

# О точности и быстродействии RTM-алгоритмов атмосферной коррекции спутниковых изображений в видимом и УФ-диапазонах

В.В. Белов<sup>1,2</sup>, М.В. Тарасенков<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

Поступила в редакцию 14.05.2013 г.

Предлагаются алгоритмы восстановления коэффициента отражения земной поверхности из данных спутниковых измерений, которые позволяют с разной степенью точности учесть основные компоненты излучения, формирующие ее изображение. Алгоритмы включают в себя решение уравнения переноса излучения с использованием теории линейных систем, метод Монте-Карло, аппроксимационные формулы и критерий изопланарности изображений. Валидация алгоритмов выполнена на основе численных экспериментов и сравнений с результатами расчетов других авторов.

*Ключевые слова:* метод Монте-Карло, атмосферная коррекция, уравнение переноса излучения, переотражение, боковой подсвет, солнечная дымка, сферическая геометрия; Monte Carlo method, atmospheric correction, radiative transfer equation, re-reflection, adjacency effect, solar haze, spherical geometry.

## Введение

При решении задачи восстановления отражательных свойств земной поверхности по спутниковым данным необходимо учитывать процесс взаимодействия оптического излучения с атмосферой как мутной средой, который приводит к изменению восходящих от поверхности световых потоков. Для устранения этого влияния осуществляют атмосферную коррекцию изображений. Идеи и результаты первых подходов к решению этой задачи можно найти в работах [1–3], и они продолжают интенсивно развиваться в последнее десятилетие.

Методы атмосферной коррекции можно условно разделить на 3 группы.

К *первой группе* отнесем методы, в которых атмосферная коррекция выполняется на основе анализа самого снимка без привлечения данных об оптическом состоянии атмосферы в момент съемки. Исходя из распределения интенсивности излучения, принимаемого спутниковой системой, восстанавливается при тех или иных допущениях линейный оператор действия атмосферы как мутной среды на принимаемое спутниковой системой излучение. Атмосферная коррекция выполняется путем обратного преобразования. Этот подход рассмотрен, например, в [4, 5]. При реализации этого подхода требуется априорное знание о некоторых осо-

бенностях пространственной структуры наблюдаемой поверхности (наличие участков с резким перепадом отражательных или излучательных ее характеристик).

*Вторая группа* включает методы, в которых коррекция выполняется в 3 этапа: 1) восстановление оптических характеристик атмосферы, 2) решение уравнения переноса излучения для каждого пикселя в отдельности в предположении однородности поверхности, 3) введение поправок, оценивающих влияние неоднородности земной поверхности для каждого пикселя изображения. Алгоритм этой группы методов и некоторые результаты его применения описаны, например, в [6, 7].

К *третьей группе* отнесем методы, в которых оптическая модель атмосферы определяется также из дополнительных данных, но восстановление коэффициентов отражения выполняется для некоторой совокупности пикселей и учитывается взаимное влияние соседних элементов поверхности на их изображение [8]. Алгоритмы коррекции второй и третьей групп назовем RTM-алгоритмами, т.е. алгоритмами, в которых коррекция изображений осуществляется на основе решения уравнения переноса излучения в рамках Radiative Transfer Model (RTM) метода [12].

Каждый из методов имеет свои достоинства и свои недостатки. Основное достоинство первой группы методов — нет необходимости привлечения данных об оптическом состоянии атмосферы. Однако встает вопрос о точности решения и о метеорологических условиях, при которых данный способ коррекции

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

дает достоверный результат. Кроме того, эти методы неприменимы для восстановления характеристик неизвестных поверхностей (например, при изучении поверхностей планет, обладающих атмосферой и имеющих окна прозрачности в оптическом диапазоне длин волн).

Вторая группа методов реализуется на вычислительной технике заметно быстрее, чем третья, и дает приемлемые результаты для многих оптических ситуаций, но при высокой замутненности атмосферы, а также при резких перепадах в значениях коэффициента отражения этот метод, с нашей точки зрения, может приводить к неточным результатам восстановления отражательных свойств поверхности.

Из работ [6, 7] следует, что в этой группе методов используется один и тот же радиус бокового подсвета независимо от оптической ситуации, не учитывается неоднородность земной поверхности при оценке дополнительной освещенности земной поверхности переотраженным излучением, а функция размытия точки считается осесимметричной, что при отклонении направления наблюдения от направления в надир некорректно (например, [9, 10]). Поэтому в первую очередь в видимом и УФ-диапазонах, где существен боковой подсвет [7] и влияние переотраженного излучения на освещенность земной поверхности [11], данная группа методов может давать неточные результаты. Однако в ИК-диапазоне, где радиус бокового подсвета заметно меньше, а процесс переотражения вносит малый вклад в освещенность (не более 5–10%), эта группа методов дает хорошие результаты при решении, например, таких задач, которые рассмотрены в [12].

Методы третьей группы дают наиболее точный результат, но требуют существенных временных затрат, что приводит к необходимости поиска средств их уменьшения. В данной статье на основе ранее полученных результатов [10, 13, 14] рассмотрены два способа решения этой задачи.

