

УДК 51-73

## Алгоритм восстановления свойств атмосферного аэрозоля по многоспектральным данным дистанционного зондирования

О.В. Николаева, А.Г. Чебыкин\*

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

Поступила в редакцию 20.07.2018 г.; после доработки 29.10.2018 г.

Представлен алгоритм восстановления параметров аэрозоля по многоспектральным спутниковым измерениям коэффициента яркости отраженного безоблачной атмосферой солнечного излучения. Используется модельный коэффициент яркости в виде дробно-полиномиальной функции выбранных параметров (аэрозольная и рэлеевская оптические толщины, альbedo однократного рассеяния аэрозоля, косинус зенитного угла солнца, альbedo земной поверхности). Приведены результаты тестирования алгоритма восстановления на модельных задачах.

*Ключевые слова:* дистанционное зондирование, восстановление оптических параметров, аэрозоль; remote sensing, retrieval of optical parameters, aerosol.

### Введение

Для решения задачи восстановления свойств атмосферного аэрозоля по данным пассивного спутникового зондирования существуют и активно применяются несколько алгоритмов. В них используется модельный коэффициент яркости излучения, отраженного системой «атмосфера–подстилающая поверхность». В число искомым параметров, помимо оптической толщины аэрозоля, для некоторой длины волны включаются величины, характеризующие микрофизические свойства аэрозоля: альbedo однократного рассеяния и средний косинус угла рассеяния [1], доли фракций и эффективные радиусы частиц [2], показатель Ангстрема [3, 4].

Модельный коэффициент яркости, помимо оптических параметров аэрозоля, зависит также от свойств отражающей поверхности. В случае самолетных измерений возможно исключить неизвестное альbedo поверхности, сопоставляя два измерения над одним участком, сделанные под разными углами или с разных высот [5]. При спутниковом зондировании неизвестные значения альbedo поверхности задаются априори [4] или представляются в виде линейной комбинации модельных альbedo (например, растительности и почвы [3]). В этом случае коэффициент линейной комбинации включается в число определяемых параметров. Широко используется эмпирическое соотношение, связывающее альbedo растительности в голубой и инфракрасной частях спектра [2].

Общим для всех алгоритмов является использование аналитической формулы для коэффициента яркости, явно включающей альbedo поверхности [7], доли фракций частиц [2], а также значения коэффициента яркости на некоторой сетке искомым параметров. Для быстрого нахождения коэффициентов яркости используются LUT-таблицы [2] или быстрые численные алгоритмы [3]. В работе [6] предлагается использовать малопараметрическую аналитическую формулу, аппроксимирующую коэффициенты яркости по их значениям из LUT-таблиц. Искомые параметры находятся из условия минимального отклонения модельного и измеренного коэффициентов яркости для выбранных длин волн.

Перечисленные алгоритмы широко используются для восстановления свойств аэрозоля. Тем не менее задача не может считаться до конца решенной. Во-первых, используемая аналитическая формула, связывающая коэффициент яркости с альbedo поверхности и долями фракций частиц, является приближенной. Она получена в предположении о малом вкладе отражения излучения от подстилающей поверхности в коэффициент яркости и в предположении о непоглощении излучения на частицах аэрозоля.

Во-вторых, в алгоритмах используются априорные предположения о распределении частиц аэрозоля по размерам и о значениях показателя преломления. Для повышения точности алгоритма восстановления такие распределения выбираются из данных наземных измерений; могут использоваться отдельные модели для тропосферного и стратосферного аэрозолей [3]. Тем не менее неопределенность в задании модели аэрозоля влияет на точность алгоритма восстановления.

\* Ольга Васильевна Николаева (nika@kiam.ru); Александр Геннадьевич Чебыкин (agchebykin@gmail.com).

В-третьих, решение задачи является не единственным, поскольку разным наборам параметров отвечает одно и то же значение коэффициента яркости [1].

В настоящей работе предлагается алгоритм, в котором в некоторой мере преодолены перечисленные недостатки: 1) алгоритм опирается на точную формулу, связывающую альбедо поверхности и коэффициент яркости [8]; 2) для восстановления выбирается спектральный интервал в окрестности 0,4 мкм, где существенно рэлеевское рассеяние. В этом случае рассеяние назад, вносящее основной вклад в коэффициент яркости отраженного излучения, определяется не столько неизвестной аэрозольной индикатрисой, сколько известной рэлеевской.

Для выбора единственного решения предлагается рассматривать спектральную зависимость оптических параметров на выбранном спектральном интервале.

