

УДК 51-73

Исследование точности алгоритма восстановления альbedo поверхности с высоким пространственным разрешением по фрагменту спутникового изображения

О.В. Николаева*

*Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН
125047, г. Москва, Миусская пл., 4*

Поступила в редакцию 19.05.2016 г.

Представлен экономичный алгоритм восстановления альbedo пространственно неоднородной ламбертовой поверхности по значениям коэффициента яркости солнечного излучения, отраженного от системы «атмосфера – подстилающая поверхность». Алгоритм опирается на представление коэффициента яркости в задаче с произвольным альbedo поверхности через коэффициенты яркости в задачах для той же атмосферы с модельными подстилающими поверхностями. Приведены результаты решения модельных задач, демонстрирующие возможность использования алгоритма при обработке данных высокого пространственного разрешения (до 15 м).

Ключевые слова: атмосферная коррекция, коэффициент яркости, высокое пространственное разрешение; atmospheric correction, reflectance, high spatial resolution.

Введение

Современная аппаратура позволяет выполнять измерения интенсивности отраженного атмосферой излучения с высоким пространственным разрешением. Если для MODIS, MISR и MERIS пространственное разрешение составляет 250; 275 и 300 м соответственно, то для ASTER оно достигает 15 м в диапазоне 0,52–0,86 мкм, 30 м в диапазоне 1,6–2,43 мкм, 90 м в диапазоне 8,125–11,65 мкм. Для Landsat 8 было достигнуто разрешение 15; 30 и 100 м для диапазонов 0,5–0,68; 0,433–1,39 и 10,6–12,5 мкм соответственно.

Однако восстановление альbedo подстилающей поверхности при очень высоком пространственном разрешении (меньше 30 м) приводит к погрешностям, большим, чем неопределенности в аэрозольных моделях [1]. Причиной этого является большая погрешность используемых в алгоритме восстановления приближенных формул, связывающих альbedo поверхности и коэффициент яркости отраженного излучения [1]. Ошибка этих формул становится существенной при не слишком прозрачной атмосфере. В частности, при обработке данных MODIS восстановление альbedo поверхности выполняется с оптической толщиной атмосферы $\tau_{0,55 \text{ мкм}} < 0,2$ [2].

Дополнительную погрешность в восстановленном альbedo вносит приближенный учет отражения излучения от соседних пикселей [3, 4]. Формула для радиуса окрестности, влияющей на значение восстановленного альbedo в данном пикселе, получена в [5].

Также погрешность в альbedo вносит предположение о ламбертовости подстилающей поверхности. Алгоритм восстановления альbedo неламбертовой поверхности рассмотрен в [3, 6]. Такой алгоритм опирается на малопараметрическую модель функции отражения поверхности [7], связывающую направления падающего на поверхность и отраженного от нее излучения. Повышение точности восстановления альbedo достигается использованием многократных измерений над одним и тем же участком поверхности [6, 8].

В работе [9] была рассмотрена задача восстановления альbedo ламбертовой поверхности. В представленном алгоритме формулы, связывающие альbedo поверхности и коэффициент яркости, получены без введения ограничений на оптическую толщину атмосферы и точно учитывают границы между пикселями. Алгоритм опирается на представление коэффициента яркости в задаче с произвольным альbedo поверхности с помощью базовых функций. В качестве базовых функций выбираются коэффициенты яркости в задачах для той же атмосферы с модельными подстилающими поверхностями. Модельными являются черная (поглощающая все падающее на нее излучение) поверхность и поверхности с одним белым (отражающим все падающее на него излучение) и остальными черными пикселями. Число базовых функций на единицу превышает число используемых пикселей.

Также в [9] приведены результаты исследования погрешностей алгоритма восстановления альbedo поверхности в зависимости от ошибок в задании оптических параметров атмосферы, в том числе облачной. В настоящей статье рассматривается вопрос о влиянии на точность этого алгоритма погрешности

* Ольга Васильевна Николаева (nika@kiam.ru).

задания граничных условий для модельных задач при условии, что параметры атмосферы известны.

Действительно, граничные условия определяют интенсивность излучения, входящего в область атмосферы над рассматриваемым участком земной поверхности. Эта интенсивность неизвестна. Поэтому приходится применять алгоритм восстановления в расширенной области с нулевыми граничными условиями и считать восстановленными альbedo только в пикселях, достаточно удаленных от границ. Здесь возникает вопрос о том, каков должен быть размер расширенной области, чтобы влияние граничных условий на альbedo, найденное для расположенного в центре этой области пикселя, было несущественным.

Кроме того, если размер расширенной области велик, то при высоком пространственном разрешении число пикселей также велико. Поэтому велико и число базовых функций. Тем самым алгоритм становится вычислительно затратным.

В настоящей статье предложен модифицированный алгоритм, позволяющий оперативно выполнять восстановление альbedo поверхности при высоком пространственном разрешении. При модификации использован тот факт, что форма и размер пикселей в рассматриваемом алгоритме [9] необязательно должны быть одинаковыми.

Модифицированный алгоритм представлен в разд. 1. В разд. 2 приведены результаты решения с помощью этого алгоритма модельных задач, позволяющие оценить точность алгоритма в зависимости от оптической толщины атмосферы, пространственного разрешения и вариаций искомого альbedo поверхности.