## 1. Алгоритмы атмосферной коррекции

Задача восстановления распределения коэффициентов отражения по земной поверхности решается в следующей постановке (рис. 1).

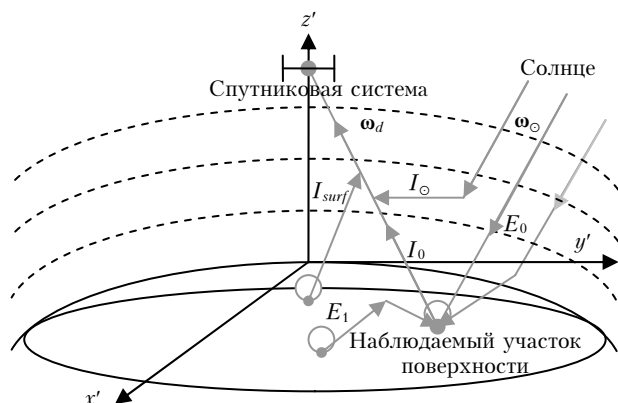


Рис. 1. Геометрическая схема постановки задачи

Рассматривается сферическая система «атмосфера–земная поверхность». Атмосфера считается разделенной на сферические однородные слои, оптические параметры которых задаются генератором оптических моделей LOWTRAN-7 [15]. Земная поверхность представляет собой ламбертовскую поверхность с неизвестным распределением коэффициента отражения по поверхности. На высоте  $h_d$  от земной поверхности располагается пассивная спутниковая система, ориентированная в направлении  $\omega_d$  и ведущая наблюдение за участком земной поверхности. Пусть пространственное разрешение оптического приемника, формирующего изображение, постоянно в пределах наблюдаемой области. На верхнюю границу атмосферы падает параллельный поток солнечного излучения в направлении  $\omega_\odot$ . Требуется, зная оптические параметры атмосферы и значения интенсивности, измеренные спутниковой системой, восстановить распределение коэффициента отражения по наблюдаемой области земной поверхности.

Решение задачи основано на теории линейных систем в приложении к оптике дисперсных сред [9] и строится следующим образом. Принимаемое спутниковой системой излучение (рис. 1) состоит: из солнечной дымки  $I_\odot$  – излучения Солнца, рассеянного в атмосфере и не взаимодействовавшего с земной поверхностью, из нерассеянного излучения, отраженного от наблюдаемого участка земной поверхности  $I_0$ , а также из поверхностной дымки  $I_{surf}$  – рассеянного излучения, отраженного от земной поверхности. Таким образом, для каждой наблюдаемой точки на поверхности можно записать

$$I_{\text{sum}}(x_w, y_w) = I_0(x_w, y_w) + I_\odot(x_w, y_w) + I_{\text{surf}}(x_w, y_w), \quad (1)$$

где

$$I_0(x_w, y_w) = \frac{r_{\text{surf}}(x_w, y_w) E_{\text{sum}}(x_w, y_w) \mu(x_w, y_w)}{\pi} \times \exp(-\tau(x_w, y_w)), \quad (2)$$

$$I_{\text{surf}}(x_w, y_w) = \iint_S r_{\text{surf}}(x'_w, y'_w) E_{\text{sum}}(x'_w, y'_w) h(x'_w, y'_w, x_w, y_w) dx'_w dy'_w, \quad (3)$$

$r_{\text{surf}}$  – распределение коэффициента отражения по земной поверхности;  $E_{\text{sum}}$  – распределение суммарной освещенности земной поверхности;  $\tau$  – оптическая длина трассы от точки на поверхности до спутниковой системы;  $(x_w, y_w)$  – поверхностные координаты некоторой наблюдаемой точки;  $h(\bullet)$  – функция размытия точки (ФРТ) канала формирования бокового подсвета;  $S$  – вся сферическая земная поверхность;  $(x'_w, y'_w)$  – поверхностные координаты точек, по которым ведется интегрирование;  $\mu$  – косинус угла между направлением на приемник и вертикалью в наблюдаемой точке.

Суммарная освещенность земной поверхности формируется падающим на нее излучением Солнца

(нерассеянным и диффузным), а также излучением, которое отразилось (в том числе многократно) от земной поверхности и, рассеявшись в атмосфере, вновь осветило земную поверхность (переотраженное излучение). Эту дополнительную освещенность важно учитывать в случае, если отражение от земной поверхности велико, а также велико рассеяние в атмосфере в направлении назад. Таким образом, переотражение следует учитывать в видимой и УФ-областях спектра (в диапазоне 0,3–0,8 мкм) при малых значениях метеорологической дальности видимости атмосферы и при высоких значениях коэффициента отражения. Анализ расчетов показывает, что доля дополнительной освещенности второй и больших кратностей в полной освещенности при  $S_M \geq 1$  км составляет не более 16,8% от суммарной освещенности.

