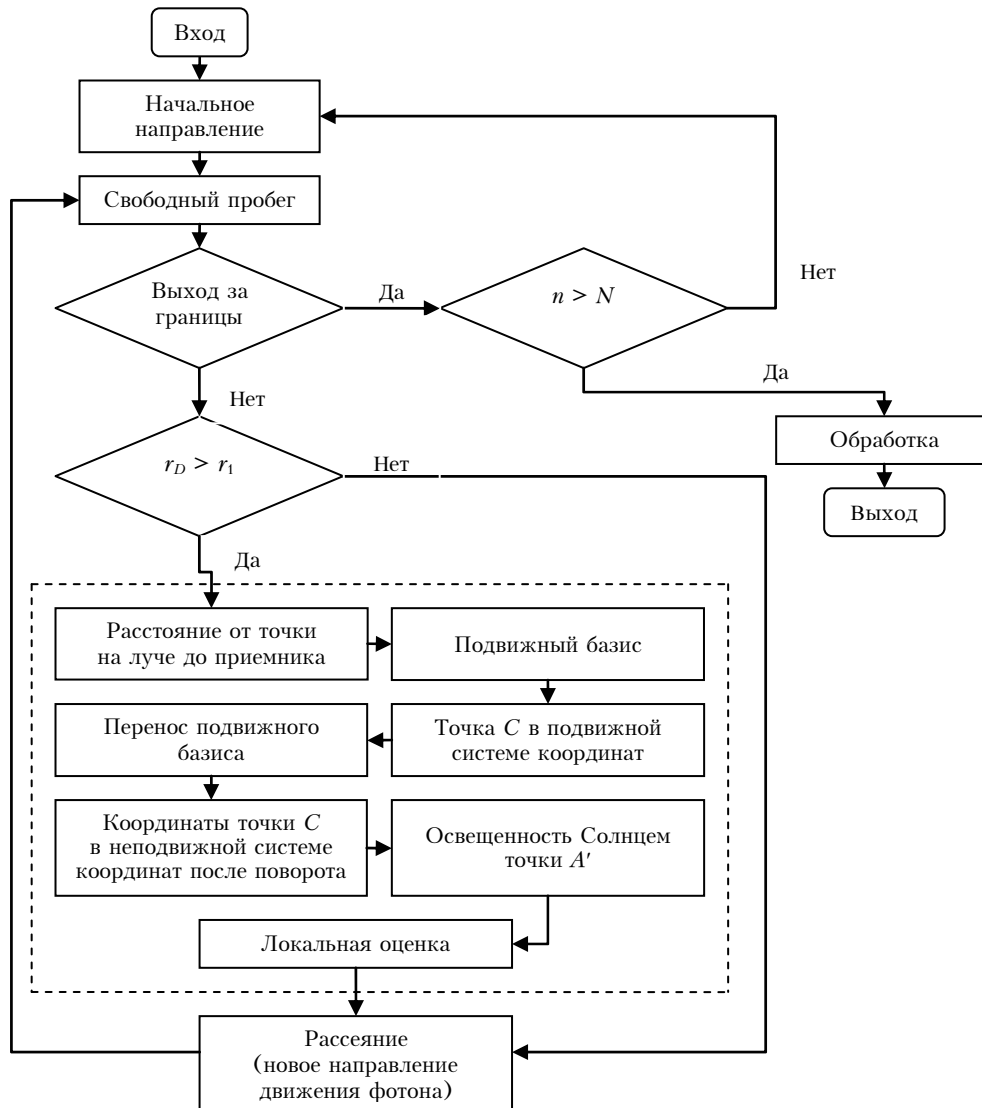


Рис. 2. Блок-схема алгоритма моделирования: r_D – расстояние от центра Земли до точки приемника D ; n – текущий номер траектории; N – их общее число

Таким образом, получаем тетраэдр $OABC$, который нужно повернуть так, чтобы точка A оставалась на поверхности Земли, точка B оказалась на линии визирования (заданной вектором ω_d) при фиксированной точке O .