## Построение модельного коэффициента яркости

Рассмотрим уравнение переноса излучения в плоском слое

$$\begin{aligned} \hat{T}_\lambda I_\lambda &= \mu \frac{\partial I_\lambda}{\partial \tau} + I_\lambda(\tau, \mu, \varphi) - \\ &- \omega_0(\lambda) \int_{-1}^1 d\mu' \int_0^{2\pi} d\varphi' P(\gamma_s, \lambda) I_\lambda(\tau, \mu', \varphi') = 0, \quad (1) \\ 0 < \tau < \tau^*(\lambda), \quad -1 < \mu < 1, \quad 0 < \varphi < 2\pi, \end{aligned}$$

где  $I_\lambda(\tau, \mu, \varphi)$  — интенсивность излучения с длиной волны  $\lambda$  в точке слоя  $\tau$  в направлении, определенном сферическими координатами  $\mu, \varphi$ ;  $\tau^*(\lambda)$  — оптическая толщина слоя;  $\omega_0(\lambda)$  — альбедо однократного рассеяния;  $P(\gamma_s, \lambda)$  — индикатриса рассеяния. Косинус угла рассеяния  $\gamma_s$  определяется соотношением

$$\gamma_s = \mu\mu' + \sqrt{1-\mu^2}\sqrt{1-(\mu')^2}\cos(\varphi-\varphi').$$

Краевые условия для уравнения (1) имеют вид

$$I_\lambda(0, \mu, \varphi) = I_{0,\lambda} \delta(\mu - \mu_0) \delta(\varphi) \quad \text{при } \mu > 0, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} I_\lambda(\tau^*(\lambda), \mu, \varphi) &= A^s(\lambda) \frac{1}{\pi} \int_0^1 d\mu' \mu' \int_0^{2\pi} d\varphi' I_\lambda(\tau^*(\lambda), \mu', \varphi') \\ &\quad \text{при } \mu < 0, \quad (3) \end{aligned}$$

где  $I_{0,\lambda}$  — поток внеатмосферного излучения;  $\mu_0$  — косинус зенитного угла Солнца;  $A^s(\lambda)$  — альбедо подстилающей поверхности. В краевом условии (3) подстилающая поверхность считается ламбертовой.

Коэффициент яркости отраженного в зенит излучения определяется выражением

$$R_\lambda = \pi I_\lambda(0, -1, 0) / (\mu_0 I_{0,\lambda}). \quad (4)$$

Учитываются процессы рэлеевского рассеяния и взаимодействия с аэрозолями. Оптическая толщина

на  $\tau^*(\lambda)$  является суммой рэлеевской и аэрозольной оптических толщин

$$\tau^*(\lambda) = \tau^R(\lambda) + \tau^a(\lambda).$$

Аэрозольная оптическая толщина определяется равенством

$$\tau^a(\lambda) = \int_0^H dz \sigma(\lambda, z) \rho_0(z).$$

Здесь  $\rho_0(z)$  — концентрация частиц аэрозоля (частиц/км $\cdot$ см $^2$ ) в точке  $z$  слоя высоты  $H$  (км);

$$\sigma(\lambda, z) = \int_0^\infty \bar{\sigma}(\lambda, r) \frac{dN(r, z)}{d \ln r} d \ln r$$

— сечение экстинкции (см $^2$ ), усредненное по ансамблю частиц,  $\bar{\sigma}(\lambda, r)$  — сечение экстинкции одной частицы (см $^2$ ) радиуса  $r$ ,  $dN(r, z)/d \ln r$  — функция распределения частиц по размерам в точке  $z$ , нормированная следующим образом:

$$\int_0^\infty \frac{dN(r, z)}{d \ln r} d \ln r = 1.$$

Предположим, что микрофизические свойства аэрозоля одинаковы во всем слое, т.е. функция распределения  $dN(r, z)/d \ln r$  не зависит от  $z$ . Тогда и коэффициент  $\sigma(\lambda, z)$  не зависит от координаты  $z$  и справедливо равенство

$$\tau^a(\lambda) = \sigma(\lambda) \rho, \quad (5)$$

где  $\rho = \int_0^H dz \rho_0(z)$  — содержание частиц аэрозоля во всем столбе атмосферы (частиц/см $^2$ ).

Альбедо однократного рассеяния  $\omega_0(\lambda)$  и индикатриса  $P(\gamma_s, \lambda)$  имеют вид

$$\omega_0 = \frac{\omega^a(\lambda) \tau^a(\lambda) + \tau^R(\lambda)}{\tau^a(\lambda) + \tau^R(\lambda)}, \quad (6)$$

$$\begin{aligned} P(\gamma_s, \lambda) &= (\tau^a(\lambda) \omega^a(\lambda) p^a(\gamma_s, \lambda) + \tau^R(\lambda) p^R(\gamma_s)) \times \\ &\quad \times (\tau^a(\lambda) \omega^a(\lambda) + \tau^R(\lambda))^{-1} \quad (7) \end{aligned}$$

( $\omega^a(\lambda)$  и  $p^a(\gamma_s, \lambda)$  — альбедо однократного рассеяния и индикатриса рассеяния на частицах аэрозоля;  $\tau^R(\lambda)$  и  $p^R(\gamma_s)$  — оптическая толщина и индикатриса рэлеевского рассеяния).

