

Комплекс программ восстановления отражательных свойств земной поверхности в видимом и УФ-диапазонах

М.В. Тарасенков¹, В.В. Белов^{1,2*}

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

²Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

Поступила в редакцию 11.03.2014 г.

Приводится описание комплекса программ восстановления распределения коэффициента отражения земной поверхности, а также разработанных приемов для значительного сокращения времени расчетов. На примере тестового участка западного побережья Африки проведено сравнение результатов, полученных предлагаемым алгоритмом, алгоритмом однородной коррекции и стандартным алгоритмом MOD09 NASA. Коэффициенты корреляции результатов для данного тестового участка составляют между новым алгоритмом и алгоритмом однородной коррекции 0,999, а с алгоритмом MOD09 – 0,984.

Ключевые слова: метод Монте-Карло, атмосферная коррекция, уравнение переноса излучения; Monte Carlo method, atmospheric correction, radiative transfer equation.

Введение

Знание коэффициентов отражения земной поверхности имеет повсеместное применение в таких задачах, как картирование местности, поиск месторождений, мониторинг состояния лесов и др. Одним из основных, а во многих случаях практически единственным источником этих данных является спутниковая информация. Это связано с всеохватностью спутниковых систем. Однако использование спутниковых данных имеет свою специфику. Одной из ключевых задач при использовании спутниковых данных является устранение влияния атмосферы, или атмосферная коррекция. В настоящий момент существует несколько подходов к решению этой задачи, например [1–3], однако каждый из них имеет свои ограничения. Для учета всех необходимых факторов, влияющих на формирование изображения в видимом и УФ-диапазонах, был разработан алгоритм атмосферной коррекции, описанный в [4]. В настоящей статье с целью сопоставления разработанного алгоритма с результатами алгоритма MOD09, используемого в NASA, для тестового участка земной поверхности было выполнено сравнение восстановленных коэффициентов отражения земной поверхности.

Процессы, формирующие изображение в видимом и УФ-диапазонах

Перенос излучения в рассматриваемом диапазоне длин волн в общем случае носит сложный характер. В принимаемое спутниковой системой излучение в наиболее сложных оптических ситуациях входят (рис. 1, а):

1) интенсивность солнечной дымки I_9 (излучения Солнца, рассеянного в атмосфере и не взаимодействовавшего с земной поверхностью), которое в условиях сильной мутности или оптически плотной облачности может составлять значительную часть принимаемого излучения;

2) интенсивность ослабленного атмосферой нерассеянного излучения от наблюдаемого участка земной поверхности I_0 ;

3) интенсивность рассеянного излучения от земной поверхности, отраженного наблюдаемым участком и остальной поверхностью I_{surf} (поверхностная дымка или боковой подсвет).

Освещение земной поверхности Солнцем при этом носит также сложный характер. Суммарная освещенность формируется не только прямым и диффузным излучением Солнца E_0 , но и излучением, которое, отразившись от земной поверхности, вновь ее осветило (переотраженным излучением) E_1 (рис. 1, б). Процесс переотражения происходит многократно,

* Михаил Викторович Тарасенков (TMV@iao.ru);
Владимир Васильевич Белов (Belov@iao.ru).

постепенно убывая по геометрической прогрессии с коэффициентом γ_1 при коэффициенте отражения земной поверхности $r_{surf} = 1$.