1. Алгоритм определения альbedo поверхности

Рассмотрим задачу переноса монохроматического излучения в трехмерной области:

$$\begin{aligned} \hat{T}^{3D}I &= \mu \frac{\partial I}{\partial z} + \xi \frac{\partial I}{\partial x} + \eta \frac{\partial I}{\partial y} + k(x, y, z)I(x, y, z, \mu, \varphi) - \\ &- k_s(x, y, z) \frac{1}{4\pi} \int_0^1 d\mu' \int_0^{2\pi} d\varphi' P(x, y, z, \gamma_s) \times \\ &\times I(x, y, z, \mu', \varphi') d\mu' d\varphi' = 0, \quad (1) \\ 0 &< x < X, \quad 0 < y < Y, \quad 0 < z < H, \\ -1 &< \mu < 1, \quad 0 < \varphi < 2\pi, \\ \xi &= \sin\theta \cos\varphi, \quad \eta = \sin\theta \sin\varphi, \quad \mu = \cos\theta, \\ \gamma_s &= \mu\mu' + \sqrt{1-\mu^2} \sqrt{1-(\mu')^2} \cos(\varphi - \varphi'). \end{aligned}$$

Здесь решение $I(x, y, z, \mu, \varphi)$ — интенсивность излучения в пространственной точке с координатами (x, y, z) в направлении $(\mu = \cos\theta, \varphi)$. Коэффициент экстинкции $k(x, y, z)$, коэффициент рассеяния $k_s(x, y, z)$ и индикатриса рассеяния $P(x, y, z, \gamma_s)$ в общем случае зависят как от высоты z , так и от горизонтальных координат x, y .

На верхней границе трехмерной области $0 < x < X, 0 < y < Y, 0 < z < H$ задано условие падающего параллельного потока излучения

$$I(x, y, 0, \mu, \varphi) = I_0 \delta(\mu - \mu_0) \delta(\varphi - \varphi_0) \quad (2)$$

при $\mu > 0, 0 < x < X, 0 < y < Y$.

Здесь величина I_0 — интенсивность внеатмосферного излучения. Поскольку сферичность атмосферы в уравнении (1) не учитывается, должно быть выполнено ограничение на зенитный угол Солнца $\theta_0 = \arccos \mu_0 < 60^\circ$.

На нижней границе $z = H$ зададим отражение от поверхности по закону Ламберта

$$I(x, y, H, \mu, \varphi) = A^{surface}(x, y) \frac{1}{\pi} \int_0^1 d\mu' \mu' \int_0^{2\pi} d\varphi' I(x, y, H, \mu', \varphi') \quad (3)$$

при $\mu < 0, 0 < x < X, 0 < y < Y$.

Здесь $A^{surface}(x, y)$ — альbedo подстилающей поверхности $0 < x < X, 0 < y < Y$ в точке (x, y) .

Будем предполагать, что поверхность разбита на непересекающиеся пиксели U_i . В пределах каждого пикселя альbedo поверхности зададим не зависящим от координат (x, y) :

$$A^{surface}(x, y) \Big|_{(x, y) \in U_i} = A_i^{surface} = \frac{1}{|U_i|} \iint_{U_i} dx dy A^{surface}(x, y). \quad (4)$$

Здесь $|U_i|$ — площадь i -го пикселя.

Краевые условия на боковых границах $x = 0, x = X, y = 0, y = Y$ имеют вид

$$I(0, y, z, \mu, \varphi) = \eta_L(y, z, \mu, \varphi) \quad (5)$$

при $\xi > 0, 0 < y < Y, 0 < z < H$,

$$I(X, y, z, \mu, \varphi) = \eta_R(y, z, \mu, \varphi) \quad (6)$$

при $\xi < 0, 0 < y < Y, 0 < z < H$,

$$I(x, 0, z, \mu, \varphi) = \eta_I(x, z, \mu, \varphi) \quad (7)$$

при $\eta > 0, 0 < x < X, 0 < z < H$,

$$I(x, Y, z, \mu, \varphi) = \eta_O(x, z, \mu, \varphi) \quad (8)$$

при $\eta < 0, 0 < x < X, 0 < z < H$.

Здесь $\eta_L(y, z, \mu, \varphi), \eta_R(y, z, \mu, \varphi), \eta_I(x, z, \mu, \varphi), \eta_O(x, z, \mu, \varphi)$ — граничные источники.

В качестве решения задачи (1)–(8) будем рассматривать средние по каждому пикселю значения коэффициента яркости

$$R_i = \frac{1}{|U_i|} \frac{\pi}{\mu_0 I_0} \iint_{U_i} dx dy I(x, y, 0, \tilde{\mu}, \tilde{\varphi}), \quad (9)$$

где $(\tilde{\mu}, \tilde{\varphi})$ — направление отраженного излучения.

Для определения альbedo поверхности $A_i^{surface}$ по значениям коэффициента яркости R_i вводятся базовые функции как решения следующих задач.

