

## ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 528.85:535.51, 535.361

# Восстановление коэффициентов отражения земной поверхности по спутниковым измерениям MODIS с учетом поляризации излучения

М.В. Тарасенков, А.В. Зимовая, В.В. Белов, М.В. Энгель\*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 9.04.2019 г.

Рассматривается алгоритм восстановления коэффициентов отражения земной поверхности с учетом влияния поляризации излучения. Проводится апробация результатов работы алгоритма для пяти каналов прибора MODIS на трех участках: на юге Томской обл., в Московской и Иркутской обл. Для оценки погрешности алгоритма используются тестовые точки в центре хвойных лесных массивов в летний период года. Сопоставляются результаты предлагаемого алгоритма с учетом и без учета поляризации, алгоритма MOD09 и результаты без атмосферной коррекции с измерениями, принятыми за эталонные. Сравнение показывает, что средние значения результатов предлагаемого алгоритма с учетом влияния поляризации ближе к эталонным, чем алгоритма MOD09 NASA в 1-м (0,620–0,670 мкм), 3-м (0,459–0,479 мкм) и 4-м (0,545–0,565 мкм) каналах MODIS, отличие одного порядка наблюдается для 2-го канала MODIS (0,841–0,876 мкм). В 8-м канале MODIS (0,405–0,420 мкм) для одних ситуаций предпочтительнее один алгоритм, а для других другой.

*Ключевые слова:* атмосферная коррекция, коэффициент отражения земной поверхности, поляризация, метод Монте-Карло; atmospheric correction, Earth surface reflection coefficient, polarization, Monte Carlo method.

### Введение

У спутниковых данных очень широкий круг применения. Одной из ключевых величин, характеризующей состояние земной поверхности, является коэффициент отражения земной поверхности (или альbedo поверхности), который можно получить из данных спутниковых измерений. Данные интенсивности принимаемого спутниковым прибором излучения содержат в себе информацию не только о наблюдаемом пикселе на поверхности Земли, но и об излучении, рассеянном в атмосфере, а также об излучении, отраженном участками вне наблюдаемого пикселя. Поэтому необходимо выполнять атмосферную коррекцию спутниковых данных. Эта проблема решается на протяжении длительного времени [1–16]. В настоящий момент созданы и развиваются штатные алгоритмы для обработки измерений приборов MODIS [5], POLDER [11], MISR [13] и др. В этих алгоритмах коррекции приближенно оценивают влияние бокового подсвета и суммарную освещенность земной поверхности, чтобы ускорить получение результата. Однако в ситуациях большой мутности атмосферы, резкого изменения коэффициентов отражения, а также при наличии поверхностей

с существенным отражением влияние бокового подсвета и дополнительной освещенности земной поверхности существенно возрастает. Например, в [16, с. 233] указывается, что в ситуации высокой мутности атмосферы при наблюдении маленьких озер, окруженных растительностью, во 2-м канале прибора AVHRR (центр канала  $\lambda = 0,85$  мкм) нельзя пренебрегать ошибками, связанными с учетом бокового подсвета. Более того, в результатах алгоритмов коррекции могут присутствовать пиксели, для которых алгоритмы дают отрицательные значения коэффициентов отражения. Например, алгоритм MOD09 для 8-го канала MODIS (центр канала  $\lambda = 0,412$  мкм) в файле MYD09.A2012174.0610.006.2015246230245.hdf содержит до 14% подобных пикселей. Таким образом, существуют ситуации, требующие аккуратного учета влияния бокового подсвета и дополнительной освещенности отраженным излучением. Кроме того, в указанных алгоритмах часто используется осреднение результатов за несколько дней (например, [5]). Однако в случае необходимости восстановления коэффициента отражения участка земной поверхности за одно измерение и выполнения качественной атмосферной коррекции для как можно большего числа участков существующие подходы требуют модернизации. Для решения такой задачи в рамках работ [17, 18] в ИОА СО РАН предложен и развивается алгоритм восстановления коэффициентов отражения, строго учитывающий влияние бокового подсвета и неоднородности земной

\* Михаил Викторович Тарасенков (tmv@iao.ru); Анна Викторовна Зимовая (avk@iao.ru); Владимир Васильевич Белов (belov@iao.ru); Марина Владимировна Энгель (angel@iao.ru).

поверхности. Сравнение результатов коррекции с помощью этого алгоритма для данных MODIS с результатами алгоритма MOD09 NASA показывает, что в ряде каналов предлагаемый алгоритм обрабатывает снимки с меньшей погрешностью, чем алгоритм MOD09. Но встречаются ситуации и каналы, для которых погрешность алгоритма MOD09 несколько меньше или одного порядка с предлагаемым алгоритмом. Причина выбора данных MODIS для апробации алгоритма в том, что эти данные общедоступны и для них на протяжении длительного времени совершенствуется алгоритм MOD09.

В [17, 18] не учтен ряд факторов, являющихся источниками погрешности: рельеф поверхности, ее неламбертовость, поляризация излучения и влияние облачных полей на изображение безоблачных участков. Задача оценки влияния рельефа на погрешность восстановления отражательных свойств земной поверхности решалась в [19, 20], а учет неламбертовости анализировался в [5, 6, 10]. Эти факторы мы планируем рассмотреть в дальнейших работах. Исследование влияния облачных полей на безоблачные участки начато нами в [21].

Влияние поляризации оценивалось авторами [22–24] для решения прямой задачи переноса солнечного излучения в системе «атмосфера – земная поверхность». По оценкам этих авторов, поляризация может вносить погрешность до 10% в интенсивность принимаемого излучения. В наших работах [25, 26] было показано, что при восстановлении коэффициентов отражения некоторых поверхностей неучет поляризации может приводить к абсолютным погрешностям, превышающим значение восстанавливаемого коэффициента отражения. Следовательно, например, для участков, покрытых слабоотражающей растительностью, во многих случаях требуется учет влияния на результат поляризации излучения. Рассмотрим далее модифицированный алгоритм восстановления коэффициентов отражения с учетом поляризации излучения и его апробацию на примере снимков прибора MODIS.