Для определения величины дополнительной освещенности первой кратности  $E_1$  в [9] предлагается использовать формулу

$$E_1(x_w, y_w) = \iint_S r_{surf}(x'_w, y'_w) E_0(x'_w, y'_w) h_1(x'_w - x_w, y'_w - y_w) dx'_w dy'_w, \quad (4)$$

где  $h_1$  – ФРТ канала формирования дополнительной освещенности. Эта функция не зависит от расположения спутниковой системы и является функцией расстояния между точкой, где происходит отражение, и наблюдаемой точкой.

Если считать, что в пределах пикселя (области пространственного разрешения спутниковой системы) поверхность однородна, а компоненты излучения меняются незначительно, то из (1)–(4) получим нелинейную систему для поиска  $r_{surf}$

$$\begin{cases} I_{sum}(x_{w,1}, y_{w,1}) - I_{\odot}(x_{w,1}, y_{w,1}) = \\ = \frac{r_{surf,1} E_{sum,1} \mu_1}{\pi} \exp(-\tau_1) + \sum_{k=1}^N r_{surf,k} E_{sum,k} H_{k,1}; \\ \dots \\ I_{sum}(x_{w,N}, y_{w,N}) - I_{\odot}(x_{w,N}, y_{w,N}) = \\ = \frac{r_{surf,N} E_{sum,N} \mu_N}{\pi} \exp(-\tau_N) + \sum_{k=1}^N r_{surf,k} E_{sum,k} H_{k,N}, \end{cases} \quad (5)$$

где

$$E_{sum,i} = E_0 + E_0 \sum_{l=1}^N r_{surf,l} H_{l,i}^{(1)}; \quad (6)$$

$$H_{k,i} = \iint_{S_k} h_i(x'_w - x_{w,i}, y'_w - y_{w,i}) dx'_w dy'_w, \quad (7)$$

$$H_{l,i}^{(1)} = \iint_{S_l} h_l(x'_w - x_{w,i}, y'_w - y_{w,i}) dx'_w dy'_w. \quad (8)$$

Решение системы удобнее выполнять в 2 этапа: 1) определение величины  $Q = r_{surf} E_{sum}$ ; 2) определение  $r_{surf}$ .

Величина  $Q$  определяется из системы линейных уравнений

$$\begin{cases} I_{sum}(x_{w,1}, y_{w,1}) - I_{\odot}(x_{w,1}, y_{w,1}) = \\ = \frac{Q_1 \mu_1}{\pi} \exp(-\tau_1) + \sum_{k=1}^N Q_k H_{k,1}, \\ \dots \\ I_{sum}(x_{w,N}, y_{w,N}) - I_{\odot}(x_{w,N}, y_{w,N}) = \\ = \frac{Q_N \mu_N}{\pi} \exp(-\tau_N) + \sum_{k=1}^N Q_k H_{k,N}. \end{cases} \quad (9)$$

Коэффициент отражения  $r_{surf}$  с учетом первой кратности переотражения определяется из нелинейной системы вида

$$\begin{cases} \frac{Q_1}{E_0} = r_{surf,1} \left( 1 + \sum_{k=1}^N r_{surf,k} H_{k,1}^{(1)} \right); \\ \dots \\ \frac{Q_N}{E_0} = r_{surf,N} \left( 1 + \sum_{k=1}^N r_{surf,k} H_{k,N}^{(1)} \right). \end{cases} \quad (10)$$

Здесь  $r_{surf,i}$  – значение коэффициента отражения в  $i$ -м пикселе изображения, полученное с учетом первой кратности переотражения.

Если требуется учет больших кратностей переотражения, то предлагается выполнять его в однородном приближении. В этом случае коэффициент отражения определится по формуле

$$r_{surf,i} \approx \frac{\tilde{r}_{surf,i} (1 + \tilde{r}_{surf,i} \gamma_1)}{1 + \tilde{r}_{surf,i} \gamma_1 (1 + \tilde{r}_{surf,i} \gamma_1)}, \quad (11)$$

где  $r_{surf,i}$  – значение коэффициента отражения, полученное с учетом бесконечного числа кратностей переотражения,  $\tilde{r}_{surf,i}$  – результаты решения системы (10);  $\gamma_1$  – доля дополнительной освещенности  $i$ -й кратности от дополнительной освещенности  $i - 1$ -й кратности при  $r_{surf} = 1$ . Отметим, что при очень мутной атмосфере возможна неустойчивость решений систем (9), (10), с которой мы сталкивались.

Реализация подобного подхода требует существенных затрат машинного времени, так как необходимо определять величины  $\tau$ ,  $I_{\odot}$ ,  $H_k$  для каждого наблюдаемого пикселя, а в выражениях (7), (8) интегрирование выполняется по всей поверхности Земли. Для ускорения расчета предлагается использовать ряд следующих моментов.