Параметризация решения задачи (1)–(7) производится в четыре этапа. На первом этапе вводится параметризация по альбедо поверхности  $A^s(\lambda)$ . Для этого определяются базовые функции  $I_\lambda^b(z, \mu, \varphi)$  и  $I_\lambda^w(z, \mu, \varphi)$  как решения уравнения переноса (1) с «черной» и «белой» подстилающими поверхностями соответственно:

$$\hat{T}_\lambda I_\lambda^b = 0, \quad I_\lambda^b(0, \mu, \varphi)|_{\mu>0} = I_{0,\lambda} \delta(\mu - \mu_0) \delta(\varphi),$$

$$I_\lambda^b(\tau^*(\lambda), \mu, \varphi)|_{\mu<0} = 0, \quad (8)$$

$$\hat{T}_\lambda I_\lambda^w = 0, \quad I_\lambda^w(0, \mu, \varphi)|_{\mu>0} = I_{0,\lambda} \delta(\mu - \mu_0) \delta(\varphi),$$

$$I_\lambda^w(\tau^*(\lambda), \mu, \varphi)|_{\mu<0} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} d\varphi' \int_0^1 d\mu' \mu' I_\lambda^w(\tau^*(\lambda), \mu', \varphi'). \quad (9)$$

Тогда решением задачи (1)–(7) является линейная комбинация этих функций [8]:

$$I_\lambda(\tau, \mu, \varphi) = (1 - \beta) I_\lambda^b(\tau, \mu, \varphi) + \beta I_\lambda^w(\tau, \mu, \varphi), \quad (10)$$

где параметр  $\beta$  определяется равенством

$$\beta = A_\lambda^s T_\lambda^b / [T_\lambda^w (1 - A_\lambda^s) + A_\lambda^s T_\lambda^b], \quad (11)$$

величины  $T_\lambda^b$  и  $T_\lambda^w$  суть коэффициенты пропускания:

$$T_\lambda^b = \frac{1}{\pi I_{0,\lambda}} \int_0^{2\pi} d\varphi' \int_0^1 d\mu' \mu' I_\lambda^b(\tau^*(\lambda), \mu', \varphi'),$$

$$T_\lambda^w = \frac{1}{\pi I_{0,\lambda}} \int_0^{2\pi} d\varphi' \int_0^1 d\mu' \mu' I_\lambda^w(\tau^*(\lambda), \mu', \varphi'). \quad (12)$$

Определив коэффициенты яркости  $R_\lambda^b$ ,  $R_\lambda^w$  для модельных задач

$$R_\lambda^b = \pi I_\lambda^b(0, -1, 0) / (\mu_0 I_{0,\lambda}),$$

$$R_\lambda^w = \pi I_\lambda^w(0, -1, 0) / (\mu_0 I_{0,\lambda}), \quad (13)$$

из равенства (10) можно найти коэффициент яркости (4):

$$R_\lambda = (1 - \beta) R_\lambda^b + \beta R_\lambda^w. \quad (14)$$

На втором этапе выполняется параметризация решения задач (8) и (9) при фиксированной  $\lambda$ . Выбирается индикатриса рассеяния на частицах аэрозоля  $p^a(\gamma_s, \lambda)$  и вводятся сетки по следующим параметрам:

– зенитный угол Солнца:

$$\mu_{0,j} = \cos(\theta_{0,j}), \quad \theta_{0,j} = \theta_{0,j-1} + \Delta\theta, \quad j = 1, \dots, J \quad (15)$$

( $j$  – индекс,  $J$  – максимальное значение);

– аэрозольная оптическая толщина:

$$\tau_\ell^a = \tau_{\ell-1}^a + \Delta\tau^a, \quad \ell = 1, \dots, L; \quad (16)$$

– оптическая толщина рэлеевского рассеяния:

$$\tau_k^R = \tau_{k-1}^R + \Delta\tau^R, \quad k = 1, \dots, K; \quad (17)$$

– альbedo однократного рассеяния на частицах аэрозоля:

$$\omega_{0,n}^a = \omega_{0,n-1}^a + \Delta\omega_0^a, \quad n = 1, \dots, N. \quad (18)$$