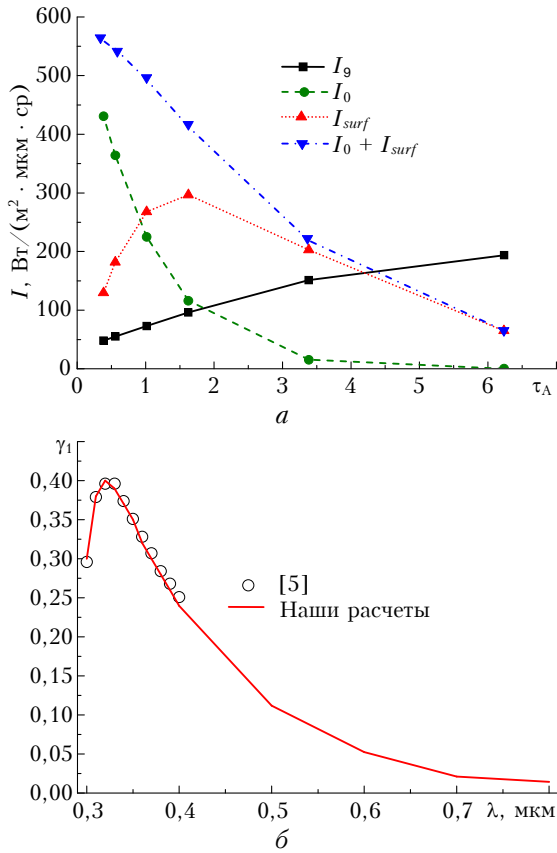


Рис. 1. Компоненты излучения при $\lambda = 0,47$ мкм, метеорологической дальности видимости $S_M = 1'50$ км, зенитном угле Солнца $\theta_9 = 0^\circ$, наблюдении в надир ($\theta_d = 0^\circ$), $r_{surf} = 1$. Оптические модели задаются с помощью генератора LOWTRAN-7 [6] (a); зависимость вклада однократно переотраженного излучения в освещенность γ_1 от длины волны при $r_{surf} = 1$ для молекулярной атмосферы (б)

Алгоритм расчета

Задача решается в следующей постановке (рис. 2).

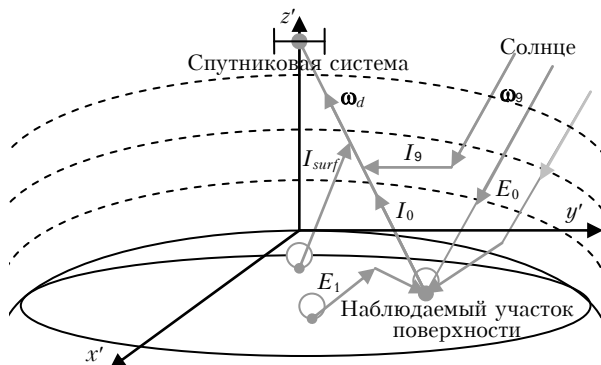


Рис. 2. Геометрическая схема постановки задачи

На высоте h_d от сферической земной поверхности располагается пассивная спутниковая система, ориентированная в направлении $\omega_d = (\theta_d, \varphi_d)$ и ведущая наблюдение за участком земной поверхности. Земная поверхность – ламбертовская с неизвестным распределением коэффициента отражения. Пространственное разрешение оптического приемника считается постоянным в пределах наблюдаемой области. На верхнюю границу атмосферы падает поток солнечного излучения в направлении ω_9 . Требуется, зная оптические параметры атмосферы и интенсивности, измеренные спутниковой системой, восстановить коэффициент отражения r_{surf} .

Решение задачи строится следующим образом [4]. Интенсивность принимаемого спутниковой системой излучения I_{sum} состоит из

$$I_{sum} = I_0 + I_\odot + I_{surf}. \quad (1)$$

Если считать, что в пределах пикселя поверхность однородна, компоненты излучения меняются незначительно, и учитывать только дополнительную освещенность земной поверхности 1-й кратности, то для поиска r_{surf} необходимо решить нелинейную систему уравнений [4]. Решение системы распадается на 2 этапа. На первом этапе определяется величина $Q = r_{surf} E_{sum}$ из системы уравнений вида

$$\begin{cases} I_{sum}(x_{w,1}, y_{w,1}) - I_\odot(x_{w,1}, y_{w,1}) = \\ = \frac{Q_1 \mu_1}{\pi} \exp(-\tau_1) + \sum_{k=1}^N Q_k H_{k,1}, \\ \dots \\ I_{sum}(x_{w,N}, y_{w,N}) - I_\odot(x_{w,N}, y_{w,N}) = \\ = \frac{Q_N \mu_N}{\pi} \exp(-\tau_N) + \sum_{k=1}^N Q_k H_{k,N}, \end{cases} \quad (2)$$

$$H_{k,i} = \iint_{S_k} h_i(x'_w - x_{w,i}, y'_w - y_{w,i}) dx'_w dy'_w, \quad (3)$$

где μ – косинус угла между направлением на приемную систему и вертикалью в наблюдаемой точке поверхности; τ – оптическая длина трассы; h_i – функция размытия точек (ФРТ) канала формирования бокового подсвета при наблюдении i -й точки; $H_{k,i}$ – интеграл по поверхности k -го пикселя S_k от ФРТ канала формирования бокового подсвета при наблюдении i -го пикселя.