### 1.1. Критерий изопланарности изображений

Из линейной теории видения следует, что каждой наблюдаемой точке соответствует «своя» ФРТ канала формирования бокового подсвета. Однако изображение можно так разбить на изопланарные зоны, что в пределах каждой из них ФРТ можно считать постоянной. Тогда (3) упростится [9] до вида

$$I_{surf}(x_w, y_w) = \iint_S r_{surf}(x'_w, y'_w) E_{sum}(x'_w, y'_w) \times h(x'_w - x_w, y'_w - y_w) dx'_w dy'_w. \quad (12)$$

Изопланарные зоны представляют собой области, задаваемые диапазоном углов отклонения линии визирования от направления в надир  $\theta_d$ . Для определения изопланарных зон в работе [10] предлагается использовать критерий выделения изопланарных зон вида

$$\begin{cases} \theta_{d,i+1} = \arccos \left( 1 - \left( \frac{m_{00}(\theta_{d,i}) - m_{00}(0^0)}{1 + \delta} \right) / \exp(A) \right)^{1/N}, \\ m_{00}(\theta_{d,i}) = m_{00}(0^0) - \exp(A)(1 - \cos \theta_{d,i})^N, \end{cases} \quad (13)$$

где

$$m_{00}(\theta_{d,i}) = \frac{\mu_i}{\pi} \exp(-\tau_i) + \iint_S h(x'_w, y'_w; \theta_{d,i}) dx'_w dy'_w.$$

Здесь  $A$ ,  $N$  – аппроксимационные константы, определяемые методом наименьших квадратов по узловым значениям интеграла ФРТ канала формирования бокового подсвета, определяемого с помощью алгоритма, который описан в [13];  $\delta$  – порядок погрешности задания изозон.

## 1.2. Радиус бокового подсвета

В (7) выполняется интегрирование по всей поверхности Земли, но ФРТ канала формирования бокового подсвета является (при безоблачной атмосфере и не имеющей удаленных от поверхности аэрозольных слоев повышенной плотности [9, с. 214]) быстро убывающей функцией, поэтому область интегрирования имеет смысл ограничить радиусом бокового подсвета  $R_{surf}$  (радиус понимается в поверхностных координатах). Введение этой величины позволяет в (7) производить интегрирование только по этой области. Возникает вопрос – как выбирать эту величину. Применительно к задаче атмосферной коррекции ее нужно выбирать так, чтобы погрешность восстановления не превышала заданного уровня. Анализ показывает, что наиболее жесткие требования к этой величине предъявляются в случае, если поверхность однородна, а коэффициент отражения равен 1. Величина  $Q$  в этом случае определяется из соотношения

$$I_{sum}(x_w, y_w) = I_{\odot}(x_w, y_w) + \frac{Q\mu(x_w, y_w)}{\pi} \times \exp(-\tau(x_w, y_w)) + QH(x_w, y_w), \quad (14)$$

$$H(x_w, y_w) = \iint_S h(x'_w - x_w, y'_w - y_w) dx'_w dy'_w. \quad (15)$$

Если интегрировать только в пределах радиуса бокового подсвета, то (14) примет вид

$$I_{sum}(x_w, y_w) = I_{\odot}(x_w, y_w) + \frac{\tilde{Q}\mu(x_w, y_w)}{\pi} \exp(-\tau(x_w, y_w)) + \tilde{Q}k(R_{surf})H(x_w, y_w). \quad (16)$$

Здесь

$$k(R_{surf}; x_w, y_w) = \frac{\iint_{S(R_{surf})} h(x'_w - x_w, y'_w - y_w) dx'_w dy'_w}{H(x_w, y_w)}, \quad (17)$$

где  $S(R_{surf})$  – область на земной поверхности, ограниченная радиусом бокового подсвета.

Если задать радиус бокового подсвета как область, для которой  $\delta_1 \leq Q/\tilde{Q} \leq 1$ , то в пределах изопланарной зоны получим условие для определения  $R_{surf}$ :

$$k_i(R_{surf,i}) \geq \delta_1 + (\delta_1 - 1) \frac{\mu_i \exp(-\tau_i)/\pi}{H_i}, \quad (18)$$

где величины  $k_i$ ,  $R_{surf,i}$ ,  $\tau_i$ ,  $H_i$ ,  $\mu_i$  соответствуют  $i$ -й изозоне;  $\delta_1$  – параметр, задающий точность определения величины  $Q$  (в расчетах использовалось значение  $\delta_1 = 0,99$ ).

## 1.3. Радиус области формирования дополнительной освещенности

В выражении (8) интегрирование также осуществляется по всей поверхности Земли. Однако в силу быстрого убывания функции  $h_1$  можно ограничить область интегрирования радиусом формирования переотражения  $R_1$ . Для оценки сверху этой величины предлагается рассматривать также однородный случай с коэффициентом отражения, равным 1. При этом

$$Q = \frac{E_0}{1 - \gamma_1}. \quad (19)$$

Если учитывать освещенность переотражения только первой кратности, а интегрирование выполнять только в пределах ограниченной области  $S(R_1)$ , то выражение для  $Q$  будет иметь вид

$$Q = \tilde{r}_{surf} E_0 (1 + \tilde{r}_{surf} k_1(R_1) \gamma_1), \quad (20)$$