## Постановка задачи и метод решения

На верхнюю границу атмосферы в направлении  $\omega_{\text{sun}}$  падает параллельный поток солнечного излучения. На некоторой высоте от поверхности Земли  $h_d$  расположена спутниковая сканирующая оптико-электронная система, которая формирует изображение участка земной поверхности в канале прибора с центром  $\lambda$  и шириной канала  $\Delta\lambda$  в направлении  $\omega_d$ . Интенсивность принимаемого спутниковой системой излучения считается известной. Атмосфера разделена на сферические слои, в каждом из которых заданы коэффициенты аэрозольного и молекулярного рассеяния и ослабления  $\sigma_{s,a}$ ,  $\sigma_{s,m}$ ,  $\sigma_{t,a}$ ,  $\sigma_{t,m}$ , а также матрицы аэрозольного и молекулярного рассеяния  $\mathbf{R}_{ij,a}$ ,  $\mathbf{R}_{ij,m}$ . Поверхность Земли неоднородна и отражает излучение по закону Ламберта. Требуется, зная интенсивности принимаемого излучения для всех наблюдаемых пикселей земной поверхности (т.е. ее яркостное изображение) и оптические пара-

метры атмосферы, восстановить коэффициенты отражения земной поверхности в канале прибора.

В качестве источника информации для получения аэрозольных оптических коэффициентов использованы наземные измерения сети станций AERONET [27], где в свободном доступе хранятся сведения об аэрозольной оптической толщине (АОТ), параметре Ангстрема, функции распределения частиц по размерам и о комплексном показателе преломления частиц аэрозоля в момент измерения. С использованием этих данных программой на основе алгоритма Борена–Хафмена [28] в монохроматическом приближении на длине волны  $\lambda$  восстанавливались средние по слою атмосферы индикатрисы и матрицы аэрозольного рассеяния. В предположении, что основная часть аэрозоля находится в нижнем 5-километровом слое, индикатрисы и матрицы рассеяния использовались для этого слоя атмосферы. Для слоев выше предполагалось, что влияние поляризации отсутствует, а индикатрисы аэрозольного рассеяния брались из моделей LOWTRAN-7 [29]. Среди этих моделей выбиралась оптическая модель с наиболее близкой АОТ на рассматриваемой  $\lambda$ , и вертикальный профиль аэрозольных оптических коэффициентов задавался в соответствии с этой моделью. Такой способ задания аэрозольной оптической модели обусловлен тем, что профиль аэрозольных параметров был неизвестен.

В качестве основы для получения профиля коэффициентов молекулярного рассеяния использовались спутниковые данные MODIS из продукта MOD07 (MYD07) [30] вертикальных профилей температуры и давления и данные коэффициентов молекулярного рассеяния воздуха на длине волны  $\lambda$  при нормальных условиях [31]. Матрица молекулярного рассеяния бралась из [32, с. 81]. Данные профилей молекулярного поглощения выбирались из моделей LOWTRAN-7 как средние в диапазоне длин волн от  $\lambda - \Delta\lambda$  до  $\lambda + \Delta\lambda$  без учета аппаратной функции прибора. Это обусловлено тем, что рассматриваемые в работе каналы MODIS находятся в диапазонах с небольшим молекулярным поглощением (например, [2, с. 15–17]).

В качестве исходных данных измерений интенсивности излучения, регистрируемой приемником, использовались яркостные изображения земной поверхности из продукта MOD021KM (MYD021KM) [30].

Определенные таким образом оптические коэффициенты, матрицы рассеяния и результаты измерения интенсивности принимаемого излучения являются входными параметрами для разработанного нами комплекса программ восстановления коэффициентов отражения земной поверхности. Этот комплекс строго учитывает интенсивности, формирующие принимаемый сигнал (рис. 1).

Блок-схема разработанного комплекса программ приведена на рис. 2.

Пошаговая процедура атмосферной коррекции сводится к следующему.

1. Определяется прямой коэффициент пропускания  $T_i$  трассы от наблюдаемого пикселя до приемной системы.

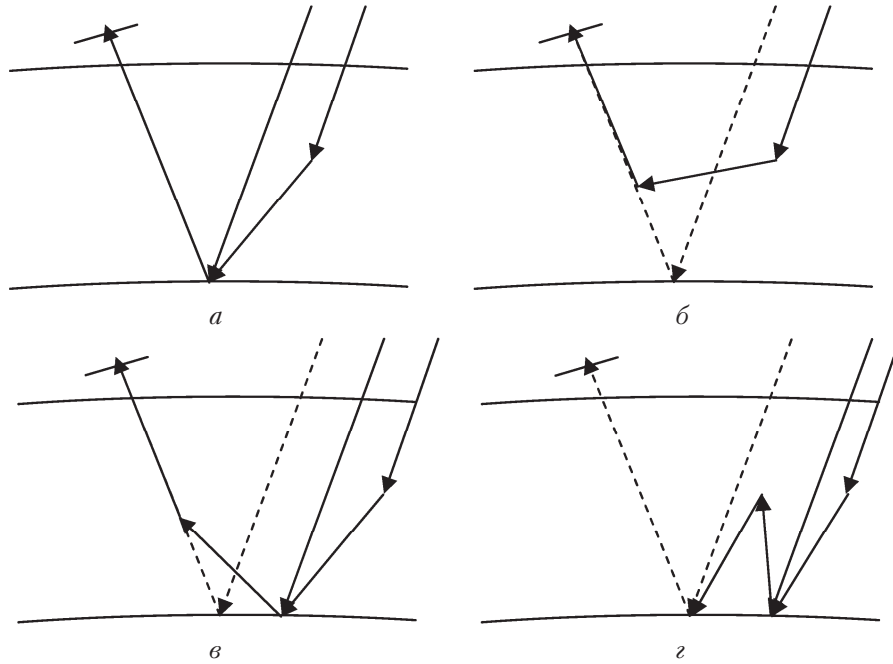


Рис. 1. Интенсивности, формирующие принимаемый спутниковой системой сигнал, и дополнительная освещенность земной поверхности, которые учитываются в предлагаемом алгоритме: *a* – нерассеянное излучение от наблюдаемого участка земной поверхности  $I_0$ ; *б* – излучение, рассеянное в атмосфере и не взаимодействовавшее с земной поверхностью  $I_{\text{sun}}$ ; *в* – излучение, отраженное соседними участками земной поверхности и далее рассеянное в атмосфере, или боковой подсвет  $I_{\text{surf}}$ ; *г* – дополнительная освещенность земной поверхности отраженным излучением  $E_1, E_2$  и т.д.