На втором этапе определяется коэффициент отражения из нелинейной системы вида

$$\begin{cases} \frac{Q_1}{E_0} = r_{surf,1} \left(1 + \sum_{l=1}^N r_{surf,l} P_l \right), \\ \dots \\ \frac{Q_N}{E_0} = r_{surf,N} \left(1 + \sum_{l=1}^N r_{surf,l} P_l \right), \end{cases} \quad (4)$$

$$P = \iint_{S_i} p(x'_w - x_w, y'_w - y_w) dx'_w dy'_w. \quad (5)$$

Здесь $r_{surf,i}$ – искомое значение коэффициента отражения в i -м пикселе изображения; p – ФРТ канала формирования дополнительной освещенности; P_l – интеграл по поверхности l -го пикселя от ФРТ канала формирования дополнительной освещенности.

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

$$r_{surf,i} \approx \frac{\tilde{r}_{surf,i}(1 + \tilde{r}_{surf,i}\gamma_1)}{1 + \tilde{r}_{surf,i}\gamma_1(1 + \tilde{r}_{surf,i}\gamma_1)}, \quad (6)$$

где $r_{surf,i}$ – значение коэффициента отражения, полученное с учетом бесконечного числа кратностей переотражения, $\tilde{r}_{surf,i}$ – результаты решения системы (4); γ_1 – вклад однократно переотраженного излучения в освещенность земной поверхности при $r_{surf} = 1$.

Реализация данного подхода требует существенных затрат машинного времени, поэтому в [4] для ускорения расчета предлагается использовать ряд следующих моментов.

1. Критерий изопланарности изображений

Изображение можно разбить на зоны, задаваемые углом θ_d , в пределах каждой из которых ФРТ можно считать постоянной. Для их определения в [7] предложен критерий выделения изопланарных зон вида

$$\begin{cases} \theta_{d,i+1} = \arccos \left(1 - \left(\left(m_{00}(0^0) - \frac{m_{00}(\theta_{d,i})}{1 + \delta} \right) / \exp(A) \right)^{1/N} \right); \\ m_{00}(\theta_{d,i}) = m_{00}(0^0) - \exp(A)(1 - \cos \theta_{d,i})^N, \end{cases} \quad (7)$$

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

Здесь A , N – аппроксимационные константы, определяемые методом наименьших квадратов по узловым значениям интеграла ФРТ канала формирования бокового подсвета, получаемым с помощью алгоритма, описанного в [8]; δ – порядок погрешности задания изопланарных зон.

2. Радиус бокового подсвета

Функция h является во многих случаях быстро убывающей функцией, поэтому область интегрирования в (3) имеет смысл ограничить радиусом бокового подсвета R_{surf} (радиус понимается в поверхностных координатах). Для задания R_{surf} предлагается использовать условие вида [4]:

$$k_i(R_{surf,i}) \geq \delta_1 + (\delta_1 - 1) \frac{\mu_i \exp(-\tau_i) / \pi}{H_i}, \quad (8)$$

где

$$k_i(R_{surf}) = \frac{\iint_{S(R_{surf})} h_i(x'_w - x_w, y'_w - y_w) dx'_w dy'_w}{H(x_w, y_w)}; \quad (9)$$

$$H(x_w, y_w) = \iint_S h(x'_w - x_w, y'_w - y_w) dx'_w dy'_w. \quad (10)$$

Здесь k_i , $R_{surf,i}$, τ_i , H_i , μ_i соответствуют i -й изозоне; δ_1 – задает точность определения Q (использовалось $\delta_1 = 0,99$); $S(R_{surf})$ – область земной поверхности в пределах R_{surf} , S – вся земная поверхность.

3. Радиус области влияния переотражения

В силу быстрого убывания функции p можно ограничить область интегрирования в (5) радиусом формирования переотражения R_1 . Для оценки R_1 предлагается использовать условие [4]:

$$k_1(R_1) \geq \frac{\delta_2}{\gamma_1} \left(\frac{\delta_2}{1 - \gamma_1} - 1 \right), \quad (11)$$

где

$$k_1(R_1) = \frac{\iint_{S(R_1)} p(x'_w - x_w, y'_w - y_w) dx'_w dy'_w}{\iint_S p(x'_w - x_w, y'_w - y_w) dx'_w dy'_w}; \quad (12)$$

δ_2 – требуемая точность определения коэффициента отражения.