где

$$k_1(R_1) = \frac{\iint_{S(R_1)} h_1(x'_w - x_w, y'_w - y_w) dx'_w dy'_w}{\iint_S h_1(x'_w - x_w, y'_w - y_w) dx'_w dy'_w}. \quad (21)$$

Тогда, если при  $r_{surf} = 1$  поставить условие, что  $\delta_2 \leq r_{surf}/\tilde{r}_{surf} \leq 1$ , то из (19), (20) получится условие для поиска радиуса области формирования переотражения:

$$k_1(R_1) \geq \frac{\delta_2}{\gamma_1} \left( \frac{\delta_1}{1 - \gamma_1} - 1 \right). \quad (22)$$

Заметим, что неучет в (20) переотражений второй и больших кратностей также приводит к погрешности, поэтому при больших значениях величины  $\gamma_1$  существует предельная точность определения величины  $\delta_2$ . Рекомендуемые значения величины  $\delta_2$  и соответствующие ей значения  $k_1$  для различных значений  $\gamma_1$  приведены в табл. 1.

Таблица 1  
Значения точности определения коэффициента отражения  $\delta_2$  и соответствующие ей величины  $k_1$  при заданных значениях величины  $\gamma_1$

$\gamma_1$	$\delta_2$	$k_1$
0,035–0,1	0,95	0,53
0,1–0,2	0,95	0,89
0,2–0,3	0,9	0,86
0,3–0,4	0,85	0,89
> 0,4	0,85	0,97

#### 1.4. Формула для интенсивности солнечной дымки

Интенсивность солнечной дымки  $I_\odot$  при заданных оптических условиях является функцией положения Солнца  $\omega_\odot$  и углов ориентации линии визирования спутниковой системы  $\omega_d$ . В работе [14] для описания зависимости  $I_\odot$  от угла ориентации спутниковой системы предлагается использовать формулу

$$I_\odot(\theta_d, \varphi_d) = -\frac{B + \sqrt{B^2 - 4AC_{13}}}{2A \cos \theta_d}, \quad (23)$$

где

$$A = C_{11} \cos^2 \theta_d + C_{i1} (\sin \theta_d \cos \varphi_d)^2 + C_{i2} \cos \theta_d \sin \theta_d \cos \varphi_d - (\sin \theta_d \sin \varphi_d)^2; \quad (24)$$

$$B = C_{12} \cos \theta_d + C_{i3} \sin \theta_d \cos \varphi_d; \quad (25)$$

$$i = \begin{cases} 2, & 0 \leq \varphi_d \leq 90^\circ, \\ 3, & 90 \leq \varphi_d \leq 180^\circ; \end{cases} \quad (26)$$

$\theta_d, \varphi_d$  – углы ориентации оси оптической системы;  $C_{11}, C_{12}, C_{13}, C_{21}, C_{22}, C_{23}, C_{31}, C_{32}, C_{33}$  – константы, получаемые путем аппроксимации узловых расчетов интенсивности солнечной дымки методом Монте-Карло для узловых направлений  $\theta_d = 0, 15, \dots, 60^\circ$ ;  $\varphi_d = 0, 30, \dots, 180^\circ$  (35 узлов).

Использование (23)–(26) дает возможность не выполнять расчет  $I_\odot$  для каждого направления визирования, а вместо этого выполнить расчет в узловых точках и найти константы аппроксимации, что позволит существенно сократить время расчетов, особенно при большом количестве направлений визирования и больших диапазонах изменения  $\omega_d$ .

## 2. Тестирование алгоритмов

Для проверки правильности работы алгоритмов коррекции выполнялся ряд тестовых расчетов. Результаты части из них приведены в [10, 13, 14].

Дополнительно к этому, чтобы убедиться, что расчет переотраженного излучения выполняется корректно, было выполнено сравнение величины  $\gamma_1$ , приведенной автором [11] для стандартной модели атмосферы с концентрацией озона 324 е.Д. и лишенной аэрозоля, с нашими результатами для оптической модели атмосферы лета средних широт в отсутствие аэрозоля, рассчитанной генератором, описанным в [15]. Результаты этих расчетов приведены на рис. 2, а. Сравнение показывает, что отличие составляет менее 4,5%.

