

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 51-73

Новый алгоритм восстановления альbedo поверхности по данным спутникового зондирования

О.В. Николаева*

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

Поступила в редакцию 11.11.2015 г.

Описан новый алгоритм восстановления альbedo поверхности по значениям коэффициента яркости отраженного солнечного излучения. В алгоритме находится альbedo пространственно неоднородной ламбертовой поверхности с учетом многократного рассеяния излучения в атмосфере и многократного отражения излучения от поверхности. Приведены результаты решения модельных задач, демонстрирующие возможности алгоритма.

Ключевые слова: атмосферная коррекция, коэффициент яркости, замутненная атмосфера; atmospheric correction, reflectance, turbid atmosphere.

Введение

Рассматривается задача атмосферной коррекции — задача определения альbedo подстилающей поверхности по значениям коэффициента яркости отраженного атмосферой солнечного излучения. Для ее решения разработаны и используются несколько групп методов. Важное место среди них занимают RTM-методы, опирающиеся на решение уравнения переноса излучения [1] для различных моделей атмосферы.

Основой этих методов являются приближенные явные формулы, связывающие альbedo поверхности и коэффициент яркости. При построении формул предполагается, что вклад отражения от поверхности в коэффициент яркости невелик. Как правило, во внимание принимается лишь одно отражение от поверхности; многократное отражение учитывается приближенно [2]. Отражение от соседних пикселей моделируется с помощью функции размытия точки, определяемой по эмпирическим формулам или методом статистического моделирования Монте-Карло [3, 4]. Для повышения точности определения альbedo поверхности используется дополнительная информация о его спектральных характеристиках [5, 6] или же данные наземных измерений [7].

В настоящей статье предлагается новый алгоритм определения альbedo подстилающей поверхности по значениям коэффициента яркости. Алгоритм опирается на точную формулу, связывающую альbedo поверхности и коэффициент яркости с учетом многократного отражения излучения от поверхности и многократного рассеяния в атмосфере. Описание

алгоритма приведено в разд. 1. Оценки чувствительности алгоритма к погрешностям задания параметров атмосферы, полученные при решении тестовых задач, представлены в разд. 2 и 3.

1. Алгоритм определения альbedo поверхности

Рассмотрим задачу переноса излучения в трехмерной области:

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

Здесь решение $I_\lambda(x, y, z, \mu, \varphi)$ — интенсивность излучения в пространственной точке с координатами (x, y, z) в направлении $\mu = \cos\theta$, φ . Коэффициент экстинкции $k(x, y, z, \lambda)$, коэффициент рассеяния $k_s(x, y, z, \lambda)$ и индикатриса рассеяния $P(x, y, z, \gamma_s, \lambda)$ 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

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

$$I_\lambda(x, y, 0, \mu, \varphi) = I_{0,\lambda} \delta(\mu - \mu_0) \delta(\varphi - \varphi_0) \quad (2)$$

при $\mu > 0, 0 < x < X, 0 < y < Y$.

Здесь δ — дельта-функция Дирака; $I_{0,\lambda}$ — интенсивность внеатмосферной радиации (количество энергии излучения, падающего на единичную площадку, лежащую на верхней границе $z = 0$ под углом $\theta_0 = \arccos(\mu_0)$ к направлению падения излучения).

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

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

при $\mu < 0, 0 < x < X, 0 < y < Y$.

Здесь $A_\lambda^{surface}(x, y)$ — альбеда подстилающей поверхности в точке (x, y) . Будем предполагать, что поверхность разбита на непересекающиеся пиксели U_i . В пределах каждого пикселя альбеда поверхности зададим не зависящим от координат (x, y) :

$$A_\lambda^{surface}(x, y) \Big|_{(x,y) \in U_i} = A_{i,\lambda}^{surface}. \quad (4)$$

На боковых границах $x = 0, x = X, y = 0, y = Y$ могут быть заданы, например, нулевые краевые условия:

$$I_\lambda(0, y, z, \mu, \varphi) = 0 \quad (5)$$

при $\xi > 0, 0 < y < Y, 0 < z < H$,

$$I_\lambda(X, y, z, \mu, \varphi) = 0 \quad (6)$$

при $\xi < 0, 0 < y < Y, 0 < z < H$,

$$I_\lambda(x, 0, z, \mu, \varphi) = 0 \quad (7)$$

при $\eta > 0, 0 < x < X, 0 < z < H$,

$$I_\lambda(x, Y, z, \mu, \varphi) = 0 \quad (8)$$

при $\eta < 0, 0 < x < X, 0 < z < H$.