Задача с черной поверхностью:

$$\hat{T}^{3D}I^b = 0, \quad I^b(x, y, H, \mu, \varphi) = 0 \quad \text{при } \mu < 0, \quad (10)$$

$$I^b(x, y, 0, \mu, \varphi) = I_0 \delta(\mu - \mu_0) \delta(\varphi - \varphi_0) \quad \text{при } \mu > 0.$$

Задачи с поверхностью, состоящей из одного белого и остальных черных пикселей:

$$\hat{T}^{3D}I_j^w = 0, \quad I_j^w(x, y, 0, \mu, \varphi) = I_0 \delta(\mu - \mu_0) \delta(\varphi - \varphi_0) \quad \text{при } \mu > 0, \quad (11)$$

$$I_j^w(x, y, H, \mu, \varphi) =$$

$$= a_j(x, y) \frac{1}{\pi} \int_0^1 d\mu' \mu' \int_0^{2\pi} d\varphi' I_j^w(x, y, H, \mu', \varphi')$$

при $\mu < 0$,

$$a_j(x, y) = 0 \quad \text{при } (x, y) \notin U_j,$$

$$a_j(x, y) = 1 \quad \text{при } (x, y) \in U_j.$$

На боковых границах используются краевые условия (5)–(8).

Тогда альbedo поверхности $A_i^{surface}$ определяется равенством

$$A_i^{surface} = Q_i/V_i, \quad (12)$$

где Q_i и V_i – элементы векторов \mathbf{Q} и \mathbf{V} , задаваемых следующими выражениями

$$\mathbf{Q} = \hat{\tau} \hat{\mathbf{r}}^{-1}(\mathbf{R} - \mathbf{R}_0), \quad \mathbf{V} = \hat{\mathbf{t}} \hat{\mathbf{r}}^{-1}(\mathbf{R} - \mathbf{R}_0) + \mathbf{t}_0. \quad (13)$$

Вектора \mathbf{Q} и \mathbf{V} определяются через матрицы и вектора

$$\hat{\mathbf{r}}\{r_{i,j} = R_{i,j}^w - R_i^b\}, \quad \mathbf{R}\{R_i\}, \quad \mathbf{R}_0\{R_i^b\}, \quad \hat{\mathbf{t}}\{t_{i,j} = T_{i,j}^w - T_i^b\}, \\ \hat{\mathbf{t}}\{t_{i,j} = T_{i,i}^w \delta_{i,j}\}, \quad \mathbf{t}_0\{t_{0,i} = T_i^b\}, \quad (14)$$

где $\delta_{i,j}$ – символ Кронекера; величины $T_{i,j}^w$, T_i^b и R_i^b , $R_{i,j}^w$ – усредненные по i -му пикселю коэффициенты пропускания и яркости для базовых задач,

$$T_{i,j}^w = \frac{1}{|U_i| \pi I_0} \iint_{U_i} dx dy \int_0^1 d\mu' \mu' \int_0^{2\pi} d\varphi' I_j^w(x, y, H, \mu', \varphi'), \quad (15)$$

$$T_i^b = \frac{1}{|U_i| \pi I_0} \iint_{U_i} dx dy \int_0^1 d\mu' \mu' \int_0^{2\pi} d\varphi' I^b(x, y, H, \mu', \varphi'), \quad (16)$$

$$R_i^b = \frac{1}{|U_i|} \frac{\pi}{\mu_0 I_0} \iint_{U_i} dx dy I^b(x, y, 0, \tilde{\mu}, \tilde{\varphi}),$$

$$R_{i,j}^w = \frac{1}{|U_i|} \frac{\pi}{\mu_0 I_0} \iint_{U_i} dx dy I_j^w(x, y, 0, \tilde{\mu}, \tilde{\varphi}). \quad (17)$$

Матрицы и вектора $\hat{\tau}$, $\hat{\mathbf{r}}$, $\hat{\mathbf{t}}$, \mathbf{R}_0 , \mathbf{t}_0 описывают отражение и пропускание атмосферы для базовых задач (10), (11) с учетом многократного рассеяния излучения в атмосфере и многократного его отражения от поверхности. Подробный вывод формул (12), (13) приведен в [9].

Формулы (12), (13) позволяют явно определить альbedo поверхности по измеренным значениям коэффициента яркости в случае, если известен состав атмосферы и граничные источники $\eta_L(y, z, \mu, \varphi)$, $\eta_R(y, z, \mu, \varphi)$, $\eta_L(x, z, \mu, \varphi)$, $\eta_O(x, z, \mu, \varphi)$.

Однако в реальности граничные источники неизвестны. Поэтому предлагается принимать функции $\eta_L(y, z, \mu, \varphi)$, $\eta_R(y, z, \mu, \varphi)$, $\eta_L(x, z, \mu, \varphi)$, $\eta_O(x, z, \mu, \varphi)$ равными нулю, выполнять восстановление альbedo в достаточно большом участке поверхности $G\{0 < x < X, 0 < y < Y\}$ и считать восстановленными альbedo только в пикселях U_i , достаточно удаленных от границ G .

Если при этом задавать все пиксели одинаковой площади, то их количество может оказаться очень большим. Поэтому разумно задавать один целевой пиксель (где необходимо определить альbedo) в центре области и окружающие его пиксели большей площади.

Зададим $N + 1$ пикселей следующим образом:

$$U_0 \left\{ \left[\frac{X-d}{2}, \frac{X+d}{2} \right] \times \left[\frac{Y-d}{2}, \frac{Y+d}{2} \right] \right\}, \quad (18)$$

$$U_i \left\{ [(N-i)dx, X - (N-i)dx] \times \right.$$

$$\left. \times [(N-i)dy, Y - (N-i)dy] \setminus U_{i-1} \right\}, \quad i = 1, \dots, N, \quad (19)$$

$$dx = \frac{X-d}{N}, \quad dy = \frac{Y-d}{N}.$$

Здесь целевой пиксель U_0 , имеющий площадь d^2 , расположен в центре участка G . Остальные N пикселей концентрически охватывают целевой пиксель (см. пример на рис. 1). Влияние на коэффициент яркости в целевом пикселе U_0 значений альbedo в других точках поверхности оценивается в зависимости от удаленности этих точек от U_0 .