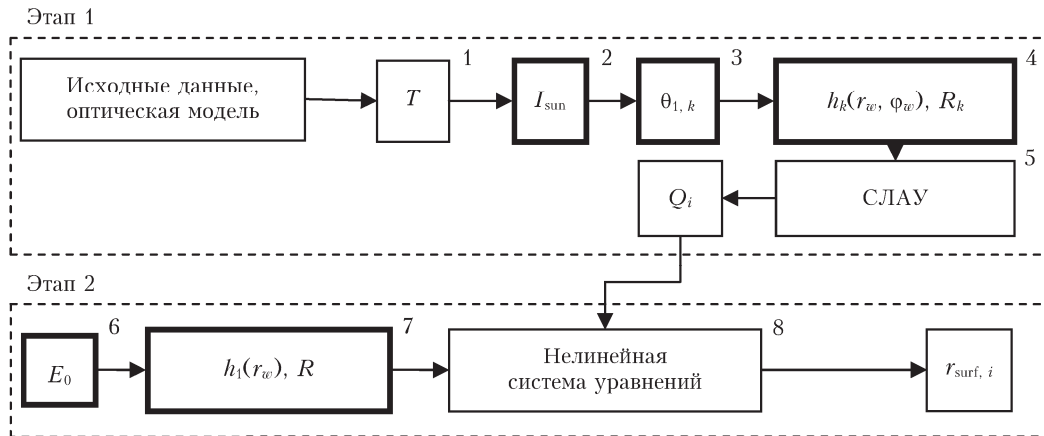


Рис. 2. Блок-схема комплекса программ. Полу жирным выделены блоки, в которых используются алгоритмы метода Монте-Карло

2. Методом Монте-Карло для зенитного угла Солнца, среднего по рассматриваемому участку  $\theta_{\text{sun}}$ , в монохроматическом приближении выполняется расчет интенсивности излучения  $I_{\text{sun}}$ , не взаимодействовавшего с земной поверхностью, с учетом поляризации излучения для направлений  $\theta_d = 0; 15; \dots; 75^\circ$  и  $\varphi = 0; 45; \dots; 180^\circ$  (30 направлений). Расчеты

для каждого направления в настоящий момент времени выполняются независимо. По этим результатам определяются приближенные значения  $I_{\text{sun}, i}$  по формуле (1) из [17, 33]:

$$I_{\text{sun}, i} = -\frac{B_i + \sqrt{B_i^2 - 4A_i C_{13}}}{2A_i \mu_{d,i}}, \quad (1)$$

$$A_i = \begin{cases} C_{11}\mu_{d,i}^2 + C_{21}(\sqrt{1-\mu_{d,i}^2} \cos \varphi_i)^2 + C_{22}\mu_{d,i}\sqrt{1-\mu_{d,i}^2} \cos \varphi_i - (\sqrt{1-\mu_{d,i}^2} \sin \varphi_i)^2, & \varphi_i \leq 90^\circ; \\ C_{11}\mu_{d,i}^2 + C_{31}(\sqrt{1-\mu_{d,i}^2} \cos \varphi_i)^2 + C_{32}\mu_{d,i}\sqrt{1-\mu_{d,i}^2} \cos \varphi_i - (\sqrt{1-\mu_{d,i}^2} \sin \varphi_i)^2, & \varphi_i > 90^\circ; \end{cases} \quad (2)$$

$$B_i = \begin{cases} C_{12}\mu_{d,i} + C_{23}\sqrt{1-\mu_{d,i}^2}\cos\varphi_i, & \varphi_i \leq 90^\circ; \\ C_{12}\mu_{d,i} + C_{33}\sqrt{1-\mu_{d,i}^2}\cos\varphi_i, & \varphi_i > 90^\circ; \end{cases} \quad (3)$$

где  $\mu_{d,i}$  – косинус зенитного угла приемника при наблюдении  $i$ -го пикселя;  $\varphi_i$  – азимут между направлениями на Солнце и на приемник в  $i$ -м пикселе;  $C_{11}, C_{12}, C_{13}, C_{21}, C_{22}, C_{23}, C_{31}, C_{32}, C_{33}$  – константы аппроксимации, определяемые методом наименьших квадратов (МНК) по узловым значениям  $I_{\text{sun}}$  для фиксированного  $\theta_{\text{sun}}$ .

Алгоритм расчета  $I_{\text{sun}}$  с учетом поляризации и его тестирование описаны в [25, 26].

3. Методом Монте-Карло вычисляются узловые значения интеграла функции размытия точки (ФРТ) канала формирования бокового подсвета  $I_{\text{dif}}$  для углов отклонения от направления в надир  $\theta_1 = 0; 15; \dots; 60^\circ$ . Исходя из этих результатов, определяются границы изопланарных зон  $\theta_{1,k}$  (области на земной поверхности, в пределах которых можно с заданной погрешностью  $\delta$  использовать одну и ту же ФРТ) по критерию [17, 18]:

$$\begin{cases} I_{\text{surf}}(\mu_k) = I_{\text{surf}}(1) - A(1 - \mu_k)^N, \\ \mu_{k+1} = 1 - \left[ \frac{1}{A} \left( I_{\text{surf}}(1) - \frac{I_{\text{surf}}(\mu_k)}{1 + \delta} \right) \right]^{1/N}; \end{cases} \quad (4)$$

$$\delta \equiv \frac{I_{\text{surf}}(\mu_k) - I_{\text{surf}}(\mu_{k+1})}{I_{\text{surf}}(\mu_{k+1})}, \quad (5)$$

$$I_{\text{surf}}(\mu) \equiv \frac{1}{\pi}T(\mu) + I_{\text{dif}} = \frac{1}{\pi}T(\mu) + \int_S h(\mu, r_w, \varphi_w) dS, \quad (6)$$

где  $\mu_k = \cos\theta_{1,k}$  задает границу между  $k$ -й и  $k+1$ -й изопланарными зонами;  $h(\mu, r_w, \varphi_w)$  – ФРТ канала формирования бокового подсвета (величина, характеризующая интенсивность рассеянного излучения, приходящего из точки с поверхностными координатами  $(r_w, \varphi_w)$  в приемную систему, наблюдающую пиксель в направлении  $\mu$  при единичной светимости земной поверхности);  $r_w$  – поверхностное расстояние от центра наблюдаемого пикселя на земной поверхности до точки на земной поверхности;  $\varphi_w$  – азимутальный угол на земной поверхности между направлением на проекцию приемной системы на земную поверхность и направлением на рассматриваемую точку из наблюдаемого пикселя;  $S$  – вся площадь земной поверхности;  $\delta$  – предельно допустимый уровень погрешности при использовании ФРТ, соответствующей  $\mu_k$ , вместо ФРТ, соответствующей  $\mu_{k+1}$  (в расчетах использовалась  $\delta = 0,05$ );  $A, N$  – константы аппроксимации, определяемые МНК;  $T(\mu)$  – прямое пропускание трассы от приемной системы до земной поверхности при ориентации линии визирования в направлении  $\mu$ .