Краевые условия (5)–(8) означают, что излучение не входит в область $0 < x < X, 0 < y < Y, 0 < z < H$ через боковые границы $x = 0, x = X, y = 0, y = Y$.

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

$$R_{i,\lambda} = \frac{1}{|U_i|} \frac{\pi}{\mu_0 I_{0,\lambda}} \iint_{U_i} dx dy I_\lambda(x, y, 0, \tilde{\mu}, \tilde{\varphi}). \quad (9)$$

Здесь $|U_i|$ — площадь i -го пикселя. Координаты $(\tilde{\mu}, \tilde{\varphi})$ определяют направление отраженного излучения. Обычно рассматривается отражение в зенит ($\tilde{\mu} = -1, \tilde{\varphi} = 0$).

Найдем явную зависимость коэффициентов яркости от альбеда поверхности. Для этого введем базовые функции как решения следующих задач.

Задача с черной поверхностью:

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

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

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

$$\hat{T}^{3D} I_{j,\lambda}^w = 0, \quad I_{j,\lambda}^w(x, y, 0, \mu, \varphi) = I_{0,\lambda} \delta(\mu - \mu_0) \delta(\varphi - \varphi_0) \quad (11)$$

при $\mu > 0,$

$$I_{j,\lambda}^w(x, y, H, \mu, \varphi) = a_{j,\lambda}(x, y) \frac{1}{\pi} \int_0^1 d\mu' \mu' \int_0^{2\pi} d\varphi' I_{j,\lambda}^w(x, y, H, \mu', \varphi') \quad \text{при } \mu < 0,$$

$$a_{j,\lambda}(x, y) = 0 \quad \text{при } (x, y) \notin U_i,$$

$$a_{j,\lambda}(x, y) = 1 \quad \text{при } (x, y) \in U_i.$$

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

Тогда решение задачи (1)–(8) может быть представлено как линейная комбинация базовых функций

$$I_\lambda(x, y, z, \mu, \varphi) = I_\lambda^b(x, y, z, \mu, \varphi) + \sum_{j=1}^N \beta_{j,\lambda} (I_{j,\lambda}^w(x, y, z, \mu, \varphi) - I_\lambda^b(x, y, z, \mu, \varphi)). \quad (12)$$

Действительно, при любых значениях коэффициентов $\beta_{j,\lambda}$ функция (12) является решением уравнения (1) и удовлетворяет краевым условиям (2), (5)–(8). Краевое условие (3) для функции (12) имеет вид

$$A_{i,\lambda}^{surface} \left[\sum_{j=1}^N \beta_{j,\lambda} (T_{i,j,\lambda}^w - T_{i,\lambda}^b) + T_{i,\lambda}^b \right] = \beta_{i,\lambda} T_{i,i,\lambda}^w, \quad (13)$$

$i = 1, \dots, N,$

где величины $T_{i,j,\lambda}^w$ и $T_{i,\lambda}^b$ — усредненные по i -му пикселю коэффициенты пропускания для базовых задач

$$T_{i,j,\lambda}^w = \frac{1}{|U_i| \pi I_{0,\lambda}} \iint_{U_i} dx dy \int_0^1 d\mu' \mu' \int_0^{2\pi} d\varphi' I_{j,\lambda}^w(x, y, H, \mu', \varphi'),$$

$$T_{i,\lambda}^b = \frac{1}{|U_i| \pi I_{0,\lambda}} \iint_{U_i} dx dy \int_0^1 d\mu' \mu' \int_0^{2\pi} d\varphi' I_\lambda^b(x, y, H, \mu', \varphi').$$