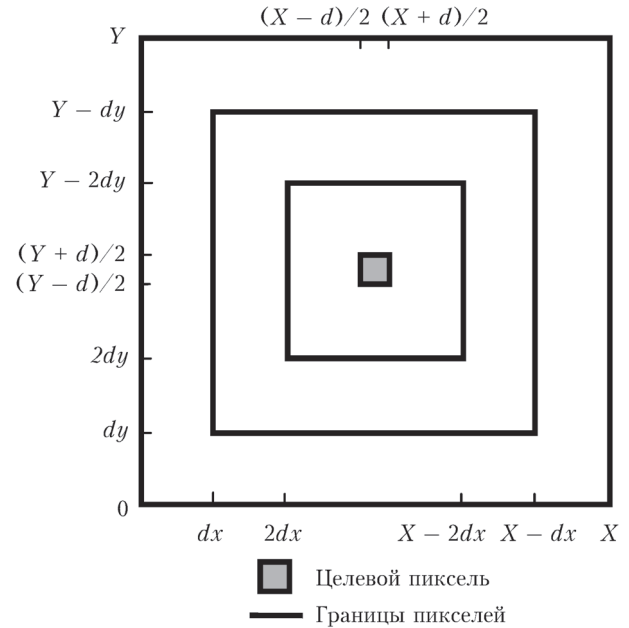


Рис. 1. Пример разбиения выбранного участка поверхности на 4 пикселя. $dx = (X - d)/N$, $dy = (Y - d)/N$

Далее приведены результаты тестирования алгоритма (12)–(17) с разбиением поверхности (18), (19) при восстановлении альbedo поверхности в целевом пикселе U_0 .

2. Результаты решения модельных задач

Примем зенитный угол солнца $\theta_0 = 45^\circ$ и модель морского аэрозоля [10]. Выберем длину волны $\lambda = 0,5$ мкм и отражение в зенит $\bar{\mu} = 1$, $\bar{\phi} = 0$. Полагаем, что поглощающие газы отсутствуют, а аэрозоль горизонтально однородный. Задаем пять оптических толщин аэрозоля

$$\tau^{aerosol} = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5,$$

пять размеров участка G

$$H_{xy} = X = Y = 50; 100; 200; 300; 400 \text{ км},$$

пять вариантов размера целевого пикселя

$$d = 0,25; 0,15; 0,06; 0,03; 0,015 \text{ км},$$

семь вариантов разбиения участка G на пиксели

$$N = 1; 2; 3; 4; 8; 16; 24.$$

Альbedo поверхности $A_x^{surface}(x, y)$ задаем выражением

$$A^{surface}(x, y) = \zeta(x, y, p) \frac{1}{2} \left| \cos \left(m \left[\left(\frac{x}{X} \right)^2 + \left(\frac{y}{Y} \right)^2 \right] \right) \right|, \quad (20)$$

$$m = 1, 2, 4,$$

где

$$\zeta(x, y, p) = p, \text{ если } (x, y) \in U_0,$$

$$\zeta(x, y, p) = 1, \text{ если } (x, y) \notin U_0, p = 1, 2.$$

Здесь параметр m оценивает вариацию альbedo во всем участке G , функция $\zeta(x, y, p)$ определяет величину «скачка» альbedo в целевом пикселе. Отметим, что для функции (20) точка $x = y = X/2 = Y/2$ не является центром симметрии, т.е. форма альbedo не соответствует структуре разбиения поверхности на пиксели (см. рис. 1).

Базовые задачи (10), (11) решаются с нулевыми краевыми условиями.

Значения «измеренного» коэффициента яркости (9) находятся решением задач (1)–(4). Чтобы имитировать источники на боковых границах $x = 0$, $x = X$, $y = 0$, $y = Y$, вместо краевых условий (5)–(8) с неизвестными функциями $\eta_L(y, z, \mu, \phi)$, $\eta_R(y, z, \mu, \phi)$, $\eta_L(x, z, \mu, \phi)$, $\eta_O(x, z, \mu, \phi)$ используются условия зеркального отражения

$$I(0, y, z, \mu, \phi) = I(0, y, z, \mu, \pi - \phi) \quad (21)$$

при $\xi > 0$, $0 < y < Y$, $0 < z < H$,

$$I(X, y, z, \mu, \phi) = I(X, y, z, \mu, \pi - \phi) \quad (22)$$

при $\xi < 0$, $0 < y < Y$, $0 < z < H$,

$$I(x, 0, z, \mu, \phi) = I(x, 0, z, \mu, 2\pi - \phi) \quad (23)$$

при $\eta > 0$, $0 < x < X$, $0 < z < H$,

$$I(x, Y, z, \mu, \phi) = I(x, Y, z, \mu, 2\pi - \phi) \quad (24)$$

при $\eta < 0$, $0 < x < X$, $0 < z < H$

или периодические краевые условия

$$I(0, y, z, \mu, \phi) = I(X, y, z, \mu, \phi) \quad (25)$$

при $\xi > 0$, $0 < y < Y$, $0 < z < H$,

$$I(X, y, z, \mu, \phi) = I(0, y, z, \mu, \phi) \quad (26)$$

при $\xi < 0$, $0 < y < Y$, $0 < z < H$,

$$I(x, 0, z, \mu, \phi) = I(x, Y, z, \mu, \phi) \quad (27)$$

при $\eta > 0$, $0 < x < X$, $0 < z < H$,

$$I(x, Y, z, \mu, \phi) = I(x, 0, z, \mu, \phi) \quad (28)$$

при $\eta < 0$, $0 < x < X$, $0 < z < H$.