4. Определяется радиус области бокового подсвета  $R_k$ , вне которого с заданной погрешностью  $\delta_1$  можно считать влияние бокового подсвета нулевым. Можно показать, что для выполнения для произвольной неоднородной поверхности условия

$$1 \geq \min_i \frac{Q_i}{\bar{Q}_i} \geq \delta_1, \quad (7)$$

где  $Q_i \equiv r_{\text{surf},i} E_{\text{sum},i}$  – некоторое точное значение светимости земной поверхности в  $i$ -м пикселе;  $\bar{Q}_i$  – приближенное значение светимости, которое получится, если считать, что вне  $R_k$  боковой подсвет отсутствует;  $\delta_1$  – величина, характеризующая максимальную погрешность, создаваемую использованием радиуса бокового подсвета (в расчетах  $\delta_1 = 0,95$ ), достаточно выполнения условия

$$\begin{aligned} f_1(R_k) &\equiv \frac{\iint_{S(R_k)} h(\mu_k, r_w, \varphi_w) dS}{\iint_S h(\mu_k, r_w, \varphi_w) dS} \geq \\ &\geq \delta_1 + (\delta_1 - 1) \frac{\frac{1}{\pi} T_k}{\iint_S h(\mu_k, r_w, \varphi_w) dS}, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $R_k$  – радиус бокового подсвета для  $k$ -й ФРТ, рассчитываемой для углов (4);  $T_k$  – прямое пропускание, соответствующее границе  $k$ -й изопланарной зоны;  $S(R_k)$  – площадь на земной поверхности в пределах радиуса  $R_k$ .

В [18] для рассматриваемых далее каналов MODIS, для  $0,1 \leq \text{AOT}_{0,55} \leq 5$ , произвольного неизвестного распределения коэффициентов отражения по земной поверхности и разнообразных ситуаций оценивались сверху значения  $R_k$ , для которых выполнено условие (8).  $R_k$  находится в пределах  $3 \leq R_k \leq 40$  км в зависимости от  $\lambda$ , AOT и расположения Солнца и приемной системы.

Для каждой из изопланарных зон  $k$  методом Монте-Карло вычисляется ФРТ канала формирования бокового подсвета  $h(\mu_k, r_w, \varphi_w)$  в пределах  $R_k$ . Функция  $h$  рассчитывается для  $r_w = 0; 0,25; \dots; 35; 35,5$  км;  $\dots; R_k$ ;  $\varphi_w = 0; 5; \dots; 180^\circ$ .

5. Методом Зейделя решается система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) для определения распределения светимости земной поверхности  $Q_i$  [18]:

$$I_{\text{sum},i} = I_{\text{sun},i} + \sum_{j=1}^{N_i} A_{i,j} Q_j + A_{\text{out},i} \bar{Q}_i, \quad i = \overline{1, N}, \quad (9)$$

$$A_{i,j} \approx \begin{cases} \frac{1}{\pi} T_i + h(\mu_{k_i}, 0, 0) S_i, & i = j, \\ h(\mu_{k_i}, r_{w,j}, \varphi_{w,j}) S_j, & i \neq j; \end{cases} \quad (10)$$

$$A_{\text{out},i} = I_{\text{dif}}(\mu_{k_i}) - \sum_{j=1}^{N_i} A_{i,j}, \quad (11)$$

$$\bar{Q}_i = \frac{I_{\text{sum},i} - I_{\text{sun},i}}{\frac{1}{\pi} T_i + I_{\text{dif}}(\mu_{d,i})}, \quad (12)$$

где  $I_{\text{sum},i}$  – интенсивность суммарного принимаемого спутниковой системой излучения;  $N$  – количество пикселей рассматриваемого участка;  $N_i$  – количество пикселей в пределах радиуса  $R_k$  от  $i$ -го пикселя;  $\mu_{k_i}$  – граница  $k$ -й изопланарной зоны, в которую попадает  $i$ -й пиксель;  $\bar{Q}_i$  – величина, приближенно оценивающая светимость поверхности вне рассматриваемой области;  $S_i$  – площадь  $i$ -го пикселя.



Решение системы уравнений (9) для всего рассматриваемого участка позволяет учесть влияние неоднородности земной поверхности.

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

7. Вычисляется радиус области формирования дополнительной освещенности однократно отраженным излучением  $R$ , вне которой можно считать дополнительную освещенность равной 0. Можно показать, что для выполнения для произвольной неоднородной поверхности условия

$$1 \geq \min_j \frac{r_{\text{surf},i}}{\tilde{r}_{\text{surf},i}} \geq \delta_2, \quad (13)$$

где  $r_{\text{surf},i}$  — некоторый коэффициент отражения  $i$ -го пикселя;  $\tilde{r}_{\text{surf},i}$  — приближенное значение коэффициента отражения, получаемое при использовании радиуса области формирования дополнительной освещенности;  $\delta_2$  — величина, характеризующая максимальную погрешность, создаваемую использованием радиуса формирования дополнительной освещенности (в расчетах  $\delta_2 = 0,95$ ), достаточно выполнения условия

$$f_2(R) \equiv \frac{\iint_{S(R)} h_1(r_w) dS}{\gamma_1} \geq \frac{\delta_2}{\gamma_1} ((\delta_2 - 1) + \delta_2 \gamma_1), \quad (14)$$

$$\gamma_1 = \iint_S h_1(r_w) dS, \quad (15)$$

где  $h_1(r_w)$  — значение ФРТ канала формирования дополнительной освещенности (величины, характеризующей освещенность точки поверхности отраженным излучением из точки поверхности, удаленной на расстоянии  $r_w$ , при единичной светимости земной поверхности).

В [18] для рассматриваемых далее каналов MODIS, для  $0,1 \leq \text{AOT}_{0,55} \leq 5$  и разнообразных ситуаций оценивались значения  $R$ , для которых выполнено условие (14).  $R$  лежит в пределах  $0 \leq R \leq 15$  км.

Методом Монте-Карло рассчитывается ФРТ канала формирования дополнительной освещенности земной поверхности отраженным в системе «атмосфера — земная поверхность» излучением  $h_1(r_w)$  в пределах радиуса  $R$ . Функция  $h_1$  рассчитывается для  $r_w = 0; 0,25$  км; ...;  $R$ .