Введем следующие матрицы и вектора:

$$\hat{\mathbf{t}} \{t_{i,j} = T_{i,j,\lambda}^w - T_{i,\lambda}^b\}, \quad \hat{\boldsymbol{\tau}} \{\tau_{i,j} = T_{i,i,\lambda}^w \delta_{i,j}\},$$

$$\hat{\mathbf{A}} \{A_{i,j} = A_{i,\lambda}^{surface} \delta_{i,j}\}, \quad \mathbf{t}_0 \{t_{0,i} = T_{i,\lambda}^b\}, \quad \boldsymbol{\beta} \{\beta_{i,\lambda}\}.$$

Здесь $\delta_{i,j}$ — символ Кронекера. Тогда система (13) принимает вид

$$(\hat{\boldsymbol{\tau}} - \hat{\mathbf{A}} \hat{\mathbf{t}}) \boldsymbol{\beta} = \hat{\mathbf{A}} \mathbf{t}_0.$$

Предполагая, что матрица $\hat{\boldsymbol{\tau}} - \hat{\mathbf{A}} \hat{\mathbf{t}}$ невырожденная, находим вектор $\boldsymbol{\beta}$, при котором функция (12) является решением задачи (1)–(8):

$$\beta = (\hat{\tau} - \hat{A}\hat{t})^{-1} \hat{A}t_0. \quad (14)$$

Теперь из равенства (12) найдем коэффициент яркости в i -м пикселе

$$R_{i,\lambda} = R_{i,\lambda}^b + \sum_{j=1}^N \beta_{j,\lambda} (R_{i,j,\lambda}^w - R_{i,\lambda}^b). \quad (15)$$

Здесь $R_{i,\lambda}^b$ и $R_{i,j,\lambda}^w$ — значения коэффициентов яркости в i -м пикселе для базовых задач

$$R_{i,\lambda}^b = \frac{1}{|U_i|} \frac{\pi}{\mu_0 I_{0,\lambda}} \iint_{U_i} dx dy I_{\lambda}^b(x, y, 0, \tilde{\mu}, \tilde{\varphi}),$$

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

Введем матрицу и вектора

$$\hat{r}\{r_{i,j} = R_{i,j,\lambda}^w - R_{i,\lambda}^b\}, \mathbf{R}\{R_{i,\lambda}\}, \mathbf{R}_0\{R_{i,\lambda}^b\}.$$

Тогда условие (15) записывается в форме

$$\mathbf{R} - \mathbf{R}_0 = \hat{r}\beta.$$

Подставляем в это равенство выражение (14) для вектора β . Находим уравнение

$$\mathbf{R} - \mathbf{R}_0 = \hat{r}(\hat{\tau} - \hat{A}\hat{t})^{-1} \hat{A}t_0.$$

Из этого уравнения следуют выражения для альbedo поверхности $A_{i,\lambda}^{surface}$ — диагональных элементов матрицы \hat{A}

$$A_{i,\lambda}^{surface} = Q_i/V_i, \quad (16)$$

$$\mathbf{Q} = \hat{t}\hat{r}^{-1}(\mathbf{R} - \mathbf{R}_0), \quad \mathbf{V} = \hat{t}\hat{r}^{-1}(\mathbf{R} - \mathbf{R}_0) + t_0. \quad (17)$$

Согласно (16) альbedo поверхности $A_{i,\lambda}^{surface}$ находится как отношение элементов векторов \mathbf{Q} и \mathbf{V} , определяемых выражениями (17).

Для одного пикселя ($N = 1$) выражение (16) имеет вид

$$A_{\lambda}^{surface} = \frac{T_{\lambda}^w (R_{\lambda} - R_{\lambda}^b)}{(T_{\lambda}^w - T_{\lambda}^b)(R_{\lambda} - R_{\lambda}^b) + (R_{\lambda}^w - R_{\lambda}^b)T_{\lambda}^b}. \quad (18)$$

Подчеркнем, что в формулах (17) матрицы и вектора \hat{t} , \hat{r} , \mathbf{R}_0 , 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. Согласно (16), (17) альbedo поверхности (4) по значениям измеренного коэффициента отраженной яркости (вектор \mathbf{R}) определяется однозначно, если матрица \hat{r} невырожденная.