3. Перед тем как осуществить поворот тетраэдра, вводится подвижная система координат с центром в точке A . Ось Az' этой системы координат направляется вертикально, ось Ay' — направляется вдоль проекции вектора AB на плоскость, перпендикулярную оси Oz , ось Ax' ориентирована вдоль векторного произведения ортов Az' и Ay' , т.е.

$$Az' = (0, 0, 1), \quad (9)$$

$$Ay' = \left(\frac{x_1}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}}, \frac{y_1}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}}, 0 \right), \quad (10)$$

$$Ax' = [Ay', Az'] = \left(\frac{y_1}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}}, \frac{x_1}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}}, 0 \right). \quad (11)$$

4. В подвижной системе координат точка предыдущего столкновения будет иметь определенные координаты. После поворота тетраэдра она будет иметь те же координаты в этой подвижной системе координат:

$$x'_C = l_{AC} \cos(AC, Ax') = l_{AC} \left(\frac{x}{l_{AC}} \frac{y_1}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}} - \frac{y}{l_{AC}} \frac{x_1}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}} \right) = \frac{xy_1 - yx_1}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}}, \quad (12)$$

$$y'_C = l_{AC} \cos(AC, Ay') = l_{AC} \left(\frac{x}{l_{AC}} \frac{x_1}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}} + \frac{z}{l_{AC}} \frac{z_1}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}} \right) = \frac{yy_1 - zz_1}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}}, \quad (13)$$

$$z'_C = l_{AC} \cos(AC, Az') = l_{AC} \left(\frac{z - R_e}{l_{AC}} \cdot 1 \right) = z - R_e. \quad (14)$$

5. Производится перемещение подвижной системы координат так, чтобы ее начало находилось на поверхности Земли в точке A' , а точка столкновения на луче AD лежала в плоскости $A'y'z'$.

В блоке «Освещенность Солнцем точки A' » (рис. 2) используются таблицы освещенности Земли, рассчитанные предварительно методом Монте-Карло для плоской или сферической моделей атмосферы.

Известно, что влиянием сферичности земной поверхности на ее освещенность можно пренебречь при соответствующем выборе координат точки A и направления ω_\odot . Для проверки нашего алгоритма на этот тест была дополнительно создана программа расчетов освещенности методом Монте-Карло при плоской геометрии. Численные эксперименты проведены для широкого диапазона входных параметров задачи: $\lambda = 0,4 \div 0,8$ мкм с шагом 0,1 мкм, $S_M = 1 \div 25$ км, $\theta_\odot = 0 \div 90^\circ$, $\theta_d = 0 \div 85^\circ$, набора расстояний D_h . Результаты сравнения статистических оценок этой характеристики для плоской E_p и сферической E_s моделей системы «земная поверх-

ность—атмосфера» приведены в табл. 1 в виде оценки сверху отличия δ между E_p и E_s :

$$\delta = \frac{|E_s - E_p|}{E_s} \cdot 100\%. \quad (15)$$

Из этих данных следует, что до зенитных углов Солнца 80° можно использовать в расчетах плоскую модель земной поверхности, при этом погрешность оценок не превышает 4%. При больших углах θ_\odot учет сферической геометрии необходим, если требуется аналогичная точность расчетов.

Таблица 1

Сравнение расчетов освещенности в плоской и сферической геометрии задачи

Зенитный угол Солнца, град	Относительное отличие, %	Зенитный угол Солнца, град	Относительное отличие, %
0–75	<1,4	80–85	<16,4
75–80	<4	85–89	<81,6

Освещенность Земли Солнцем рассчитывалась нами предварительно без учета переотраженного излучения при коэффициенте отражения $\rho = 1$. Зная интенсивность поверхностной дымки при $\rho = 1$, можно рассчитать ее с учетом любого значения ρ по формуле, являющейся аналогом формулы Соболева [3, 11]:

$$I_{surf,\rho} = I_{surf}^{(0)} \frac{\rho(1+\gamma)}{1+\gamma(1-\rho)}, \quad (16)$$

где $I_{surf,\rho}$ — интенсивность поверхностной дымки при альбедо поверхности ρ ; $I_{surf}^{(0)}$ — интенсивность поверхностной дымки при альбедо $\rho = 1$ без учета переотражения; γ — полный диффузный подсвет [4, 8], характеризующий вклад отраженного излучения в освещенность Земли Солнцем при альбедо $\rho = 1$ (рассчитывается методом Монте-Карло прямым моделированием при сферической геометрии задачи).