8. Методом Ньютона с итерационным решением вспомогательных СЛАУ методом Зейделя решается нелинейная система уравнений относительно  $r_{\text{surf}}$  вида [18]:

$$\frac{Q_i}{E_0} = r_{\text{surf},i} \left( 1 + \sum_{j=1}^{M_j} C_{i,j} r_{\text{surf},j} + C_{\text{out},i} \overline{r_{\text{surf},i}} + \frac{(\overline{r_{\text{surf},i}} \gamma_1)^2}{1 - \overline{r_{\text{surf},i}} \gamma_1} \right), \quad (16)$$

$$C_{i,j} \approx h_1(r_{w,ij}) S_j, \quad (17)$$

$$C_{\text{out},i} = \gamma_1 - \sum_{j=1}^{M_j} C_{i,j}, \quad (18)$$

$$\overline{r_{\text{surf},i}} = \frac{\overline{Q_i}/E_0}{1 + \gamma_1 \overline{Q_i}/E_0}, \quad (19)$$

где  $r_{\text{surf},i}$  — коэффициент отражения  $i$ -го пикселя изображения;  $\overline{r_{\text{surf},i}}$  — коэффициент отражения  $i$ -го пикселя, полученный в приближении однородной поверхности;  $M_i$  — количество пикселей, попадающих в область радиуса  $R$  вокруг  $i$ -го пикселя.

Решение нелинейной системы (16) позволяет учесть влияние неоднородности земной поверхности на ее освещенность. Выполненный анализ показывает, что для ситуации  $\text{AOT}_{0,55} = 5$ ,  $r_{\text{surf}} \leq 0,4$  погрешность использования (16) не более 3%. Неучет влияния неоднородности поверхности при формировании дополнительной освещенности в этой ситуации приводит к погрешностям в пределах 19%. Для молекулярной атмосферы ( $\text{AOT}_{0,55} = 0$ ) и  $r_{\text{surf}} \leq 0,4$  погрешность использования (16) не превышает 1%, а однородного приближения — 10,6%.

Анализ условий сходимости систем уравнений (9) и (16) в работе [18] показывает, что система (9) сходится при любом размере пикселя при  $\text{AOT} \leq 1$ , а при разрешении в надире в 1 км — при  $\text{AOT} \leq 4$ . Система (16) сходится при всех рассмотренных в [18] ситуациях ( $0,1 \leq \text{AOT}_{0,55} \leq 5$ ).

## Апробация модернизированного алгоритма восстановления коэффициентов отражения земной поверхности

Для апробации и оценки погрешности алгоритма восстановления коэффициентов отражения с учетом влияния поляризации были рассмотрены снимки MODIS для трех тестовых участков (рис. 3): 1) участок юга Томской обл. ( $55,95$ – $56,85^\circ$  с.ш.,  $84,05$ – $84,95^\circ$  в.д.), 2) участок Московской обл. ( $55,72$ – $55,95^\circ$  с.ш.,  $37,56$ – $38,10^\circ$  в.д.); 3) участок Иркутской обл. ( $51,42$ – $52,67^\circ$  с.ш.,  $103,64$ – $105,47^\circ$  в.д.). Результаты предлагаемого алгоритма с учетом и без учета поляризации сопоставлялись с результатами алгоритма MOD09 и результатами, получаемыми без атмосферной коррекции.

Для оценки погрешностей алгоритмов рассматривались тестовые точки в центре хвойных лесных массивов. Погрешность алгоритмов оценивалась как отличие восстановленных коэффициентов от результатов измерений [34], приведенных в табл. 1.

Как показал анализ для трех тестовых точек на рассматриваемых участках, коэффициенты отражения в каналах MODIS с центрами  $\lambda = 0,412; 0,469; 0,555; 0,649$  мкм при отсутствии снега и малом содержании аэрозоля ( $\text{AOT}_{0,55} \leq 0,1$ ) слабо отличаются от наземных измерений из работы [34] (табл. 2). Следовательно, для этих каналов и участков данные [34] можно использовать как эталонные,



Рис. 3. Расположение рассматриваемых участков на земной поверхности, для которых выполнялась апробация алгоритма: а – Томская обл.; б – Московская обл.; в – Иркутская обл.

Таблица 1  
Значения коэффициентов отражения молодой хвои зрелой сосны в летний период года из [34]

$\lambda$ , мкм	0,412	0,469	0,555	0,649	0,860
$r_{\text{surf, meas}}(\lambda)$	0,021	0,026	0,050	0,038	0,310

а отличия от них приближенно оценивают погрешность алгоритмов.

Отличие коэффициентов отражения в канале MODIS с центром  $\lambda = 0,860$  мкм (табл. 2) от измерений [34] сильнее, потому что отражение в этом канале существенно зависит от состояния растительности (ее продуктивности). Поэтому в ряде ситуаций для этого канала данные [34] будут непригодны как эталонные. Например, для тестовой точки в Московской обл. указанные данные непригодны как эталон при  $\lambda = 0,860$  мкм.

Альтернативой рассматриваемому подходу могло быть сравнение коэффициентов отражения для участков с проведенными наземными измерениями. Но это позволит оценить погрешность только для областей, где есть такие измерения. Например, для России – это только единичные точки. Рассматри-

ваемый нами подход же применим для широкого набора участков земной поверхности.

#### Участок на юге Томской обл.

Тестовый участок располагался на юге Томской обл. ( $55,95\text{--}56,85^\circ$  с.ш.,  $84,05\text{--}84,95^\circ$  в.д.) (рис. 3, а). Обработывались семь снимков прибора MODIS, сделанные в период с 17 по 23 июня 2012 г. для пяти каналов: 1 (центр канала  $\lambda = 0,649$  мкм), 2 ( $\lambda = 0,860$  мкм), 3 ( $\lambda = 0,469$  мкм), 4 ( $\lambda = 0,555$  мкм) и 8 ( $\lambda = 0,412$  мкм), пространственное разрешение – 1000 м. АОТ определялась по данным станции AERONET Томск-22 ( $56,417^\circ$  с.ш.,  $84,074^\circ$  в.д.) [27]. В рассматриваемые дни АОТ<sub>0,55</sub> находилась в пределах от 0,1 до 1,52.