Для каждой четверки значений  $\{\mu_{0,j}, \tau_\ell^a, \tau_k^R, \omega_{0,n}^a\}$  находятся решения задач (8) и (9) при следующих значениях параметров (см. равенства (6), (7)):

$$\omega_0 = \frac{\omega_{0,n}^a \tau_\ell^a + \tau_k^R}{\tau_\ell^a + \tau_k^R},$$

$$P(\gamma_s, \lambda) = \left( \tau_\ell^a \omega_{0,n}^a p^a(\gamma_s, \lambda) + \tau_k^R p^R(\gamma_s) \right) \times$$

$$\times \left( \omega_{0,n}^a \tau_\ell^a + \tau_k^R \right)^{-1}. \quad (19)$$

Рэлеевская индикатриса рассеяния  $p^R(\gamma_s)$  известна. В расчетах определяются значения коэффициентов яркостей  $R_{j,\ell,k,n}^b$ ,  $R_{j,\ell,k,n}^w$  (см. (13)) и пропускания  $T_{j,\ell,k,n}^b$ ,  $T_{j,\ell,k,n}^w$  (см. (12)) во всех узлах сеток (15)–(18).

Для каждого фиксированного значения косинуса зенитного угла  $\mu_{0,j}$  методом наименьших квадратов строится алгебраическая аппроксимация полученных величин

$$R_j^d(\tau^a, \tau^R, \omega_0^a) = \sum_m \sum_{m'} \sum_{m''} r_{j,m,m',m''}^d (\tau^a)^m (\tau^R)^{m'} (\omega_0^a)^{m''},$$

$$T_j^d(\tau^a, \tau^R, \omega_0^a) = \sum_m \sum_{m'} \sum_{m''} t_{j,m,m',m''}^d (\tau^a)^m (\tau^R)^{m'} (\omega_0^a)^{m''},$$

$$d = b, w.$$

Используется алгебраическая аппроксимация невысокого (не выше третьего) порядка. Такая аппроксимация в данном случае допустима, поскольку зависимость функций  $R_j^d(\tau^a, \tau^R, \omega_0^a)$  и  $T_j^d(\tau^a, \tau^R, \omega_0^a)$  от оптических толщин и альbedo однократного рассеяния является монотонной.

Далее для каждой тройки  $m, m', m''$  на сетке  $\{\mu_{0,j}\}$  по косинусу зенитного угла Солнца строится кубический сплайн для аппроксимации функций, в узлах этой сетки принимающих значения  $r_{j,m,m',m''}^d$  и  $t_{j,m,m',m''}^d$ . Сплайн-интерполяция выбирается здесь потому, что зависимость величин  $r_{j,m,m',m''}^d$  и  $t_{j,m,m',m''}^d$  от косинуса зенитного угла  $\mu_0$  не является монотонной и алгебраическая аппроксимация может обладать большой погрешностью.

В результате находятся следующие полиномиальные аппроксимации для коэффициентов яркости и пропускания модельных задач (8), (9):

$$R^d(\tau^a, \tau^R, \omega_0^a, \mu_0) =$$

$$= \sum_m \sum_{m'} \sum_{m''} r_{m,m',m''}^d(\mu_0) (\tau^a)^m (\tau^R)^{m'} (\omega_0^a)^{m''}, \quad (20)$$

$$T^d(\tau^a, \tau^R, \omega_0^a, \mu_0) =$$

$$= \sum_m \sum_{m'} \sum_{m''} t_{m,m',m''}^d(\mu_0) (\tau^a)^m (\tau^R)^{m'} (\omega_0^a)^{m''},$$

$$d = b, w. \quad (21)$$

На третьем этапе вводится зависимость величин (20) и (21) от длины волны. Для представления оптической толщины аэрозоля используется формула Ангстрема

$$\tau^a(\lambda) = \tau^a(\lambda_0) (\lambda/\lambda_0)^{-\alpha}, \quad (22)$$

где  $\alpha$  – показатель Ангстрема;  $\lambda_0$  – базовая длина волны. Для задания оптической толщины рэлеевского рассеяния используется выражение [9]:

$$\tau^R(\lambda) = P_R \frac{0,008569}{\lambda^4} \quad (23)$$

( $P_R$  — давление в данной точке земной поверхности (атм)).

Индикатриса и альbedo однократного рассеяния на частицах аэрозоля  $p^a(\gamma_s, \lambda)$  и  $\omega_0^a$  считаются не зависящими от длины волны.