Ошибка при определении альbedo поверхности $A_{i,\lambda}^{surface}$ по формулам (16), (17) может быть связана со следующими погрешностями.

1. Погрешность при задании параметров атмосферы (например, оптической толщины аэрозоля или среднего размера частицы).

2. Погрешность, возникающая из-за неоднородности реальной подстилающей поверхности внутри каждого пикселя.

3. Погрешность сеточного решения базовых задач (10), (11).

4. Погрешность, связанная с возможной плохой обусловленностью матрицы \hat{r} .

5. Погрешность, связанная с неучетом влияния на коэффициент яркости отражения излучения от пикселей, соседних с рассматриваемым участком поверхности.

Действительно, в реальных задачах нулевые краевые условия (5)–(8) не выполнены, поскольку в область $0 < x < X$, $0 < y < Y$, $0 < z < H$ через боковые границы $x = 0$, $x = X$, $y = 0$, $y = Y$ входит излучение. Связанную с этим фактом погрешность восстановления альbedo можно уменьшить, применив алгоритм к увеличенной области $-\Delta < x < X + \Delta$, $-\Delta < y < Y + \Delta$, $0 < z < H$.

Плохая обусловленность матрицы \hat{r} может возникнуть, например, при увеличении количества базовых функций (повышении пространственного разрешения).

В настоящей статье не исследуются вопросы, связанные с четвертой и пятой погрешностями предложенного алгоритма. Третья погрешность незначительна, если для решения базовых задач (10), (11) используются высокоточные численные методы.

Для оценки чувствительности предложенного алгоритма к первой и второй погрешностям рассматриваются две тестовые задачи. В первой задаче восстанавливается альbedo сильно пространственно-неоднородной поверхности под слоем прозрачной атмосферы для фиксированной длины волны. Во второй задаче находится многоспектральное альbedo пространственно-однородной поверхности (один пиксель) под плотным облаком. В обеих задачах рассматривается коэффициент яркости (9) при отражении в зенит ($\tilde{\mu} = -1$, $\tilde{\varphi} = 0$).

При этом в тестовых задачах свойства аэрозоля для упрощения анализа результатов приняты горизонтально однородными, а поглощение в газах не учитывается, хотя предложенная методика не предполагает таких ограничений.

2. Тестовая задача для прозрачной атмосферы

Рассмотрим задачу о восстановлении альbedo пространственно-неоднородной поверхности под слоем прозрачной атмосферы. Примем зенитный угол Солнца $\theta_0 = 60^\circ$. Используем модель саванного аэрозоля, состоящего из равных долей двух фракций. Крупной фракции соответствует средний радиус $r_c = 3,49$ мкм, мелкой фракции — средний радиус $r_f = 0,13$ мкм. Дисперсия $s = 0,315$ и показатель преломления $1,51 + 0,021i$ одинаковы для обеих фракций [8]. Выберем длину волны $\lambda = 550$ нм. Будем использовать пять разных оптических толщин аэрозоля

$$\tau^{aerosol} = 0,23; 0,24; 0,25; 0,26; 0,27.$$

Рассмотрим участок размером 50×50 км. Примем разбиение верхней границы атмосферы на

$N = 5^2 = 25$ пикселей. Каждому пикселю на верхней границе соответствует пиксель на подстилающей поверхности. Зададим дополнительное разбиение каждого пикселя U_i на поверхности на n равных по площади частей

$$n = 1, \quad n = 2^2 = 4, \quad n = 4^2 = 16. \quad (19)$$

При этом образуется разбиение из $n \cdot N$ ячеек – $\{u_{i,k}\}$, $k = 1, \dots, n$, $i = 1, \dots, N$. Зададим альbedo поверхности как кусочно-постоянную функцию на этих ячейках