Одной из важных характеристик алгоритмов метода Монте-Карло является их трудоемкость [8], которая определяется как произведение времени расчетов t на среднеквадратическое отклонение полученных результатов DI . Нами проведены оценки этой характеристики на компьютере с процессором Intel Core 2 Duo E8400 3GHz. Пример их представлен в табл. 2.

Таблица 2

Трудоемкость алгоритма. Длина волны $\lambda = 0,4$ мкм, метеорологическая дальность видимости $S_M = 1$ км

θ_d , град	D_h , км	Число траекторий в пачке	Число пачек	Результаты расчетов		
				t , с	DI	tDI
0	100	50000	30	61	0,002	0,122
75	100	50000	30	60	0,003	0,18
60	20	50000	30	52	0,003	0,156
45	50	50000	30	60	0,002	0,12
30	10	50000	30	52	0,002	0,104
75	1	50000	30	28	0,003	0,084

Азимутальная зависимость $I_{surf}(D)$ и радиус бокового подсвета

Солнце освещает земную поверхность неравномерно, даже в случае горизонтально однородной атмосферы, поэтому интенсивность отраженного ею излучения при одинаковых зенитных углах приемника в общем случае может быть различной, т.е. может наблюдаться ее азимутальная зависимость. Однако если основной вклад в поверхностную дымку формируется участком небольшой площади (который можно характеризовать радиусом бокового подсвета [4]), то следует ожидать слабую азимутальную зависимость интенсивности $I_{surf}(D)$ и ею можно в расчетах пренебречь.

Для ответа на этот вопрос были проведены расчеты $I_{surf}(D)$ для модели лета средних широт, фонового аэрозоля [9], в условиях безоблачного неба, при азимутальных углах между направлением на Солнце и на приемник 0, 45, 90, 135, 180°. В алгоритме использованы результаты статистической оценки освещенности сферической или плоской модели земной поверхности в зависимости от зенитных углов Солнца.

Одновременно с расчетом интенсивности I_{surf} определялся радиус бокового подсвета [4] – радиус круга, от точек которого приходит заданная доля излучения, т.е.:

$$I_{surf}(R)/I_{surf} < \varepsilon, \quad (17)$$

где R – радиус бокового подсвета (определяется по поверхности Земли); $I_{surf}(R)$ – интенсивность излучения, приходящего с участка поверхности, ограниченного радиусом R ; ε – мера отличия, в расчетах ε выбиралось равным 0,95.

Погрешность расчетов радиуса R при зенитных углах Солнца в пределах 75° не превышала 2–3%, а при зенитном угле Солнца 90° – 10%. В табл. 3 приведены результаты оценок радиусов бокового подсвета при схеме наблюдения в надир.

Таблица 3

Радиус бокового подсвета, км						
λ , мкм	S_m , км	D_h , км				
		1	2	5	10	100
0,4	1	3	5	7	15	20
0,4	5	4	5	9	15	25
0,4	15	5	7	15	20	30
0,4	25	7	10	20	25	40
0,6	1	3	4	4	5	5
0,6	5	3	4	5	7	8
0,6	15	3	5	7	10	15
0,6	25	3	5	9	15	20
0,8	1	2	3	3	4	4
0,8	5	3	4	4	5	6
0,8	15	3	4	6	8	10
0,8	25	3	4	7	10	15

Из табл. 3 следует, что с ростом длины волны λ радиус уменьшается, с ростом S_m и расстояния D_h – возрастает. Расчеты подтверждают и достаточно очевидный вывод, что с изменением зенитного угла θ_d меняется и радиус бокового подсвета.

Обратимся к анализу азимутальной зависимости $I_{surf} = I_{surf}(\theta_d, \varphi_d)$. Наличие азимутальной зависимости характеризовалось параметром

$$\delta_1 = \max_i \left(\frac{|\bar{I} - I_i|}{\bar{I}} \right) \cdot 100\%, \quad (18)$$

где I_i – значение интенсивности поверхностной дымки для некоторого i -го азимута в интервале 0–180°; \bar{I} – среднее значение интенсивности поверхностной дымки по всему интервалу изменений азимутального угла.

С использованием этого параметра была сделана оценка сверху степени влияния азимутальной зависимости при различных условиях наблюдения (табл. 4).