На тестовом участке была выбрана точка на территории Томского государственного природного заказника с координатами  $56,2^\circ$  с.ш.,  $84,3^\circ$  в.д. Коэффициенты отражения для этой точки, полученные предлагаемым алгоритмом с учетом и без учета поляризации, алгоритмом без коррекции и алгоритмом MOD09, сравнивались с наземными измерениями из [34]. Для каждого канала, семи снимков

Таблица 2  
Отличие коэффициентов отражения, восстановленных предлагаемым алгоритмом и алгоритмом MOD09, для тестовой точки в день с низкой АОТ

№ участка	Координаты тестовой точки	Дата	АОТ <sub>0,55</sub>	Абсолютное отличие от [34]						
				$\lambda$ , мкм						
				0,412	0,469	0,555	0,649	0,86		
<i>MOD09</i>										
1	$56,2^\circ$ с.ш., $84,3^\circ$ в.д.	22.06.12	0,103	0,006	0,010	0,002	0,011	0,037		
2	$58,85^\circ$ с.ш., $37,83^\circ$ в.д.	06.05.17	0,044	0,004	0,003	0,007	0,001	0,145		
3	$52,52^\circ$ с.ш., $105,06^\circ$ в.д.	21.06.17	0,037	0,012	0,006	0,011	0,002	0,044		
<i>Алгоритм с учетом поляризации</i>										
1	$56,2^\circ$ с.ш., $84,3^\circ$ в.д.	22.06.12	0,103	0,013	0,001	0,007	0,005	0,059		
2	$58,85^\circ$ с.ш., $37,83^\circ$ в.д.	06.05.17	0,044	0,014	0,005	0,007	0,007	0,139		
3	$52,52^\circ$ с.ш., $105,06^\circ$ в.д.	21.06.17	0,037	0,021	0,008	0,015	0,012	0,046		

и рассматриваемой точки определялось среднее отличие от эталонного значения:

$$\Delta r_{\text{surf}}(\lambda) = |r_{\text{surf,alg}}(\lambda) - r_{\text{surf,meas}}(\lambda)|, \quad (20)$$

где  $r_{\text{surf,alg}}(\lambda)$  – коэффициент отражения тестового участка на длине волны  $\lambda$ , восстановленный соответствующим алгоритмом из спутниковых данных;  $r_{\text{surf,meas}}(\lambda)$  – наземное измерение коэффициента отражения на длине волны  $\lambda$  из [34].

Полученные средние значения  $\Delta r_{\text{surf}}$  приведены на рис. 4.

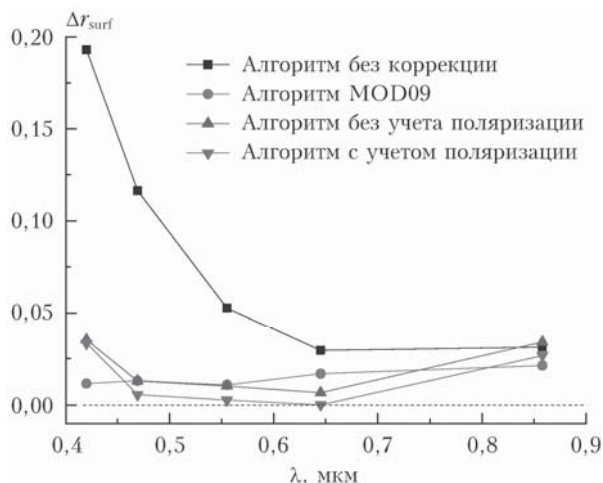


Рис. 4. Сравнение средних по семи снимкам значений  $\Delta r_{\text{surf}}$  для тестовой точки № 1

Сравнение  $\Delta r_{\text{surf}}$  предлагаемого алгоритма с  $\Delta r_{\text{surf}}$  алгоритма MOD09 показывает, что предлагаемый алгоритм с учетом поляризации для рассматриваемых тестовых снимков имеет заметно меньшие отличия от эталонных значений для каналов с центрами  $\lambda = 0,649; 0,469; 0,555$  мкм и почти одинаковые отличия для  $\lambda = 0,860$  мкм по сравнению с алгоритмом MOD09 NASA. Однако на  $\lambda = 0,412$  мкм значения, полученные алгоритмом MOD09, ближе к результатам [34].

### Участок в Московской обл.

Тестовый участок находился в северо-восточной части г. Москвы с координатами:  $55,72^{\circ}$ – $55,95^{\circ}$  с.ш.,  $37,56^{\circ}$ – $38,10^{\circ}$  в.д. (рис. 3, б).

Рассматривалось пять снимков, сделанные с 6 по 7 мая 2017 г. Коррекция выполнялась для тех же пяти каналов прибора MODIS, что и для Томской обл., молекулярное и аэрозольное поглощение и рассеяние выбирались по описанному выше алгоритму. Станция AERONET Moscow располагается в точке с координатами  $55,707^{\circ}$  с.ш.,  $37,522^{\circ}$  в.д. В рассматриваемые дни АОТ<sub>0,55</sub> находилась в пределах от 0,04 до 0,07.

На тестовом участке была выбрана точка в Национальном парке «Лосинный остров» с координатами  $58,85^{\circ}$  с.ш.,  $37,83^{\circ}$  в.д. Сравнение средних для

этой точки и пяти снимков значений  $\Delta r_{\text{surf}}$  представлено на рис. 5.

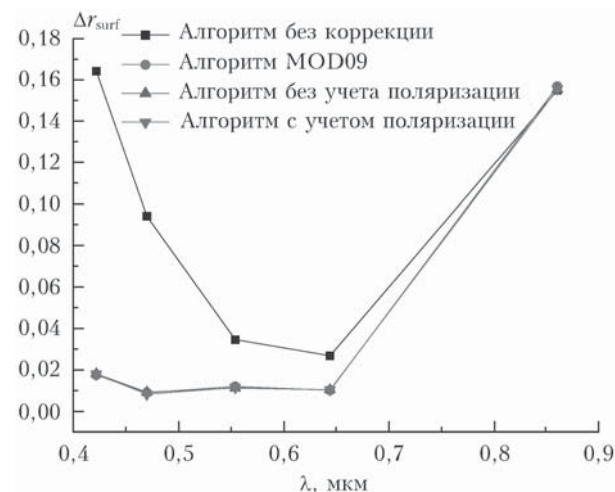


Рис. 5. Сравнение средних по пяти снимкам значений  $\Delta r_{\text{surf}}$  для тестовой точки № 2

На рис. 5 видно, что результаты восстановления коэффициентов отражения поверхности Земли практически не отличаются от эталонных значений, полученных рассмотренными алгоритмами (за исключением алгоритма без атмосферной коррекции) для данного случая. При  $\lambda = 0,860$  мкм здесь наблюдается существенно большее отличие от [34]. Причина этого, исходя из табл. 2, в том, что данные [34] отличаются от реального значения коэффициента отражения в этом канале и не подходят для рассматриваемой ситуации как эталон.

### Участок в Иркутской обл.

Рассматривался участок вблизи оз. Байкал с координатами:  $51,42^{\circ}$ – $52,67^{\circ}$  с.ш. и  $103,64^{\circ}$ – $105,47^{\circ}$  в.д. (рис. 3, в).