4. Формула для интенсивности солнечной дымки

В работе [9] для описания зависимости I_9 от угла ориентации спутниковой системы предлагается использовать формулу вида

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

где

$$A = C_{11} \cos^2 \theta_d + C_{i1} (\sin \theta_d \cos \varphi_d)^2 + C_{i2} \cos \theta_d \sin \theta_d \cos \varphi_d - (\sin \theta_d \sin \varphi_d)^2; \quad (14)$$

$$B = C_{12} \cos \theta_d + C_{i3} \sin \theta_d \cos \varphi_d; \quad (15)$$

θ_d – зенитный угол ориентации оси оптической системы; φ_d – азимутальный угол между направлением на Солнце и осью 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).

Комплекс программ атмосферной коррекции

На основе описанного выше алгоритма был разработан комплекс программ атмосферной коррекции спутниковых данных в видимом и УФ-диапазонах. Блок-схема алгоритма приведена на рис. 3. Расчет строится следующим образом.

1. Считываются спутниковые данные о взаимном расположении центра наблюдаемого участка, спутниковой системы и Солнца, измерения интенсивности принимаемого излучения в заданном канале спутника MODIS, данные об аэрозольной оптической толще (АОТ) τ_A рассматриваемого участка.

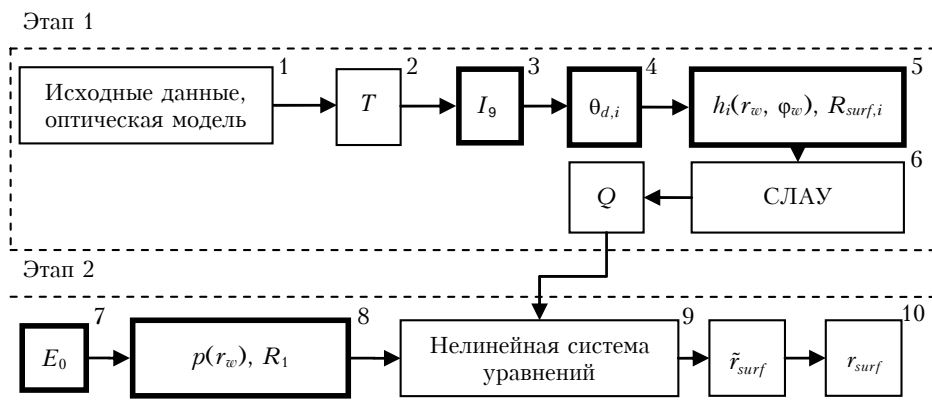


Рис. 3. Блок-схема комплекса программ

Из моделей, генерируемых LOWTRAN-7 [6], выбирается наиболее близкая по АОТ модель, задающая профиль оптических параметров в атмосфере.

2. Определяется коэффициент пропускания T .

3. Методом Монте-Карло выполняется расчет интенсивности солнечной дымки I_9 для 35 узловых направлений, методом наименьших квадратов определяются константы аппроксимации C_{11}, \dots, C_{33} и по формулам (13)–(15) находятся приближенные значения I_9 для каждого пикселя изображения.

4. Методом Монте-Карло вычисляются узловые значения интеграла ФРТ для зенитных углов приемника $0, 15, \dots, 60^\circ$. С помощью метода наименьших квадратов находятся константы аппроксимации A, N , а по критерию (7) – границы изопланарных зон $\theta_{d,i}$.

5. По формулам (8)–(10) определяется R_{surf} . Для каждой из изопланарных зон методом Монте-Карло вычисляется своя функция размытия точки канала формирования бокового подсвета $h_i(r_w, \varphi_w)$ в пределах своего $R_{surf,i}$ ((r_w, φ_w) – поверхностные полярные координаты).

6. Рассчитываются коэффициенты системы линейных алгебраических уравнений (2). С использованием метода решения системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) определяются значения величины Q – светимости земной поверхности.

7. Методом Монте-Карло вычисляется освещенность земной поверхности без учета переотражений E_0 .

8. Вычисляется R_1 по формулам (11), (12). Методом Монте-Карло рассчитывается ФРТ канала формирования дополнительной освещенности переотражением $p(r_w)$ в пределах радиуса R_1 .

9. Рассчитываются коэффициенты, входящие в систему (4), решается нелинейная система уравнений (4). Решением этой системы будут коэффициенты \tilde{r}_{surf} .

10. По формуле (6) производится учет второй и большей кратности переотражения и определяется искоемое значение r_{surf} .