Таблица 4

Влияние азимутального угла на параметр δ_1			
θ_0 , град	θ_d , град	D_h , км	Относительное отличие, %
0–75	0–75	0–100	< 1,6
0–75	85	0–100	< 6,1
90	0–75	0–100	< 3,2
90	85	0–10	< 5,8
90	85	20–50	< 13,8
90	85	100	< 26,7

Из таблицы следует, что в случае, когда $\theta_0 \geq 90^\circ$, $\theta_d \geq 85^\circ$, $D_h \geq 100$ км, отличие значений интенсивностей при различных азимутах от их среднего значения достигает порядка 30%. Во всех других рассмотренных ситуациях это отличие значительно меньше. Пример влияния азимутального угла на интенсивность поверхностной дымки приведен на рис. 3.

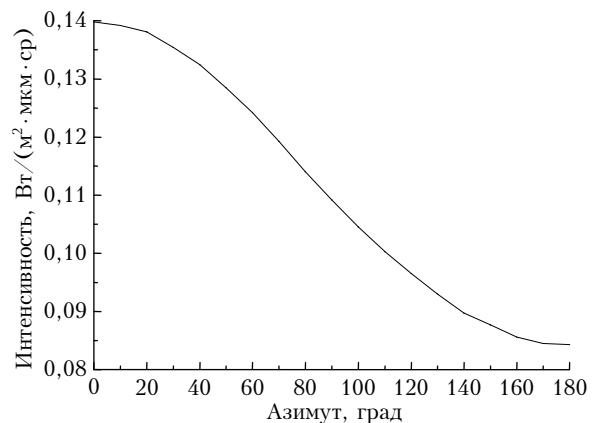


Рис. 3. Интенсивность $I_{surf} = I_{surf}(\varphi_0)$ при $\lambda = 0,4$ мкм, $S_m = 25$ км, $\theta_0 = 90^\circ$, $\theta_d = 85^\circ$ и $D_h = 100$ км

Таким образом, в расчетах интенсивностей поверхностной дымки можно не учитывать азимутальный угол между направлением на приемник и на Солнце, если не распространять этот вывод на случаи, когда ось оптической системы и направление на Солнце расположены вблизи горизонта и приемник значительно удален от точки A , а также на случаи, когда имеются локализованные слои

повышенной мутности, расположенные на удалении от земной поверхности. В этих случаях радиус бокового подсвета (следуя [4]) может оказаться существенным и учет неоднородности освещенности земной поверхности и азимутальной зависимости $I_{surf}(\theta_d, \varphi_d)$ необходим.

Влияние сферичности системы «атмосфера–земная поверхность» на интенсивность $I_{surf}(D)$

Предложенный алгоритм – достаточно сложный и трудоемкий. В случае плоской геометрии с использованием метода Монте-Карло можно получить интенсивность той же радиационной характеристики при гораздо меньших затратах машинного времени. Но возникает вопрос, при каких условиях можно пренебрегать сферичностью атмосферы и насколько будут отличаться результаты при расчетах для сферической и плоской моделей атмосферы. Для ответа на этот вопрос был произведен расчет интенсивностей поверхностной дымки $I_{surf}(D)$ с помощью программ, реализующих сферическую и плоскопараллельную модели системы «атмосфера–земная поверхность». Во всех расчетах использовались значения освещенности Земли Солнцем, полученные с учетом сферичности земной поверхности. Отличие результатов расчетов приведено в табл. 5. Оно оценивается по формуле

$$\delta_2 = \frac{|I_{surf,s} - I_{surf,p}|}{I_{surf,s}} \cdot 100\%, \quad (19)$$

где $I_{surf,s}$, $I_{surf,p}$ – интенсивности поверхностной дымки, рассчитанные при сферической и плоскопараллельной геометрии соответственно.

Из данных табл. 5 видно, что для всех случаев, кроме ситуации, когда $\theta_o = 90^\circ$, $\theta_d = 85^\circ$, $D_h \geq 100$ км, отличие между результатами не превышает 18%, а когда $\theta_d \leq 75^\circ$, это отличие между расчетами не превышает 3,5% при тех же оптиче-

ских моделях, которые упоминались ранее. Таким образом, если Солнце расположено близко к горизонту при удаленных и сильно наклоненных трассах, необходимо учитывать сферичность земной поверхности. В других случаях рациональнее использовать в расчетах плоскопараллельную модель атмосферы с привлечением данных об освещенности земной поверхности, полученных для сферической геометрии.