Использование краевых условий (21)–(28) позволяет имитировать решение уравнения (1) в бесконечной области $-\infty < x < \infty$, $-\infty < y < \infty$, $0 < z < H$. При этом альbedo, заданное на прямоугольнике $0 < x < X$, $0 < y < Y$, распространяется на всю плоскость. В условиях (21)–(24) это распространение выполняется последовательным зеркальным отражением области задания альbedo от каждой из ее четырех границ; при этом после каждого отражения площадь области задания увеличивается в 2 раза. При краевых условиях (25)–(28) плоскость последовательно заполняется прямоугольниками G без отражения и поворота какого-либо из них.

Все краевые задачи решаются сеточным методом дискретных ординат [11]. При этом в каждом пикселе альbedo поверхности (20) считается пространственно неоднородным. Полученные коэффициенты яркости и пропускания усредняются по всем пикселям по формулам (9), (15)–(17).

Далее с помощью соотношений (12), (13) определяются значения альbedo поверхности $A_i^{surface}$, $i = 0, \dots, N$, во всех пикселях и находится относительная ошибка восстановления альbedo в целевом пикселе U_0 :

$$\varepsilon = 100 \left| 1 - \frac{A_{0, retr}^{surface}}{A_0^{surface}} \right| \%. \quad (29)$$

Здесь точное значение альbedo $A_0^{surface}$ в целевом пикселе получено усреднением функции $A^{surface}(x, y)$ по формуле (4). Подчеркнем, что при тестировании алгоритма оценивается ошибка восстановления альbedo в целевом пикселе, но не ошибки аппроксимации коэффициента яркости.

Ошибка (29) связана как с погрешностью задания краевых условий для базовых задач, так и с погрешностью, вносимой применением достаточно грубого разделения (18), (19) участка G на пиксели и использованием в алгоритме восстановления значений коэффициентов отражения и пропускания, усредненных по крупным пикселям. Оценим каждую из этих погрешностей отдельно.

Для оценки погрешности, вносимой разделением области на крупные пиксели, найдем «измеренные» значения коэффициента яркости (9) решением задачи (1)–(4) с нулевыми краевыми условиями, которые были использованы и при решении базовых задач (10), (11). Для оценки устойчивости алгоритма вычислим число обусловленности $\text{Cond}(\hat{\mathbf{r}})$ матрицы $\hat{\mathbf{r}}$, используемой в равенстве (13).

Во всех расчетах число обусловленности $\text{Cond}(\hat{\mathbf{r}}) < 3$ и ошибка восстановления ε практически не зависят от размера d целевого пикселя U_0 . Это означает, что при повышении пространственного разрешения алгоритм остается устойчивым.

В то же время ошибка ε ожидаемо уменьшается с увеличением числа окружающих пикселей N и возрастает с ростом вариации искомого альbedo (параметра m) (рис. 2). Также ошибка ε растет с увеличением оптической толщины аэрозоля τ^{aerosol} (рис. 3) и уменьшается при переходе от альbedo без «скачка» ($p = 1$) к альbedo со «скачком» ($p = 2$) (см. рис. 2 и 3).

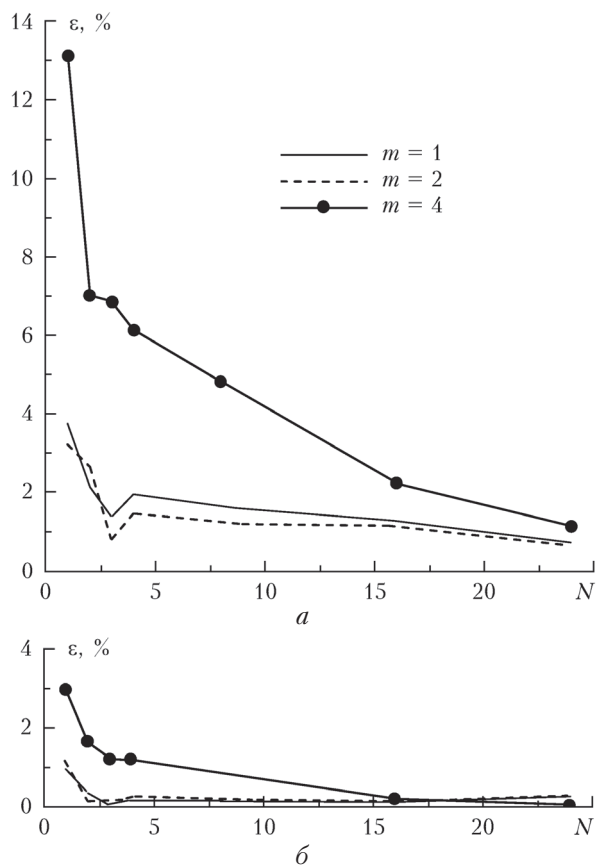


Рис. 2. Ошибки восстановления альbedo ε в целевом пикселе U_0 в зависимости от числа окружающих пикселей N , значений параметров m и p искомого альbedo (20). Размер участка $H_{xy} = 100$ км, размер целевого пикселя $d = 0,03$ км, оптическая толщина аэрозоля $\tau^{\text{aerosol}} = 0,3$. $a - p = 1$; $b - p = 2$