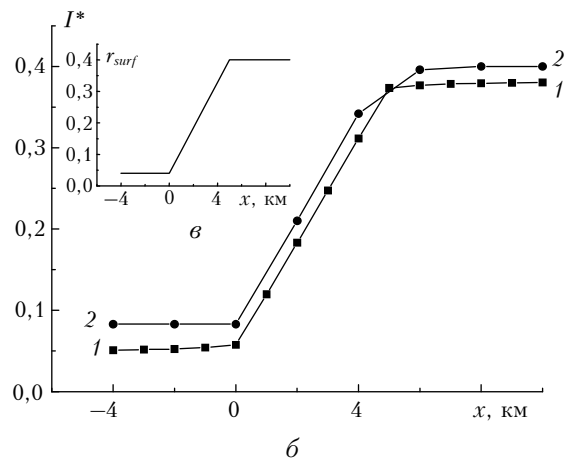
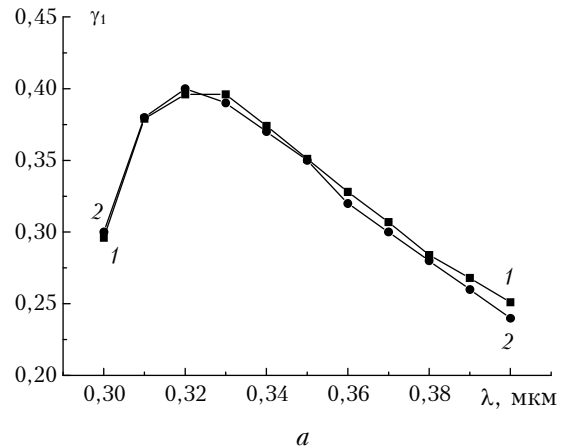


Рис. 2. Результаты тестовых расчетов: а – значения  $\gamma_1$ , рассчитанные нами (кривая 1) и по данным [11] (кривая 2); б – нормированная яркость тестового объекта  $I^*$ , полученная нами (кривая 1) и по данным [16] (кривая 2); в – распределение коэффициента  $r_{surf}$  для тестового объекта

Для проверки корректности работы программ учета бокового подсвета и солнечной дымки были выполнены сравнения с расчетами из [16, рис. 1]. В [16] приводятся расчеты нормированной на произведение солнечной постоянной и косинуса зенитного угла Солнца яркости неоднородного тестового объекта, наблюдаемого спутниковой системой при  $\lambda = 0,55$  мкм. Объект задан распределением коэффициента отражения  $r_{surf}(x, y) = r_{surf}(x)$ , приведенным на рис. 2, в. Сравнимые результаты получены для однородного аэрозольного слоя атмосферы

оптической толщины  $\tau_A = 0,21$ , расположенного на высоте от 1 до 5 км, состоящего из сферических частиц с распределением по размерам Юнге (параметр Юнге равен 2) и комплексным показателем преломления  $m = 1,5 + i \cdot 0,0$ . В [16] диапазон размеров частиц не приведен, поэтому для определенности в наших расчетах был выбран диапазон размеров от 0,01 до 2 мкм.

Результат сравнения приведен на рис. 2, б. Абсолютное отличие расчетов не превышает 0,032. Причина отличий состоит, по-видимому, в том, что в тестовом примере [16] используется более вытянутая вперед индикатриса рассеяния, вследствие чего рассеяние вперед у используемой нами модели ниже, но неопределенность в [16] в диапазоне размеров частиц не позволяет устранить это несоответствие. В целом совокупность проведенных тестов позволяет утверждать, что предлагаемые нами алгоритмы и разработанные на их основе программы дают достоверные результаты.

Назовем базовым среди вышерассмотренных алгоритмов атмосферной коррекции тот, в котором наиболее точно учитываются процесс переотражения, боковой подсвет (в пределах области изопланарности изображений) и интенсивность солнечной дымки. Валидация этого алгоритма атмосферной коррекции выполнена для тестовой задачи восстановления коэффициента отражения участка земной поверхности, приведенного на рис. 3 (50% области имеет  $r_{surf} = 0,9$  и 0,05). Для расчетов была выбрана длина волны  $\lambda = 0,469$  мкм, что соответствует центру 3-го спектрального канала прибора MODIS (спутники TERRA и AQUA). Результаты данных расчетов выбраны в качестве иллюстраций потому, что они позволяют наглядно убедиться в необходимости учета влияния процессов бокового подсвета и переотражения при решении задач восстановления отражательной способности наблюдаемой поверхности.

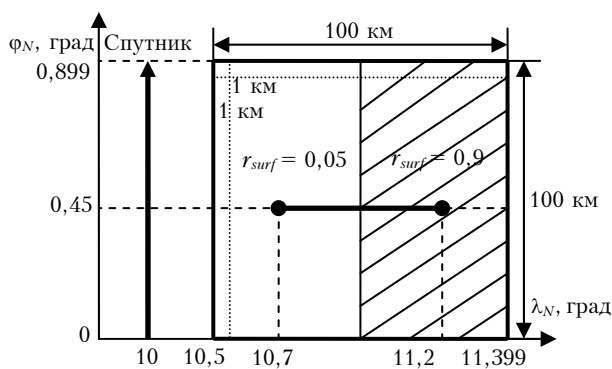
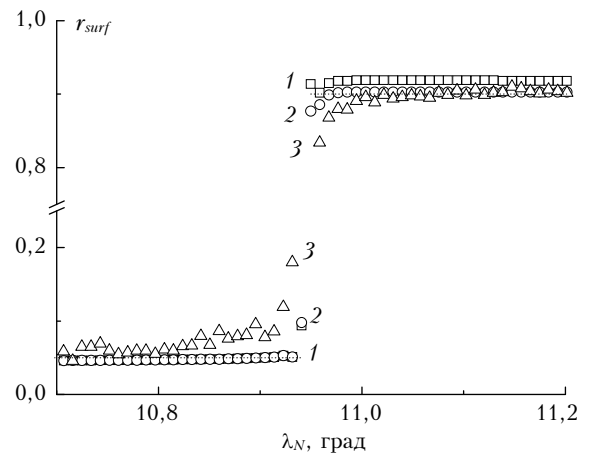