Тестирование алгоритма коррекции выполнялось в [4]. Проведенные серии расчетов показали, с одной стороны, что используемые в расчетах

алгоритмы метода Монте-Карло дают результаты, согласующиеся с литературными данными, а с другой – что разработанный алгоритм, в отличие от других алгоритмов, в случае наличия резких перепадов коэффициента отражения и высокой мутности атмосферы позволяет восстанавливать коэффициенты отражения с достаточной точностью. Использование описанных выше приемов, как показывают тестовые расчеты [4], сокращает время расчета более чем в 6 раз.

Сравнение результатов на примере тестового участка земной поверхности

Следующим этапом тестирования алгоритма стало сравнение результатов расчетов предлагаемым алгоритмом, алгоритмом MOD09 [2] и алгоритмом однородной коррекции [10] для тестового участка земной поверхности. В качестве тестового был выбран участок западного побережья Африки с координатами $27,5\text{--}27,9^\circ$ с.ш. и $13,4\text{--}12,9^\circ$ з.д., время измерений 19 августа 2011 г. в 11:25. Этот участок был выбран потому, что примерно половину его занимают пустынные территории, а вторую половину – море. В качестве исходных данных для предлагаемого алгоритма и алгоритма однородной коррекции использовались данные MOD02 и MOD04 о распределении интенсивности в 3-м канале прибора MODIS (0,47 мкм) с пространственным разрешением 500 м и об АОТ, которая в данном случае почти не менялась и равнялась 0,307. Оптическая модель атмосферы для базового алгоритма и алгоритма однородной коррекции выбиралась среди континентальных тропических моделей безоблачного неба. Наиболее близкой по аэрозольной оптической толщине оказалась модель с $S_M = 24$ км. Результаты расчетов показали (рис. 4), что коэффициент корреляции значений, полученных предлагаемым алгоритмом и алгоритмом MOD09, равен 0,984 (рис. 4, з, слева), а коэффициент корреляции значений, полученных предлагаемым алгоритмом, со значениями, полученными алгоритмом однородной коррекции, равен 0,999 (рис. 4, з, справа).