Чтобы объяснить этот факт, представим коэффициент яркости в целевом пикселе линейной комбинацией решений базовых задач [9]. Для альbedo

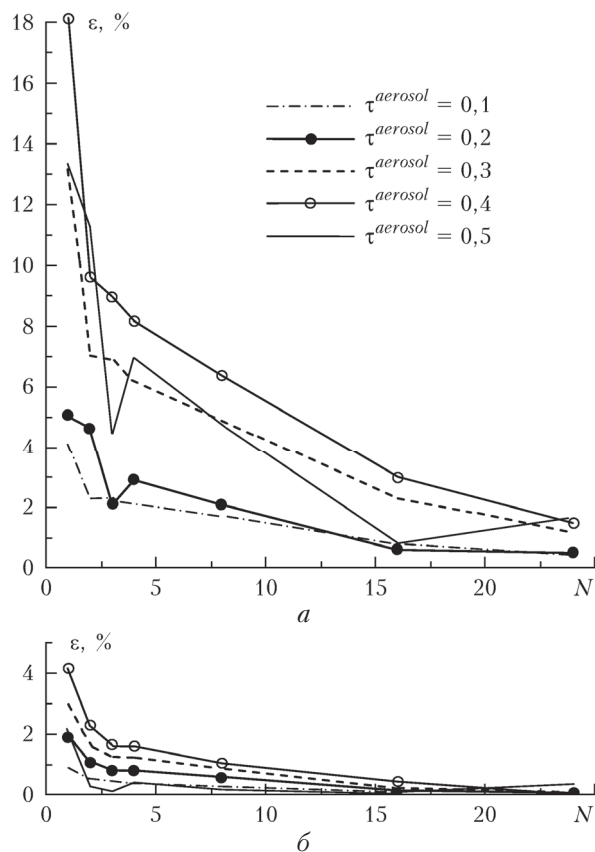


Рис. 3. Ошибки восстановления альbedo ε в целевом пикселе U_0 в зависимости от числа окружающих пикселей N , оптических толщин аэрозоля τ^{aerosol} , величины «скачка» p в искомого альbedo (20). Размер участка $H_{xy} = 100$ км, размер целевого пикселя $d = 0,03$ км, параметр альbedo $m = 4$. $a - p = 1$; $b - p = 2$

со «скачком» вклад в коэффициент яркости базовой функции целевого пикселя оказывается много большим, чем вклад остальных базовых функций. Поэтому количество остальных базовых функций при представлении коэффициента яркости может быть уменьшено без потери точности.

Заметим, что необходимое для достижения ошибки восстановления порядка 1% в целевом пикселе число окружающих пикселей N во всех случаях не превышает 24.

Оценим теперь влияние на погрешность восстановления ошибки краевых условий для базовых задач. Для этого «измеренные» значения коэффициента яркости (9) находятся решением задачи (1)–(4) с периодическими краевыми условиями (25)–(28) и условиями зеркального отражения (21)–(24), тогда как базовые задачи решаются с нулевыми краевыми условиями. Используем разбиение поверхности с $N = 24$ окружающими пикселями, при котором ошибка, вносимая разбиением, мала (см. рис. 2 и 3).

Зависимость ошибки восстановления ε от размера участка H_{xy} и оптической толщины аэрозоля τ^{aerosol} приведена на рис. 4 для альbedo без «скачка» ($p = 1$), графики для $p = 2$ аналогичны. Можно видеть, что при увеличении размера H_{xy} ошибка восстановления альbedo ε в расположенном в ее центре