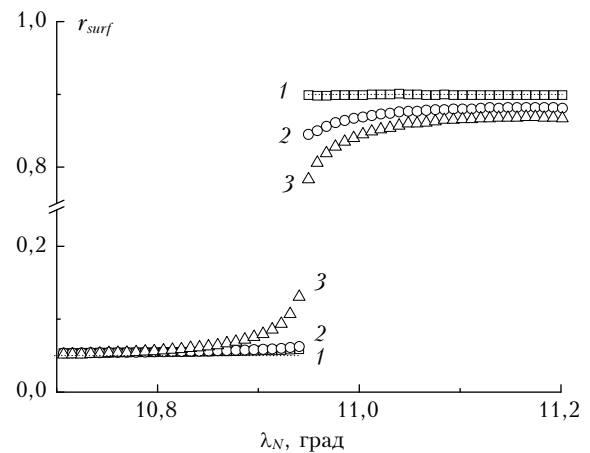
Рис. 3. Взаимное расположение спутника и наблюдаемой области, а также распределение коэффициента отражения по земной поверхности

Результаты расчетов коэффициента отражения земной поверхности вдоль линии  $\varphi_N = 0,45^\circ$ , полученные базовым алгоритмом (символы 1) и производными от него, основанными на учете переотражения в однородном приближении (символы 2)

и на приближении однородности поверхности (символы 3), приведены на рис. 4 для различных метеоусловий.



а



б

Рис. 4. Восстановленные различными способами значения коэффициента отражения для тестового примера (см. рис. 3) вдоль линии  $\varphi_N = 0,45^\circ$ : а —  $\lambda = 0,469$  мкм,  $S_M = 1$  км; б —  $\lambda = 0,469$  мкм,  $S_M = 50$  км

Проведенное сравнение результатов восстановления коэффициентов отражения с исходными значениями (табл. 2) показывает, что в рассмотренных тестовых примерах применение базового алгоритма (А) позволяет получить результаты с небольшой абсолютной погрешностью (менее 0,044), восстановление с учетом переотражения в однородном приближении (Б) дает погрешность в пределах 0,077, а атмосферная коррекция в однородном приближении при учете переотражения и бокового подсвета (В) приводит к погрешности в пределах 0,308. Из этого следует, что в ряде случаев использование базового алгоритма позволяет определить коэффициент отражения с заметно большей точностью, чем алгоритмы, учитывающие приближенно отдельные факторы влияния неоднородности поверхности на принимаемое излучение.

Таблица 2

Оценка сверху абсолютной погрешности ( $\Delta$ ) восстановления  $r_{surf}$  для тестовых примеров

Способ восстановления	$\Delta$ в области, где $r_{surf} = 0,05$	$\Delta$ в области, где $r_{surf} = 0,9$
$\lambda = 0,469$ мкм, $S_M = 1$ км		
А	0,044	0,043
Б	0,048	0,077
В	0,308	0,196
$\lambda = 0,469$ мкм, $S_M = 50$ км		
А	0,009	0,009
Б	0,012	0,064
В	0,081	0,131

Что касается времени расчетов, то для получения результатов, аналогичных приведенным на рис. 4, базовому алгоритму требуется 90–100 мин работы персонального компьютера со средней производительностью 19,5 ГФлопс, из которых 60–70% уходит на решение систем (9), (10) и 8–10% на расчеты методом Монте-Карло. Для расчета в однородном приближении при учете переотражения требуется порядка 40–60 мин работы этого компьютера, из которых 40–50% требуется для решения системы (9) и 8% на расчеты алгоритмами метода Монте-Карло. Если проводить восстановление алгоритмом в однородном приближении, то требуется порядка 15 мин. Если не использовать предлагаемые нами дополнения к формулам (1)–(11), то машинное время для достижения той же точности расчетов, что и в случае расчетов базовым алгоритмом, будет по нашим оценкам более чем в 6 раз больше. При выборе алгоритма решения задачи пассивного зондирования отражательных свойств земной поверхности следует исходить из требований к уровню погрешности восстанавливаемых величин.

### Заключение

Предложен новый алгоритм атмосферной коррекции спутниковых изображений земной поверхности в видимом и УФ-диапазонах длин волн, который позволяет учитывать:

- 1) интенсивность солнечной дымки;
- 2) боковой подсвет (в области изопланарности изображений);
- 3) дополнительный подсвет поверхности, обусловленный процессом отражения (переотражения) излучения от нее;
- 4) сферичность земной поверхности.