На четвертом этапе подставляем равенства (22)–(23) в (20)–(21) и находим выражения для коэффициентов яркости и пропускания модельных задач:

$$R_\lambda^{d,m} = \tilde{R}_\lambda^{d,m}(\tau^a(\lambda_0), \alpha, \omega_0^a, \mu_0, \lambda), \quad (24)$$

$$T_\lambda^{d,m} = \tilde{T}_\lambda^{d,m}(\tau^a(\lambda_0), \alpha, \omega_0^a, \mu_0, \lambda), \quad d = b, w. \quad (25)$$

Отметим, что  $\tilde{R}_\lambda^{d,m}$ ,  $\tilde{T}_\lambda^{d,m}$  суть полиномиальные функции своих аргументов.

Подставляя соотношения (24) и (25) в равенства (11) и (14), получаем аналитическое представление для коэффициента яркости в задаче с заданными альbedo подстилающей поверхности  $A_\lambda^s$  и параметрами аэрозоля  $\tau^a(\lambda_0)$ ,  $\alpha$ ,  $\omega_0^a$  для фиксированного косинуса зенитного угла Солнца  $\mu_0$ :

$$R_\lambda^m = \tilde{R}_\lambda^m(\tau^a(\lambda_0), \alpha, \omega_0^a, \mu_0, A_\lambda^s, \lambda). \quad (26)$$

В то же время из формул (11) и (14) можно найти альbedo поверхности по значениям коэффициента яркости:

$$A_\lambda^m = \beta T_\lambda^{w,m} / [\beta T_\lambda^{w,m} + T_\lambda^{b,m}(1 - \beta)],$$

$$\beta = [R_\lambda - R_\lambda^{b,m}] / [R_\lambda^{w,m} - R_\lambda^{b,m}]. \quad (27)$$

Используя выражения (24) и (25), получаем функцию

$$A_\lambda^m = \tilde{A}_\lambda^m(\tau^a(\lambda_0), \alpha, \omega_0^a, \mu_0, \lambda, R_\lambda). \quad (28)$$

Заметим, что погрешность моделей (26) и (28) определяется ошибкой, вносимой предположением о независимости аэрозольной индикатрисы  $p^a(\gamma_s, \lambda)$  от длины волны. Эта ошибка в значительной степени нивелируется тем фактом, что в рассматриваемом спектральном интервале в окрестности 0,4 мкм существенно рэлеевское рассеяние. Поэтому рассеяние назад, вносящее основной вклад в коэффициент яркости отраженного излучения, определяется не столько неизвестной аэрозольной индикатрисой, сколько известной рэлеевской.

Чтобы показать это, рассмотрим модель морского аэрозоля [10], заданную двухкомпонентной логнормальной функцией распределения частиц по размерам

$$\frac{dN}{d \ln r} = \sum_{i=1}^2 C_i \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_i} \exp(-(\ln r - \ln r_i)^2 / 2\sigma_i^2) \quad (29)$$

со следующими значениями параметров:

$$r_1 = 0,074 \text{ мкм}; \quad r_2 = 0,55 \text{ мкм};$$

$$\sigma_1 = 0,48; \quad \sigma_2 = 0,11. \quad (30)$$

Используем следующие показатели преломления для каждой компоненты:

$$m_1 = 1,415 - 0,002i; \quad m_2 = 1,363 - 3 \cdot 10^{-9}i. \quad (31)$$

На рис. 1 для  $\lambda = 0,4$  мкм представлены две аэрозольные индикатрисы рассеяния, отвечающие мелкой и крупной компонентам морского аэрозоля, рэлеевская индикатриса и суммарные индикатрисы  $P(\gamma_s, \lambda)$ . Индикатрисы  $P(\gamma_s, \lambda)$  получены по формуле (7) с рэлеевской оптической толщиной (23) и аэрозольной оптической толщиной  $\tau^a(\lambda_0) = 0,25$ . Можно видеть, что в области больших углов рассеяния обе суммарные индикатрисы близки, несмотря на большое отличие аэрозольных индикатрис.

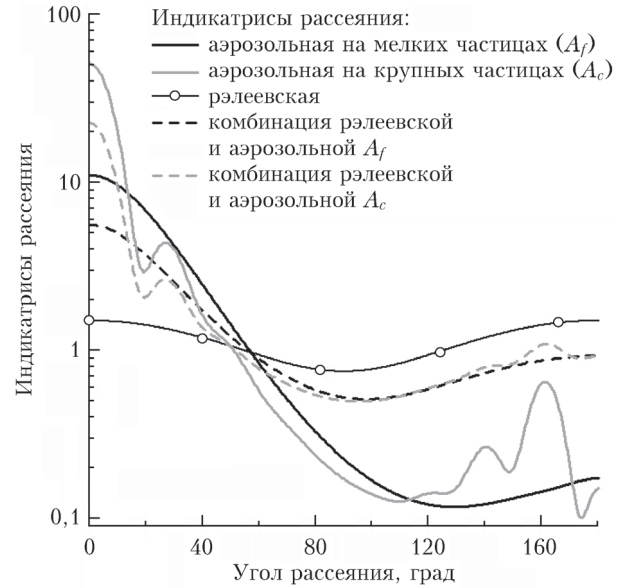


Рис. 1. Индикатрисы рассеяния для  $\lambda = 0,4$  мкм в модели морского аэрозоля