$$\tilde{\alpha}_{i,k,\lambda} = \frac{1}{|u_{i,k}|} \iint_{u_{i,k}} dx dy \alpha(x,y), \quad \alpha(x,y) = \frac{|\cos(x^2 + y^2)|}{2},$$

$$k = 1, \dots, n, \quad i = 1, \dots, N. \quad (20)$$

Значения «измеренного» коэффициента яркости $R_{i,\lambda}$, $i = 1, \dots, N$, для каждого из пикселей на верхней границе атмосферы находятся решением задачи (1)–(8) с альbedo поверхности (20). В алгоритме восстановления находятся средние значения альbedo $A_{retr,i,\lambda}^{surface}$ для каждого из N пикселей на поверхности. Восстановленные значения сравниваются с соответствующими точными значениями

$$A_{i,\lambda}^{surface} = \frac{1}{|U_i|} \iint_{U_i} dx dy \alpha(x,y) = \frac{1}{|U_i|} \sum_{k=1}^n \iint_{u_{i,k}} dx dy \alpha(x,y) =$$

$$= \frac{1}{|U_i|} \sum_{k=1}^n |u_{i,k}| \sum_{k=1}^n \tilde{\alpha}_{i,k,\lambda}, \quad i = 1, \dots, N.$$

В алгоритме восстановления используются решения базовых задач (10), (11), найденные при значении $\tau^{aerosol} = 0,25$ без использования дополнительного разбиения пикселей на ячейки (т.е. при $n = 1$). Сравнение точных $A_{i,\lambda}^{surface}$ и восстановленных $A_{retr,i,\lambda}^{surface}$ альbedo позволяет оценить влияние на точность алгоритма восстановления погрешностей задания оптической толщины аэрозоля

$$\delta\tau^{aerosol} = -0,02; -0,01; 0; 0,01; 0,02$$

и неоднородности исходного альbedo поверхности внутри каждого пикселя.

Сравнение показывает, что при точном задании оптической толщины аэрозоля ($\delta\tau^{aerosol} = 0$) и однородной поверхности внутри каждого пикселя ($n = 1$) точное альbedo поверхности $A_{i,\lambda}^{surface}$ отличается от восстановленного альbedo $A_{retr,i,\lambda}^{surface}$ не более чем на 0,006%.

Зависимость восстановленного альbedo $A_{retr,i,\lambda}^{surface}$ от погрешности задания оптической толщины аэрозоля $\delta\tau^{aerosol}$ при однородной поверхности внутри каждого пикселя ($n = 1$) представлена на рис. 1. На рисунке точное альbedo $A_{i,\lambda}^{surface}$ совпадает с восстановленным при $\delta\tau^{aerosol} = 0$. Видно, что качественно альbedo восстанавливается правильно, однако его величина существенно зависит от погрешности $\delta\tau^{aerosol}$. При этом можно ожидать, что при большой

погрешности $\delta\tau^{aerosol}$ восстановленное альbedo для какой-либо длины волны в достаточно темных пикселях окажется отрицательным, а в достаточно ярких – больше порогового для поверхности данного типа значения. Таким образом возможно определить, что предложенная для алгоритма восстановления оптическая толщина $\tau^{aerosol}$ неверна.