Обработывалось четыре снимка за период с 20 по 21 июня 2017 г. Коррекция выполнялась для тех же пяти каналов прибора MODIS, что и для предыдущих участков, молекулярное и аэрозольное поглощение и рассеяние выбирались аналогично. Станция AERONET Irkutsk расположена в координатах  $51,800^{\circ}$  с.ш.,  $103,087^{\circ}$  в.д. В рассматриваемые дни АОТ<sub>0,55</sub> находилась в пределах от 0,04 до 0,06.

На тестовом участке была выбрана точка в государственном природном заказнике «Красный Яр» с координатами  $52,52^{\circ}$  с.ш.,  $105,06^{\circ}$  в.д. Сравнение значений  $\Delta r_{\text{surf}}$  для этой точки, среднее по четырем снимкам, представлено на рис. 6.

Сравнение результатов показывает, что предлагаемый алгоритм с учетом поляризации для рассматриваемых тестовых снимков имеет несколько меньшие отличия от эталонных значений для  $\lambda = 0,469; 0,555; 0,412$  мкм, чем MOD09, и почти одинаковые отличия для  $\lambda = 0,860; 0,649$  мкм.

Значения средних по рассматриваемым снимкам  $\Delta r_{\text{surf}}$  для всех рассмотренных участков и алгоритмов собраны в табл. 3.

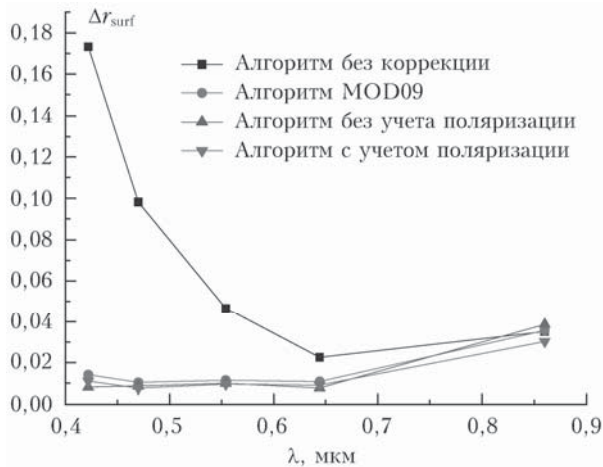


Рис. 6. Сравнение средних по четырем снимкам значений  $\Delta r_{\text{surf}}$  для тестовой точки № 3

Т а б л и ц а 3

Среднее отличие  $\Delta r_{\text{surf}}$  от наземных измерений [34]

Номер участка	$\lambda$ , мкм	$\Delta r_{\text{surf}}$ , алгоритм без коррекции	$\Delta r_{\text{surf}}$ , алгоритм MOD09	$\Delta r_{\text{surf}}$ , алгоритм без учета поляризации	$\Delta r_{\text{surf}}$ , алгоритм с учетом поляризации
1	0,412	0,193	0,012	0,035	0,033
	0,469	0,116	0,013	0,013	0,006
	0,555	0,053	0,011	0,010	0,003
	0,649	0,030	0,017	0,007	3,0E-5
	0,860	0,031	0,021	0,034	0,027
2	0,412	0,164	0,017	0,018	0,018
	0,469	0,094	0,009	0,009	0,008
	0,555	0,035	0,012	0,011	0,011
	0,649	0,027	0,010	0,010	0,010
	0,860	0,155	0,157	0,155	0,156
3	0,412	0,173	0,014	0,008	0,011
	0,469	0,098	0,010	0,009	0,008
	0,555	0,047	0,012	0,010	0,010
	0,649	0,023	0,011	0,008	0,010
	0,860	0,035	0,036	0,036	0,030

### Заключение

Апробация модифицированного алгоритма с учетом поляризации излучения показывает, что его использование позволяет существенно снизить погрешность восстановления коэффициентов отражения земной поверхности.

Сравнение с алгоритмом MOD09 показывает, что предложенный алгоритм дает погрешности восстановления  $r_{\text{surf}}$  существенно ниже, чем алгоритм MOD09 NASA на  $\lambda = 0,469$ ;  $0,555$ ;  $0,649$  мкм, и одного порядка — на  $\lambda = 0,860$  мкм. На  $\lambda = 0,412$  мкм для одних ситуаций погрешности восстановления  $r_{\text{surf}}$  меньше при использовании алгоритма MOD09, для других предпочтительнее алгоритм, предложенный в настоящей работе, а для третьих алгоритмы приводят к погрешностям одного порядка.

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. Vermote E.F., Vermeulen A. Atmospheric correction algorithm: Spectral reflectances (MOD09). Algorithm Theoretical Background document, version 4.0. 1999. [Electronic resource]. URL: [http://modis.gsfc.nasa.gov/atbd/atbd\\_nod08.pdf](http://modis.gsfc.nasa.gov/atbd/atbd_nod08.pdf) (last access: 9.03.2019).
3. Putsay M. A simple atmospheric correction method for the short wave satellite images // Int. J. Remote Sens. 1992. V. 13, N 8. P. 1549–1558.
4. 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.
5. Breon F.M., Vermote E. Correction of MODIS surface reflectance time series for BRDF effects // Remote Sens. Environ. 2012. V. 125. P. 1–9.
6. Lyapustin A., Martonchik J., Wang Y., Laszlo I., Korokin S. Multiangle implementation of atmospheric correction (MAIAC): 3. Atmospheric correction // Remote Sens. Environ. 2012. V. 127. P. 385–393.
7. Vermote E.F., Saleous N.El., Justice C.O., Kaufman Y.J., Privette J.L., Remer L., Roger J.C., Tanré D. Atmospheric correction of visible to middle-infrared EOS-MODIS data over land surfaces: Background, operational algorithm and validation // J. Geophys. Res. D. 1997. V. 102, N 14. P. 17,131–17,141.
8. Tanré D., Holben B.N., Kaufman Y.J. Atmospheric Correction Algorithm for NOAA-AVHRR Products: Theory and Application // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1992. V. 30, N 2. P. 231–248.
9. Diner D.J., Martonchik J.V. Atmospheric Transfer of Radiation above an Inhomogeneous Non-Lambertian Reflective Ground. 1. Theory // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 1984. V. 31, N 2. P. 97–125.
10. Lee T.Y., Kaufman Y.J. Non-Lambertian Effects on Remote-Sensing of Surface Reflectance and Vegetation Index // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1986. V. 24, N 5. P. 699–708.
11. Leroy M., Deuzé J., Bréon F., Hautecoeur O., Herman M., Buriez J., Tanré D., Bouffies S., Chazette P., Roujean J. Retrieval of atmospheric properties and surface bidirectional reflectances over land from POLDER/ADEOS // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. P. 17023–17037.
12. Roujean J.-L., Tanré D., Breon F.-M., Deuze J.-L. Retrieval of land surface parameters from airborne POLDER bidirectional reflectance distribution function during HAPEX-Sahel // J. Geophys. Res.: Atmos. D. 1997. V. 102, N 10. P. 11201–11218.
13. Diner D.J., Martonchik J.V., Borel C., Gerstl S.A.W., Gordon H.R., Knyazikhin Y., Myneni R., Pinty B., Verstraete M. Multi-Angle Imaging Spectro-Radiometer Level 2 Surface Retrieval Algorithm Theoretical Basis. Jet Propulsion Laboratory: La Canada Flintridge, CA, USA, 2008.
14. Катковский Л.В. Параметризация уходящего излучения для быстрой атмосферной коррекции гиперспектральных изображений // Оптика атмосфер. и океана. 2016. Т. 29, № 9. С. 778–784.
15. Лысенко С.А. Атмосферная коррекция многоспектральных спутниковых снимков на основе аппроксимационной модели переноса солнечного излучения // Оптика атмосфер. и океана. 2017. Т. 30, № 9. С. 775–788; Lisenko S.A. Atmospheric correction of multispectral satellite images based on the solar radiation transfer approximation model // Atmos. Ocean. Opt. 2018. V. 31, N 1. P. 72–85.