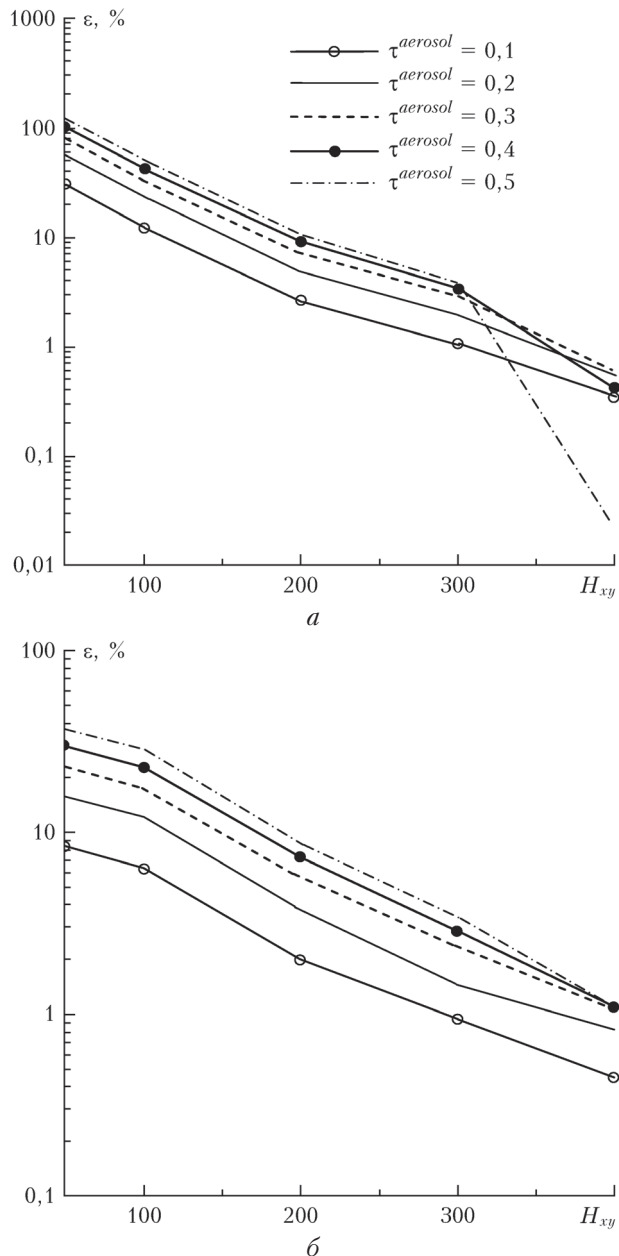


Рис. 4. Ошибки восстановления альbedo ε в целевом пикселе U_0 в зависимости от размера участка H_{xy} , оптических толщин аэрозоля $\tau^{aerosol}$ и вида краевого условия. Размер целевого пикселя $d = 0,015$ км, число окружающих пикселей $N = 24$, в искомом альbedo (20) параметры $m = 4$ и $p = 1$. *a* – краевые условия зеркального отражения; *б* – периодические краевые условия

целевом пикселе U_0 уменьшается до 1% для крайевых условий обоих типов.

Однако необходимый для достижения ошибки восстановления порядка 1% размер участка H_{xy} находится в интервале 300–400 км. При уменьшении требований к точности размер H_{xy} может быть уменьшен. Например, для восстановления с ошибкой в 5% достаточно использовать значение H_{xy} от 100 до 200 км для $0,1 < \tau^{aerosol} < 0,2$ и от 200 до 300 км для $0,2 < \tau^{aerosol} < 0,5$ (см. рис. 4).

Все расчеты выполнены на персональном компьютере с частотой 3,2 ГГц. Решение одной базовой задачи требует в среднем 11 с. Составление матриц $\hat{\tau}$, \hat{r} , \hat{t} и векторов \mathbf{R}_0 , \mathbf{t}_0 , а также вычисление обратной матрицы \hat{r}^{-1} методом минимальных невязок для $N = 24$ окружающих пикселей требует 0,18 с. Расчет альbedo в целевом пикселе по формулам (12), (13) занимает 0,1 с. Заметим, что в безоблачной атмосфере матрицы $\hat{\tau}$, \hat{r} , \hat{t} , \hat{r}^{-1} и вектора \mathbf{R}_0 , \mathbf{t}_0 могут быть найдены заранее для определенных аэрозольных моделей и набора значений оптических толщин $\tau^{aerosol}$. В этом случае для восстановления альbedo требуется лишь интерполяция $\hat{\tau}$, \hat{r} , \hat{t} , \hat{r}^{-1} и \mathbf{R}_0 , \mathbf{t}_0 для принимаемого значения $\tau^{aerosol}$ и расчет по формулам (12), (13).

Заключение

Рассмотрен алгоритм восстановления альbedo пространственно неоднородной ламбертовой поверхности по значениям коэффициента яркости отраженного солнечного излучения при известных оптических параметрах атмосферы. Алгоритм опирается на разбиение участка поверхности на концентрические пиксели вокруг одного целевого пикселя U_0 , в котором необходимо восстановить альbedo. При таком разбиении влияние на коэффициент яркости в целевом пикселе U_0 значений альbedo в других точках поверхности оценивается в зависимости от удаленности этих точек от U_0 . Разделение влияния каждого из пикселей на регистрируемые коэффициенты яркости выполняется с помощью методики, изложенной в [9]. Используются большие по площади участки поверхности, чтобы исключить влияние неизвестных источников излучения на внешних границах области на восстанавливаемое в целевом пикселе значение альbedo.

Выполнено тестирование предложенного алгоритма на задачах с известными альbedo поверхности и оптическими параметрами атмосферы (используется модель морского аэрозоля, аэрозоль предполагается горизонтально однородным). Для моделирования неизвестных источников излучения на внешних границах используются условия зеркального отражения и периодические. Показано, что алгоритм устойчив к повышению пространственного разрешения. Алгоритм позволяет восстановить альbedo поверхности в целевом пикселе размера 15 м с точностью порядка 1% при оптических толщинах аэрозоля $0,1 < \tau^{aerosol} < 0,5$. При этом размер участка, требуемый для исключения влияния неизвестных источников излучения на его границах, оказывается достаточно большим (от 100 до 400 км, в зависимости от $\tau^{aerosol}$ и требований к точности восстановления). Однако необходимое число концентрических пикселей N в разбиении участка поверхности в тестовых задачах не превышает 24. При этом восстановление альbedo, не имеющего «скачка» в целевом пикселе, требует большего количества пикселей N , чем восстановление альbedo, имеющего «скачок».