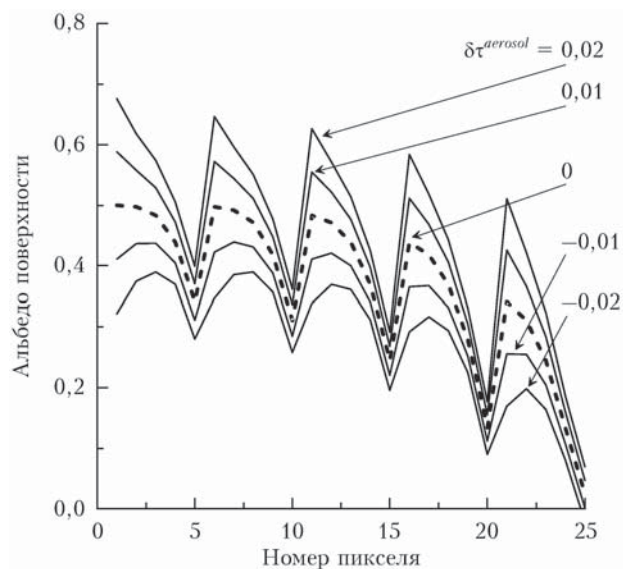


Рис. 1. Восстановленные альbedo $A_{retr,i,\lambda}^{surface}$ для разных погрешностей задания оптической толщины аэрозоля $\delta\tau^{aerosol}$. Точное альbedo совпадает с восстановленным при $\delta\tau^{aerosol} = 0$

На рис. 2 приведены значения восстановленного альbedo $A_{retr,i,\lambda}^{surface}$ для разной степени неоднородности поверхности внутри пикселя, когда оптическая толщина аэрозоля задана точно ($\delta\tau^{aerosol} = 0$). Здесь же приведен и «измеренный» коэффициент яркости $R_{i,\lambda}$.

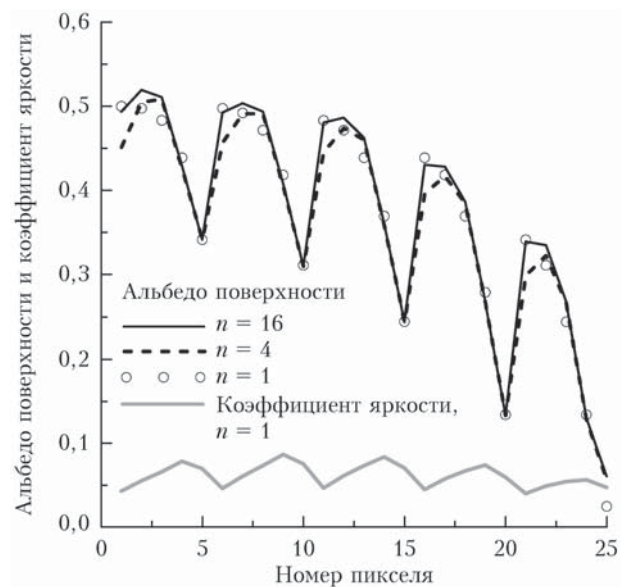


Рис. 2. Восстановленные альbedo $A_{retr,i,\lambda}^{surface}$ для разной степени неоднородности поверхности внутри пикселя. Точное альbedo совпадает с восстановленным при $n = 1$

Видно, что неоднородность исходного альbedo поверхности внутри выбранного пикселя оказывает незначительное влияние на точность восстановления величин $A_{retr,i,\lambda}^{surface}$. Также рис. 2 демонстрирует, насколько сильно из-за многократного рассеяния излучения в атмосфере и многократного отражения излучения от поверхности «сглажен» коэффициент яркости по сравнению с альbedo поверхности.

3. Тестовая задача для облачной атмосферы

Рассмотрим спектральный интервал 400–2400 нм. Пусть в слое атмосферы с саванным аэрозолем (см. разд. 2) на высотах от 3 до 5 км находится облако оптической толщины $\tau^{cloud}(400 \text{ нм}) = 10$. В облаке принимается логнормальное распределение капель по размерам с дисперсией $s = 0,4$ и одним из трех средних радиусов $r_c = 3; 5; 7$ мкм. В качестве подстилающей поверхности выбирается поле ячменя. Зенитный угол Солнца полагается равным 45° . Рассматривается пространственно-однородная поверхность с одним пикселем, поэтому номер пикселя i опущен.

«Измеренные» коэффициенты яркости R_λ определяются решением задачи (1)–(8). Коэффициенты яркости R_λ^b, R_λ^w , пропускания T_λ^b, T_λ^w находятся решением задач с черной (10) и белой поверхностями (11). Альbedo поверхности восстанавливается по формуле (18).

На рис. 3 приведены альbedo поверхности $A_\lambda^{surface}$ и коэффициенты яркости R_λ, R_λ^b и R_λ^w для $r_c = 5$ мкм. Наблюдается вполне различимое влияние альbedo поверхности на коэффициент яркости R_λ .