Таблица 5

Сравнение результатов расчетов интенсивности поверхностной дымки для плоской и сферической геометрии задачи

θ_o , град	θ_d , град	D_h , км	Относительное отличие, %
0–75	0–75	0–100	3
0–75	85	0–100	16
90	0–75	0–100	3,5
90	85	0–10	7,3
90	85	20–50	18
90	85	100	31

Влияние расстояния D_h на интенсивность поверхностной дымки $I_{surf}(D)$

Примеры результатов численных экспериментов, выполненных для оценки влияния параметра D_h на интенсивность поверхностной дымки $I_{surf}(D)$, даны на рис. 4. Эти расчеты приводят к следующим выводам. При малых значениях $S_m = 1 \div 2$ км с ростом D_h интенсивность поверхностной дымки уменьшается (рис. 4, а); при $S_m = 15 \div 25$ км она увеличивается с ростом D_h (рис. 4, б); при промежуточных значениях S_m может наблюдаться сначала возрастание $I_{surf}(D)$ с ростом D_h , а затем уменьшение (например, рис. 4, в). Это можно объяснить следующим образом. С увеличением расстояния D_h растет радиус бокового подсвета (см. табл. 3), т.е. излучение приходит с большей области поверхности.

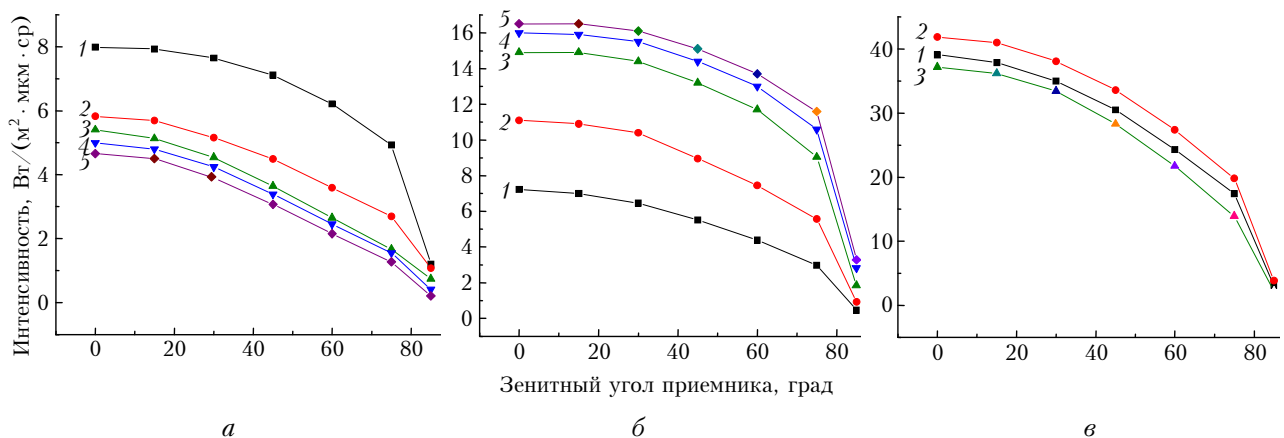


Рис. 4. Интенсивность поверхностной дымки при фиксированных расстояниях до объекта и при $\theta_o = 60^\circ$: а – $\lambda = 0,4$ мкм, $S_m = 1$ км; б – $\lambda = 0,8$ мкм, $S_m = 25$ км; в – $\lambda = 0,4$ мкм, $S_m = 5$ км; а, б – 1 – $D_h = 1$; 2 – 2; 3 – 5; 4 – 10; 5 – $D_h = 100$ км; в – 1 – $D_h = 1$; 2 – 2; 3 – 100 км

При этом одновременно увеличивается оптическая толщина слоя между приемником и точками поверхности. При малых значениях дальности видимости преобладающим является рост оптической толщи, а при больших значениях дальности видимости — радиуса бокового подсвета. В связи с этим при промежуточных метеодальностях может наблюдаться сначала увеличение интенсивности поверхностной дымки с ростом расстояния D_h , а затем ее уменьшение.