Тестовыми численными экспериментами показана достоверность результатов расчетов предложенным алгоритмом различных компонент излучения, формирующих спутниковые изображения земной поверхности. Базовый алгоритм характеризуется более высокой точностью по сравнению с производными от него алгоритмами и большими затратами машинного времени на получение результатов. Выбор конкретного алгоритма для осуществления атмосферной коррекции спутниковых изображений земной поверхности зависит от требований к точности результатов коррекции.

Авторы благодарят В.В. Веретенникова за предоставленную программу расчета индикатрисы аэрозольного рассеяния и С.В. Афонина за полезное обсуждение направления исследований.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта программы Президиума РАН № 4, программы ОНЗ РАН № 5, Минобрнауки (гос. задание ТГУ в части проведения НИР № 5.4160.2011), при поддержке Минобрнауки РФ (госконтракты № 14.515.11.0030, 11.518.11.7045 и 8325), грантов РФФИ № 11-01-00673-а, 12-05-33068 мол\_а\_вед, проекта № 11-01-00228-а.

1. Otterman J., Fraser R.S. Adjacency effects on imaging by surface reflection and atmospheric scattering: cross radiance to zenith // *Appl. Opt.* 1979. V. 18, N 16. P. 2852–2860.
2. Pearce W.A. Monte Carlo study of the atmospheric spread function // *Appl. Opt.* 1986. V. 25, N 3. P. 438–447.
3. Белов В.В., Борисов Б.Д., Макушкина И.Ю. Некоторые закономерности формирования помехи бокового подсвета в системах видения // *Оптика атмосфер.* 1988. Т. 1, № 2. С. 18–24.
4. Протасов К.Т., Бусыгин Л.А., Белов В.В. Метод преобразования гистограмм яркостей и вейвлет-коррекция атмосферных искажений спутниковых изображений // *Оптика атмосфер. и океана.* 2010. Т. 23, № 2. С. 136–142.
5. Ruiz C.P., Lopez F.J. A restoring SPOT image using PSF-derived deconvolution filters // *Int. J. Remote Sens.* 2002. V. 23, N 12. P. 2379–2391.
6. Vermote E.F., Vermeulen A. Atmospheric correction algorithm: spectral reflectances (MOD09). Algorithm Theoretical Background document, version 4.0. 1999. [Электронный ресурс]: [http://modis.gsfc.nasa.gov/atbd/atbd\\_nod08.pdf](http://modis.gsfc.nasa.gov/atbd/atbd_nod08.pdf)
7. Sei A. Analysis of adjacency effects for two Lambertian half-surfaces // *Int. J. Remote Sens.* 2007. V. 28, N 8. P. 1873–1890.
8. Reinersman P.N., Carder K.L. Monte Carlo simulation of the atmospheric point-spread function with an application to correction for the adjacency effect // *Appl. Opt.* 1995. V. 34, N 21. P. 4453–4471.
9. Зуев В.Е., Белов В.В., Веретенников В.В. Теория систем в оптике дисперсных сред. Томск: Изд-во «Спектр» Института оптики атмосферы СО РАН, 1997. 402 с.
10. Белов В.В., Тарасенков М.В. Статистическое моделирование функции размытия точки в сферической атмосфере и критерий выделения зон изопланарности изображений // *Оптика атмосфер. и океана.* 2010. Т. 23, № 5. С. 371–377.
11. Lenoble J. Modeling of the influence of snow reflectance on ultraviolet irradiance for cloudless sky // *Appl. Opt.* 1998. V. 37, N 12. P. 2441–2447.
12. Афонин С.В., Белов В.В., Соломатов Д.В. Решение задач температурного мониторинга земной поверхности из космоса на основе RTM-метода // *Оптика атмосфер. и океана.* 2008. Т. 21, № 12. С. 1056–1063.
13. Белов В.В., Тарасенков М.В. Статистическое моделирование интенсивности световых потоков, отраженных сферической земной поверхностью // *Оптика атмосфер. и океана.* 2010. Т. 23, № 1. С. 14–20.
14. Белов В.В., Тарасенков М.В., Пискунов К.П. Параметрическая модель солнечной дымки в видимой и УФ-области спектра // *Оптика атмосфер. и океана.* 2010. Т. 23, № 4. С. 294–297.

15. *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 2010 / Hansom AFB. MA 01731. 137 p.
16. *Mekler Y., Kaufman Y.J.* Contrast reduction by the atmosphere and retrieval of nonuniform surface reflectance // *Appl. Opt.* 1982. V. 21, N 2. P. 310–316.

***V.V. Belov, M.V. Tarasenkov.* On the accuracy and speed of RTM algorithms for atmospheric correction of satellite images in the visible and UV ranges.**

Algorithms for reconstruction of the Earth's surface reflection coefficient from the data of satellite measurements are suggested. They allow the main components of radiation, forming an Earth's surface image, to be taken into account with different degrees of accuracy. The algorithms involve a solution of the radiative transfer equation with the use of the linear system theory, Monte Carlo method, approximation formulas, and criterion of image isoplanarity. The algorithms are validated based on numerical experiments and comparisons with results of calculations by other authors.