Погрешность, вносимая в суммарную индикатрису  $P(\gamma_s, \lambda)$  заменой в формуле (7) аэрозольной индикатрисы  $p^a(\gamma_s, \lambda)$  на интервале длин волн  $[0,38; 0,42]$  мкм на индикатрису для фиксированной длины волны  $p^a(\gamma_s, \lambda_0)$  при  $\lambda_0 = 0,4$  мкм, для углов рассеяния  $\theta_s \geq 90^\circ$  ( $\gamma_s = \cos\theta_s \leq 0$ ) оценивается по формуле

$$E = \max_{0,38 \leq \lambda \leq 0,42} \max_{\gamma_s \leq 0} \left| \frac{1 - P(\gamma_s, \lambda)}{P(\gamma_s, \lambda_0)} \right| \cdot 100\%. \quad (32)$$

Отклонения  $E$  для различных значений доли мелкой фракции  $C_1$  (доля крупной фракции  $C_2 = 1 - C_1$ ) и аэрозольной оптической толщины  $\tau^a(\lambda_0)$  приведены в табл. 1. Можно видеть, что отклонения  $E$  слабо зависят от величины  $C_1$ . С ростом аэрозольной оптической толщины  $\tau^a(\lambda_0)$  отклонение  $E$  возрастает, принимая значения от 4 до 19%.

Погрешность, которая вносится в коэффициент яркости из-за замены в формуле (7) аэрозольной индикатрисы  $p^a(\gamma_s, \lambda)$  на индикатрису для фиксированной длины волны  $p^a(\gamma_s, \lambda_0)$ , определим формулой

Таблица 1

Максимальные отклонения (32) суммарных индикатрис для различных значений доли мелкой фракции  $C_1$  и аэрозольной оптической толщины  $\tau^a(\lambda_0)$ , %

$C_1$	$\tau^a(\lambda_0)$					
	0,05	0,15	0,25	0,35	0,45	0,55
0,0	4,089	9,230	12,333	15,043	17,214	18,958
0,1	4,088	9,227	12,328	15,035	17,203	18,945
0,2	4,087	9,223	12,323	15,024	17,190	18,930
0,3	4,085	9,218	12,315	15,011	17,174	18,911
0,4	4,083	9,212	12,306	14,994	17,153	18,885
0,5	4,080	9,203	12,293	14,970	17,123	18,849
0,6	4,075	9,190	12,273	14,935	17,079	18,797
0,7	4,067	9,169	12,241	14,878	17,007	18,712
0,8	4,052	9,129	12,179	14,770	16,871	18,550
0,9	4,012	9,020	12,012	14,484	16,512	18,121
1,0	3,550	7,744	10,009	11,867	13,170	14,078

$$\zeta = \max_{0,38 \leq \lambda \leq 0,42} \left| \frac{1 - R(\lambda, \lambda)}{R(\lambda, \lambda_0)} \right| \cdot 100\%, \quad (33)$$

где  $R(\lambda, \lambda_0)$  – коэффициент яркости для длины волны  $\lambda$ , найденный решением краевой задачи (1)–(7)

с помощью сеточного метода дискретных ординат [11], когда аэрозольная индикатриса рассеяния получена по теории Ми для длины волны  $\lambda_0$ .

Найдем значения погрешности  $\zeta$  отдельно при учете рэлеевского рассеяния и без него. В первом случае оптическая толщина  $\tau^R(\lambda)$  определяется по формуле (23), во втором случае она полагается равной нулю. Можно видеть (табл. 2), что без учета рэлеевского рассеяния погрешность  $\zeta$  достигает 8%, тогда как с его учетом – 2%. Учет рэлеевского рассеяния снижает погрешность  $\zeta$  в среднем в 8 раз. Погрешность, которая вносится в коэффициент яркости из-за изменений микрофизических свойств аэрозоля, оценим по формуле

$$\xi = |1 - R_{\lambda_0}(C_1)/R_{\lambda_0}(0,5)| \cdot 100\%. \quad (34)$$

Величина  $\xi$  есть отклонение коэффициентов яркости для различных значений доли мелкого аэрозоля  $C_1$  при фиксированной  $\lambda_0 = 0,4$  мкм. Можно видеть (табл. 3), что при учете рэлеевского рассеяния отклонение  $\xi$  не превышает 2%; если рэлеевское рассеяние не учитывается, отклонение  $\xi$  достигает 27%.