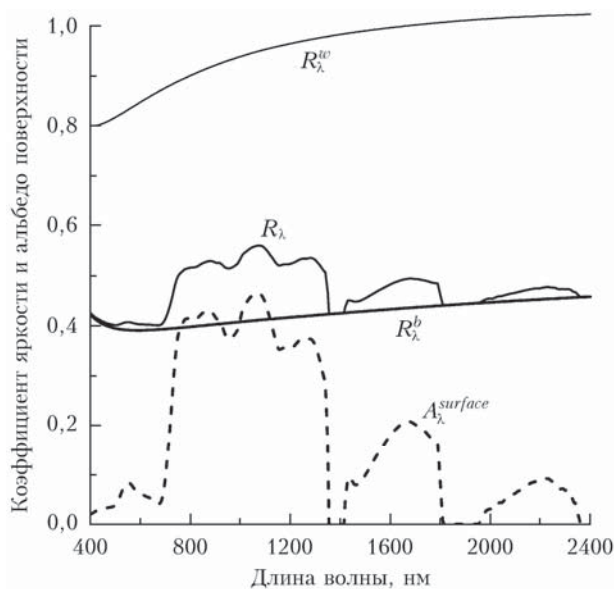


Рис. 3. Альbedo $A_\lambda^{surface}$ и коэффициенты яркости R_λ, R_λ^b и R_λ^w для $r_c = 5$ мкм

На рис. 4 показаны восстановленные альbedo $A_{retr,\lambda}^{surface}$ для разных пар r_c, r_{c_0} . Здесь параметр r_c ис-

пользовался при расчете «измеренных» коэффициентов яркости, а параметр r_{c_0} — при решении базовых задач (10), (11).

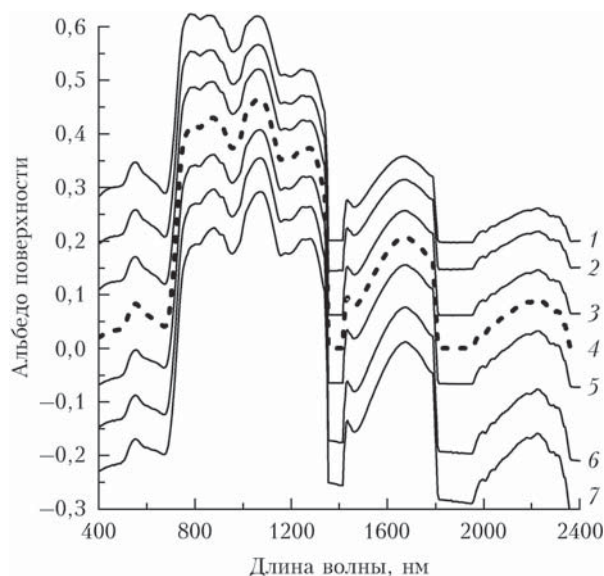


Рис. 4. Восстановленные альbedo $A_{retr,\lambda}^{surface}$ для разных пар средних радиусов капли r_c, r_{c_0} : 1 — $r_c = 3, r_{c_0} = 7$; 2 — $r_c = 3, r_{c_0} = 5$; 3 — $r_c = 5, r_{c_0} = 7$; 4 — $A_\lambda^{surface}$; 5 — $r_c = 7, r_{c_0} = 5$; 6 — $r_c = 5, r_{c_0} = 3$; 7 — $r_c = 7, r_{c_0} = 3$. Точное альbedo $A_\lambda^{surface}$ совпадает с восстановленным при $r_c = r_{c_0}$

При $r_c = r_{c_0}$ точное альbedo поверхности $A_\lambda^{surface}$ отличается от восстановленного альbedo $A_{retr,\lambda}^{surface}$ не более чем на 0,9%. Это отклонение обусловлено погрешностью сеточного решения задач (1)–(8), (10) и (11).