В реальных задачах алгоритм последовательно применяется к каждому целевому пикселю. При этом

количество окружающих пикселей N , необходимое для восстановления альbedo в целевом пикселе с требуемой точностью, зависит от степени неоднородности искомого альbedo. Рекомендуется использовать несколько разбиений при увеличивающемся числе N и считать восстановленным альbedo установившееся значение.

Отметим, что время решения одной базовой задачи на компьютере с частотой 3,2 ГГц требует 11 с; непосредственно расчет альbedo в целевом пикселе — 0,01 с. Кроме того, для безоблачной атмосферы решения базовых задач могут быть найдены заранее и помещены в базу данных. Распараллеливание вычислений также может сократить время работы алгоритма.

В заключение заметим, что в рассматриваемом алгоритме не учитываются турбулентность и сферичность атмосферы, эффекты затенения поверхности, неламбертовость реальных поверхностей, газовое поглощение. Тестирование выполнено для горизонтально однородной безоблачной атмосферы с коэффициентом яркости излучения, отраженного в зенит. При тестировании были рассмотрены вопросы:

1) об устойчивости алгоритма при повышении пространственного разрешения;

2) о выборе размера фрагмента изображения, необходимого для исключения неизвестного окружения.

Целями дальнейших исследований являются:

1) тестирование алгоритма для атмосферы с разорванной облачностью;

2) модернизация алгоритма для спектральных диапазонов, где существенно газовое поглощение;

3) модернизация алгоритма для определения альbedo неламбертовых поверхностей по значениям коэффициента яркости, измеренного в нескольких направлениях.

1. *Diner D.J., Martonchik J.V., Borel Ch., Gerstl S.A.W., Gordon H.R., Knyazikhin Y., Myneni R., Pinty B., Verstraete M.M.* Multi-angle imaging spectro-radiometer. Level 2 surface retrieval algorithm theoretical basis. Pasadena: California Institute of Technology, 1999. 100 p.
2. *Levy R.C., Mattoo L.R.S., Vermote E., Kaufman Y.J.* Second-generation algorithm for retrieving aerosol pro-

perties over land from MODIS spectral reflectance // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. D13211. DOI: 10.1029/2006JD007811.

3. *Vermote E.F., Vermeulen A.* Atmospheric correction algorithm: Spectral reflectances (Mod09). Algorithm Technical Background Document. College Park, Maryland: University of Maryland, 1999. 107 p.
4. *Тарасенков М.В., Белов В.В.* Комплекс программ восстановления отражательных свойств земной поверхности в видимом и УФ-диапазонах // *Оптика атмосфер. и океана.* 2014. Т. 27, № 7. С. 622–626; *Tarasenkov M.V., Belov V.V.* Software package for reconstructing properties of the Earth's surface in the visible and UV ranges // *Atmos. Ocean. Opt.* 2015. V. 28, N 1. P. 89–94.
5. *Белов В.В., Тарасенков М.В.* О точности и быстродействии RTM-алгоритмов атмосферной коррекции спутниковых изображений в видимом и УФ-диапазонах // *Оптика атмосфер. и океана.* 2013. Т. 26, № 7. С. 564–571; *Belov V.V., Tarasenkov M.V.* On the accuracy and operation speed of RTM algorithms for atmospheric correction of satellite images in the visible and UV ranges // *Atmos. Ocean. Opt.* 2014. V. 27, N 1. P. 54–61.
6. *Lyapustin A.I., Wang Y., Laszlo I., Hilker T., Hall F.G., Sellers P.J., Tucker C.J., Korkin S.V.* Multi-angle implementation of atmospheric correction for MODIS (MAIAC). 3. Atmospheric correction // *Remote Sens. Environ.* 2012. V. 127. P. 385–393.
7. *Roujean J.L., Leroy M., Deschamps P.Y.* A bidirectional reflectance model of the Earth's surface for the correction of remote sensing data // *J. Geophys. Res. D.* 1992. V. 97, N 18. P. 20455–20468.
8. *Bréon F.M., Vermote E.* Correction of MODIS surface reflectance time series for BRDF effects // *Remote Sens. Environ.* 2012. V. 125. P. 1–9.
9. *Николаева О.В.* Новый алгоритм восстановления альbedo поверхности по данным спутникового зондирования // *Оптика атмосфер. и океана.* 2016. Т. 29, № 3. С. 204–209.
10. *Sayer A.M., Smirnov A., Hsu N.C., Holben B.N.* A pure marine aerosol model, for use in remote sensing applications // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. D05213. DOI: 10.1029/2011JD016689.
11. *Николаева О.В., Басс Л.П., Кузнецов В.С.* Радуга-6 — программа решения стационарного и нестационарного уравнений переноса излучения в 1D-, 2D-, 3D-областях // Сборник тезисов Междунар. симпоз. «Атмосферная радиация и динамика». Санкт-Петербург, 2011. С. 81–82. URL: http://www.irc.phys.spbu.ru/msard11/thesis_11.pdf

O.V. Nikolaeva. The algorithm for retrieving surface albedo via multispectral remote sensing data of high spatial resolution.

The fast atmospheric correction algorithm is described. The algorithm is based upon presentation of the reflectance for any albedo via reflectances for the same atmosphere and model surface albedos. Test results to demonstrate workability of the algorithm for high spatial resolution data processing are presented.