Таблица 2

Отклонение коэффициентов яркости (33)

$C_1$	$\tau^a(\lambda_0)$											
	с учетом рэлеевского рассеяния						без учета рэлеевского рассеяния					
	0,05	0,15	0,25	0,35	0,45	0,55	0,05	0,15	0,25	0,35	0,45	0,55
0,0	0,22	0,67	1,12	1,54	1,93	2,29	4,86	5,91	6,72	7,34	7,81	8,15
0,1	0,19	0,57	0,95	1,32	1,65	1,96	4,31	5,24	5,94	6,46	6,85	7,14
0,2	0,15	0,47	0,79	1,09	1,38	1,64	3,71	4,51	5,10	5,53	5,85	6,07
0,3	0,12	0,37	0,63	0,87	1,10	1,31	3,06	3,72	4,19	4,54	4,79	4,96
0,4	0,08	0,27	0,46	0,64	0,82	0,98	2,35	2,86	3,22	3,49	3,67	3,79
0,5	0,05	0,17	0,29	0,42	0,53	0,64	1,57	1,93	2,19	2,37	2,50	2,58
0,6	0,02	0,07	0,13	0,19	0,25	0,31	1,61	1,02	1,08	1,19	1,27	1,33
0,7	0,02	0,06	0,09	0,10	0,11	0,12	1,98	1,59	1,29	1,05	0,86	0,71
0,8	0,04	0,13	0,20	0,26	0,31	0,35	2,40	2,24	2,09	1,97	1,86	1,77
0,9	0,08	0,23	0,36	0,48	0,59	0,68	2,89	2,98	3,01	3,00	2,97	2,93
1,0	0,09	0,28	0,46	0,62	0,77	0,91	3,68	3,96	4,11	4,20	4,22	4,21

Примечание. Зенитный угол Солнца  $45^\circ$ ;  $\lambda_0 = 0,4$  мкм; черная подстилающая поверхность ( $A^s(\lambda) = 0$ ). То же самое для табл. 3.

Таблица 3

Отклонение коэффициентов яркости (34)

$C_1$	$\tau^a(\lambda_0)$											
	с учетом рэлеевского рассеяния						без учета рэлеевского рассеяния					
	0,05	0,15	0,25	0,35	0,45	0,55	0,05	0,15	0,25	0,35	0,45	0,55
0,0	0,29	0,78	1,15	1,44	1,66	1,83	26,69	22,55	19,27	16,63	14,49	12,72
0,1	0,23	0,62	0,92	1,15	1,33	1,46	21,31	17,99	15,35	13,24	11,53	10,11
0,2	0,17	0,46	0,69	0,86	0,99	1,09	15,96	13,45	11,47	9,88	8,60	7,54
0,3	0,11	0,31	0,46	0,57	0,66	0,72	10,62	8,94	7,61	6,56	5,70	4,99
0,4	0,05	0,15	0,22	0,28	0,32	0,36	5,30	4,45	3,79	3,26	2,83	2,48
0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,6	0,05	0,15	0,22	0,28	0,32	0,36	5,28	4,43	3,76	3,23	2,80	2,45
0,7	0,11	0,3	0,45	0,56	0,65	0,72	10,54	8,84	7,50	6,43	5,57	4,87
0,8	0,17	0,46	0,68	0,85	0,97	1,07	15,78	13,22	11,21	9,61	8,32	7,26
0,9	0,23	0,61	0,9	1,13	1,30	1,43	21	17,58	14,89	12,75	11,03	9,63
1,0	0,29	0,76	1,13	1,41	1,62	1,78	26,21	21,91	18,54	15,87	13,72	11,96



Таким образом, приведенные в табл. 2 и 3 данные показывают, что рэлеевское рассеяние существенно снижает зависимость коэффициента яркости от аэрозольной индикатрисы. Этот факт позволяет использовать модельный коэффициент яркости, полученный в предположении о независимости аэрозольной индикатрисы от длины волны.

### Алгоритм восстановления параметров аэрозоля по измеренным значениям коэффициента отраженной яркости

Восстановление параметров аэрозоля начинается с определения типа граничной поверхности и выбора характерного для поверхности данного типа альbedo  $A_\lambda^s$ . Тип поверхности может быть определен с помощью анализа значений измеренного коэффициента яркости во всем спектре (включая ИК-диапазон).