Из рис. 4 видно, что качественно альbedo восстанавливается правильно, однако его величина существенно зависит от погрешности $\delta r_c = r_c - r_{c_0}$. При этом занижение среднего радиуса капли ($r_c > r_{c_0}$) приводит к занижению восстанавливаемого альbedo, и наоборот. Можно ожидать, что при большой погрешности δr_c восстановленное альbedo для какой-либо длины волны будет отрицательным или же лежащим вне интервала, характерного для поверхности данного типа. Таким образом возможно исключить неподходящие величины r_{c_0} .

Заключение

Предложен алгоритм восстановления альbedo подстилающей поверхности по значениям коэффициента яркости отраженного солнечного излучения. Алгоритм опирается на точное выражение альbedo поверхности через измеренный коэффициент яркости, а также коэффициенты яркости и альbedo пропускания для задач с модельными поверхностями. Алгоритм обладает следующими свойствами.

1. Позволяет однозначно определить альbedo поверхности, если состав атмосферы известен.
2. Является явным (не требует использования итерационных процессов).

3. Дает возможность учитывать переотражение излучения между пикселями.

4. Может быть использован при мутной и даже облачной атмосфере.

Точность алгоритма восстановления существенно зависит от точности задания оптических параметров атмосферы (оптической толщины и среднего радиуса аэрозольной или облачной частицы). Однако большие ошибки в задании параметров могут привести к появлению нефизического альбеда для какой-либо длины волны (отрицательного или имеющего значение вне интервала, характерного для поверхностей данного типа). Таким образом, если предварительно известен тип поверхности, ошибочные параметры атмосферы могут быть исключены из рассмотрения. Тем не менее неопределенность в задании свойств реальной атмосферы приводит к неопределенностям в значениях восстановленного альбеда поверхности.

Помимо неопределенности в задании свойств атмосферы, существуют еще два источника ошибок восстановления.

Во-первых, повышение пространственного разрешения сопровождается увеличением количества используемых базовых функций. Это может приводить к плохой обусловленности матрицы $\hat{\mathbf{r}}$ из уравнений алгоритма (16), (17).

Во-вторых, использование нулевых краевых условий (5)–(8) для базовых задач приводит к неучету влияния эффектов отражения излучения от соседних с рассматриваемым участком поверхности пикселей.

Оценка максимально допустимого пространственного разрешения, модернизация алгоритма при плохо обусловленной матрице $\hat{\mathbf{r}}$, а также оценка погрешностей восстановления альбеда вблизи краев участка поверхности является предметом дальнейших исследований.

1. Белов В.В., Тарасенков М.В. О точности и быстродействию 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.
2. 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.
3. 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 reflective properties of the Earth's surface in the visible and UV ranges // Atmos. Ocean. Opt. 2015. V. 28, N 1. P. 89–94.
4. Liang L.S., Hongliang F., Mingzhen Ch. Atmospheric Correction of Landsat ETM + Land Surface Imagery – Part I: Methods // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2001. V. 39, N 11. P. 2490–2498.
5. Lyapustin A., Wang Y., Laszlo I., Kahn R., Korkin S., Remer L., Levy R., Reid J.S. Multiangle implementation of atmospheric correction (MAIAC): 2. Aerosol algorithm // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. P. D03211.
6. Vermote E.F., Vermeulen A. Atmospheric correction algorithm: Spectral reflectances (Mod09). Algorithm Technical Background Document. College Park, Maryland: University of Maryland, 1999. 107 p.
7. Chen H.W., Cheng K.S. A conceptual model of surface reflectance estimation for satellite remote sensing images using *in situ* reference data // Remote Sens. 2012. V. 4, N 4. P. 934–949.
8. Dubovik O., Holben B., Eck T., Smirnov A., Kaufman Y., King M., Tanre D., Slutsker I. Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations // J. Atmos. Sci. 2002. V. 59, N 3. P. 590–608.

O.V. Nikolaeva. New algorithm of retrieving the surface albedo via multispectral remote sensing data.

The new atmospheric correction algorithm is presented. The algorithm gives albedo of a heterogeneous lambertian surface taking into account multiple scatterings and reflections of the solar radiation. Test results to demonstrate potential of the algorithm are presented.