16. *Tanré D., Holben B.N., Kaufman Y.J.* Atmospheric correction algorithm for NOAA-AVHRR products: Theory and application // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1992. V. 30, N 2. P. 231–248.
17. *Tarasenkov M.B., Belov V.V.* Комплекс программ восстановления отражательных свойств земной поверхности в видимом и УФ-диапазонах // *Оптика атмосфер. и океана.* 2014. Т. 27, № 7. С. 622–627; *Tarasenkov M.V., Belov V.V.* Software package for reconstructing reflective properties of the Earth's surface in the visible and UV ranges // *Atmos. Ocean. Opt.* 2015. V. 28, N 1. P. 89–94.
18. *Tarasenkov M.V., Belov V.V., Engel M.V.* Algorithm for reconstruction of the Earth surface reflectance from Modis satellite measurements in a turbid atmosphere // *Proc. SPIE.* 2018. V. 10833. CID: 10833 16 [10833-58].
19. *Yin Gaofei, Li Ainong, Wu Shengbiao, Fan Weiliang, Zeng Yelu, Yan Kai, Xu Baodong, Li Jing, Liu Qinhuo.* PLC: A simple and semi-physical topographic correction method for vegetation canopies based on path length correction // *Remote Sens. Environ.* 2018. V. 215. P. 184–198.
20. *Егоров В.А., Барталев С.А.* Метод радиометрической коррекции искажений отражательных характеристик земного покрова в данных спутниковых измерений, вызванных влиянием рельефа местности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13, № 5. С. 192–201.
21. *Tarasenkov M.B., Kirnos I.V., Belov V.V.* Наблюдение земной поверхности из космоса через просвет в облачном поле // *Оптика атмосфер. и океана.* 2016. Т. 29, № 9. С. 767–771; *Tarasenkov M.V., Kirnos I.V., Belov V.V.* Observation of the Earth's surface from the space through a gap in a cloud field // *Atmos. Ocean. Opt.* 2017. V. 30, N 1. P. 39–43.
22. *Гермогенова Т.А.* О влиянии поляризации на распределение интенсивности рассеянного излучения // *Изв. АН СССР. Сер. геофиз.* 1962. № 6. С. 854–856.
23. *Сушкевич Т.А.* Математические модели переноса излучения. М.: БИНОН. Лаборатория знаний, 2005. 661 с.
24. *Назаралиев М.А.* Статистическое моделирование радиационных процессов в атмосфере. М.: Наука, 1990. 227 с.
25. *Зимовая А.В., Тарасенков М.В., Белов В.В.* Влияние поляризации излучения на восстановление коэффициента отражения земной поверхности по спутниковым данным в видимом диапазоне длин волн // *Оптика атмосфер. и океана.* 2017. Т. 30, № 11. С. 927–932; *Zimovaya A.V., Tarasenkov M.V., Belov V.V.* Radiation polarization effect on the retrieval of the Earth's surface reflection coefficient from satellite data in the visible wavelength range // *Atmos. Ocean. Opt.* 2018. V. 31, N 2. P. 131–136.
26. *Zimovaya A.V., Tarasenkov M.V., Belov V.V.* Effect of radiation polarization on reconstruction of the earth's surface reflection coefficient from satellite data in the visible wavelength range // *Proc. SPIE.* 2017. V. 10466. CID: 10466 10 [10466-54].
27. *Aerosol Robotic Network (AERONET).* URL: <http://aeronet.gsfc.nasa.gov> (last access: 9.03.2019).
28. *Борен К., Хафмен Д.* Поглощение и рассеяние света малыми частицами. М.: Мир, 1986. 664 с.
29. *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.
30. *URL:* [https://lpdaac.usgs.gov/data\\_access](https://lpdaac.usgs.gov/data_access) (last access: 9.03.2019).
31. *Bucholtz A.* Rayleigh-scattering calculations for the terrestrial atmosphere // *Appl. Opt.* 1995. V. 34, N 15. P. 2765–2773.
32. *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.
33. *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.
34. *Кринов Е.Л.* Спектральная отражательная способность природных образований. Л.: Изд-во АН СССР, 1947. 271 с.

*M.V. Tarasenkov, A.V. Zimovaya, V.V. Belov, M.V. Engel.* **Reconstruction of the Earth surface reflection coefficients from MODIS satellite measurements with allowance for radiation polarization.**

The algorithm of reconstruction of the Earth surface reflection coefficients with allowance for radiation polarization is considered. The algorithm was approved for 5 channels of the MODIS device and three territories: south of the Tomsk region, Moscow region, and Irkutsk region. To estimate the error of the algorithm, test points in the center of coniferous large forest areas in summer season were used. Results obtained using the MOD09 algorithm with and without allowance for radiation polarization and results obtained without atmospheric correction are compared with measurement data considered to be reference ones. The comparison demonstrates that the average values obtained by the suggested algorithm with allowance for polarization are closer to the reference data than those obtained using the MOD09 NASA algorithm in the first, third, and fourth MODIS channels, and the difference on the same order of magnitude is observed in the second MODIS channel. In the eighth MODIS channel, one algorithm is preferable in some situations, and another algorithm is preferable in other situations.