Заключение

Созданный алгоритм позволяет рассчитать интенсивности излучения Солнца, отраженного от поверхности Земли при различном расположении Солнца и приемника и разных направлениях линии визирования. При небольших модификациях алгоритма можно производить расчет при любых осесимметричных законах отражения поверхности.

Исследование влияния неоднородности освещения Земли Солнцем показало, что в условиях безоблачного неба неоднородность имеет значение только для случаев, когда Солнце расположено близко к горизонту, приемник значительно удален от наблюдаемой на Земле точки (пикселя), а линия визирования близка к поверхности Земли.

Сравнение результатов расчетов для плоской и сферической модели системы «атмосфера—земная поверхность» показало, что для $0 < \theta_d \leq 75^\circ$ отличие между расчетами не превышает 3,5%. Для $75 < \theta_d \leq 85^\circ$ при $D_h < 50$ км оно составляет 18%, а для $D_h \leq 100$ км — не более 30%. Следовательно, для расчета интенсивности солнечного излучения, отраженного от поверхности Земли (при зондировании поверхности Земли из космоса и зенитных углах наклона оси приемника, не превышающих 75°) можно рекомендовать программу расчета с использованием метода Монте-Карло в плоской геометрии. В этом случае освещенность Земли Солнцем необходимо рассчитывать с учетом сфе-

ричности земной поверхности. Для больших зенитных углов Солнца и приемника и на больших удалениях от точки наблюдения нужно использовать программы расчета поверхностной дымки, учитывающие сферичность системы «атмосфера—земная поверхность».

1. Odell A.P., Weinman J.A. The effect of atmospheric haze on images of the earth's surface // J. Geophys. Res. 1975. V. 80. N 36. P. 5035–5040.
2. Зега Э.П., Иванов А.П., Кацев И.Л. Перенос изображения в рассеивающей среде. Минск: Наука и техника, 1985. 327 с.
3. Сушкевич Т.А. Математические модели переноса излучения. М.: изд-во «БИНОМ лаборатория знаний», 2005. 661 с.
4. Зуев В.Е., Белов В.В., Веретенников В.В. Теория систем в оптике дисперсных сред. Томск: изд-во «Спектр» ИОА СО РАН, 1997, 402 с.
5. Каргин Б.А. Статистическое моделирование поля солнечной радиации в атмосфере. Новосибирск: ВЦ СО РАН СССР, 1984. 206 с.
6. Назаралиев М.А. Статистическое моделирование радиационных процессов в атмосфере. Новосибирск: Наука, 1990. 227 с.
7. Будаев В.П., Меламед О.П. Модифицированный метод сферических гармоник для определения функции рассеяния точки слоя мутной среды // Оптика атмосф. и океана. 2006. Т. 19. № 12. С. 1047–1052.
8. Марчук Г.И., Михайлов Г.А., Назаралиев М.А., Дарбинян Р.А., Каргин Б.А., Еленов Б.С. Метод Монте-Карло в атмосферной оптике. Новосибирск: Наука, 1976. 284 с.
9. 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 / Hansom AFB. MA 01731.
10. Белов В.В., Глазов Г.Н., Креков Г.М. Метод Монте-Карло в вычислительной математике и математической физике. Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1974. С. 240–245.
11. Соболев В.В. Перенос лучистой энергии в атмосферах звезд и планет. М.: Гос. изд-во техн.-теор. лит-ры, 1956. 392 с.

V.V. Belov, M.V. Tarasenkova. Statistical modeling of the light fluxes reflected by the spherical Earth surface.

A new algorithm of the Monte Carlo method is suggested for statistical estimating the visible radiation intensity at any arbitrary point of the atmosphere caused by reflection of solar light fluxes by the spherical Earth surface. The algorithm allows the albedo of the optically homogeneous Earth surface to be taken into account beyond the scheme of statistical modeling the trajectories of photons wandering in the medium.

Based on numerical experiments (in the visible wavelength range), the influence of inhomogeneity of the Earth surface illumination on the intensity of light fluxes reflected by the Earth surface is investigated. The results obtained are compared with the data calculated for the plane-parallel model of the atmosphere, and the azimuth dependence of the radiation intensity on the characteristics of the Earth surface is investigated.