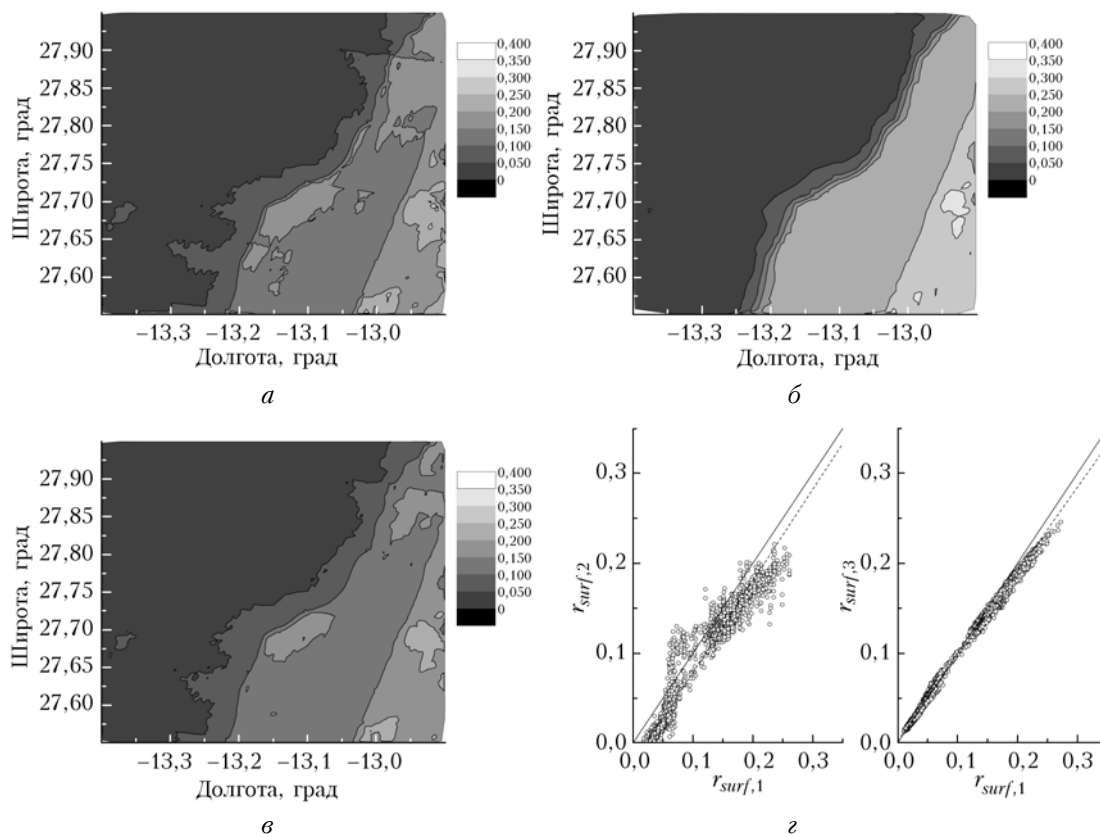


Рис. 4. Коэффициенты отражения рассматриваемого участка земной поверхности, полученные базовым алгоритмом ($r_{surf,1}$) (а); коэффициенты, полученные алгоритмом MOD09 ($r_{surf,2}$) (б); коэффициенты, полученные алгоритмом однородной коррекции ($r_{surf,3}$) (в); сравнение значений коэффициента отражения, полученного базовым алгоритмом $r_{surf,1}$, со значениями, полученными алгоритмом MOD09 $r_{surf,2}$ и алгоритмом однородной коррекции $r_{surf,3}$ (г)

Кроме того, значения, полученные алгоритмом MOD09, в среднем меньше значений, найденных предлагаемым алгоритмом, на величину 0,023. Это может быть связано с тем, что в расчетах применяются различные оптические модели. Сравнение с однородным алгоритмом показывает, что в данном случае можно использовать алгоритм однородной коррекции, что позволит получить результат с некоторой дополнительной погрешностью (максимальное отличие r_{surf} составляет 0,032), но потребует намного меньше времени (в 6–10 раз).

Заключение

Таким образом, сравнение результатов использования предлагаемого алгоритма с результатами расчета алгоритмом MOD09 для тестового участка показывает, что результаты предлагаемого алгоритма в среднем на 0,023 больше, но коэффициент корреляции равен 0,984. Причина различий может быть связана с различиями в оптической модели атмосферы. Сравнение с алгоритмом однородной коррекции показывает, что в данном случае в силу невысокой мутности атмосферы можно использовать алгоритм однородной коррекции.

В дальнейшем планируется произвести выбор оптимального с точки зрения машинного времени метода решения систем (2) и (4), а также экстраполяцию алгоритма на ситуации наличия облачности.

Авторы благодарят Н.В. Кабанову и Д.В. Соломатова за предоставленные спутниковые данные для тестового участка на земной поверхности.

Работа выполнена при поддержке и в рамках Государственного контракта 14.515.11.0030, гранта Президента РФ по поддержке ведущих научных школ НШ-4714.2014.5, гранта РФФИ № 14-01-00211_А и интеграционного проекта СО РАН № 131а.

1. 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.
2. Vermote E.F., Vermeulen A. Atmospheric correction algorithm: spectral reflectances (MOD09). Algorithm Theoretical Background document, version 4.0. 1999. [Электронный ресурс]: URL: http://modis.gsfc.nasa.gov/atbd/atbd_nod08.pdf
3. 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.
4. Белов В.В., Тарасенков М.В. О точности и быстроте действия RTM-алгоритмов атмосферной коррекции спутниковых изображений в видимом и УФ-диапазоне // Оптика атмосфер. и океана. 2013. Т. 26, № 7. С. 564–571.
5. Lenoble J. Modeling of the Influence of Snow Reflectance on Ultraviolet Irradiance for Cloudless Sky // Appl. Opt. 1998. V. 37. P. 2441–2447.

6. *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.
7. *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.
8. *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.
9. *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.
10. *Коженикова А.В., Тарасенков М.В., Белов В.В.* Параллельные вычисления при решении задачи восстановления коэффициента отражения земной поверхности по спутниковым данным // Оптика атмосфер. и океана. 2013. Т. 26, № 2. С. 172–174.

M.V. Tarasenkov, V.V. Belov. **Software package for reconstruction of reflective properties of the Earth surface in visible and UV ranges.**

A software package for reconstruction of the distribution of the Earth surface reflection coefficient is described together with procedures developed to decrease considerably the computation time. On an example of a test region in the western coast of Africa, the results obtained by the suggested algorithm, algorithm of homogeneous correction, and standard MOD09 NASA algorithm are compared. The coefficient of correlation of the results obtained for the given test region using the new algorithm and the algorithm of homogeneous correction is 0.999; it is 0.984 for the given algorithm and the MOD09 algorithm.