Алгоритм восстановления опирается на функции (26) и (28). В качестве решения обратной задачи выбираются такие значения параметров  $\tau^a(\lambda_0)$ ,  $\alpha$ ,  $\omega_0^a$ , для которых выполнены два условия:

$$|1 - C| < e, \quad (35)$$

$$C = \frac{\sum_{\lambda} \tilde{A}_\lambda^m(\tau^a(\lambda_0), \alpha, \omega_0^a, \mu_0, \lambda, R_\lambda^{\text{md}})}{\sum_{\lambda} A_\lambda^s},$$

$$G = \sum_{\lambda} [R_\lambda^{\text{md}} - \tilde{R}_\lambda^m(\tau^a(\lambda_0), \alpha, \omega_0^a, \mu_0, C \cdot A_\lambda^s, \lambda)]^2 \rightarrow \min, \quad (36)$$

где  $R_\lambda^{\text{md}}$  — измеренное значение коэффициента яркости. Условие (35) устанавливает, что альbedo поверхности лежит в окрестности характерного альbedo  $A_\lambda^s$ ;  $e$  — априори заданное допустимое отклонение. Условие (36) требует минимального отклонения измеренных и модельных коэффициентов яркости, если модельные коэффициенты получены с альbedo поверхности, равным  $C \cdot A_\lambda^s$ .

### Метод решения уравнений (35) и (36)

При решении задач (35) и (36) методом, например, градиентного спуска возникает проблема локальных минимумов. Поэтому необходимо проверять выполнение условий (35) и (36) для наборов значений параметров, заданных на некоторых достаточно густых сетках  $\{\tau^a(\lambda_0)_i\}$ ,  $\{\alpha_{i'}\}$ ,  $\{\omega_0^a_{i''}\}$ . При этом, задавая границы этих сеток, можно вводить дополнительные ограничения на восстанавливаемые параметры.

Однако обычный перебор всех значений  $\{\tau^a(\lambda_0)_i\}$ ,  $\{\alpha_{i'}\}$ ,  $\{\omega_0^a_{i''}\}$  требует больших временных затрат. При не черной поверхности ( $A_\lambda^s > 0$ ) условие (35) с помощью равенства (27) можно преобразовать к виду

$$(1 - e)A_\lambda^s < \frac{1}{1 + \frac{T_\lambda^{b,m}(R_\lambda^{w,m} - R_\lambda^{\text{md}})}{T_\lambda^{w,m}(R_\lambda^{\text{md}} - R_\lambda^{b,m})}} < (1 + e)A_\lambda^s. \quad (37)$$

Эти неравенства могут быть записаны в следующей форме:

$$A^+ T_\lambda^{w,m}(R_\lambda^{\text{md}} - R_\lambda^{b,m}) < T_\lambda^{b,m}(R_\lambda^{w,m} - R_\lambda^{\text{md}}) < A^- T_\lambda^{w,m}(R_\lambda^{\text{md}} - R_\lambda^{b,m}), \quad (38)$$

где

$$A^+ = \frac{1 - (1 + e)A_\lambda^s}{(1 + e)A_\lambda^s}, \quad A^- = \frac{1 - (1 - e)A_\lambda^s}{(1 - e)A_\lambda^s}.$$

Поскольку  $R_\lambda^{b,m}$ ,  $T_\lambda^{b,m}$ ,  $R_\lambda^{w,m}$ ,  $T_\lambda^{w,m}$  определяются полиномиальными функциями восстанавливаемых параметров (см. (24) и (25)), все части неравенств (38) при фиксированном значении  $\mu_0$  представляют собой полиномы относительно величин  $\tau^a(\lambda_0)$ ,  $\alpha$ ,  $\omega_0^a$ . Из условия (38) для каждого значения  $\omega_0^a$  можно получить допустимые интервалы значений  $\tau^a(\lambda_0)$  и  $\alpha$ . В дальнейшем в найденных допустимых интервалах строятся сетки  $\{\tau^a(\lambda_0)_i\}$ ,  $\{\alpha_{i'}\}$ ; в интервалах этих сеток и выполняется поиск точки минимума функционала (36). Такой алгоритм в тестовых задачах дает выигрыш по времени 1–2 порядка по сравнению с методом прямого перебора. Отметим, что похожий метод решения реализован в [1].

### Результаты тестирования алгоритма

Проанализируем результаты тестирования предложенного алгоритма на модельных задачах с морским аэрозолем и подстилающей поверхностью с травянистой растительностью (пшеница, кукуруза). Тестирование производится в спектральном интервале [0,38 мкм; 0,42 мкм] с шагом разбиения 1 нм. В качестве базовой выбирается длина волны  $\lambda_0 = 0,4$  мкм

Рассматривается модель морского аэрозоля (29)–(31) при  $C_1 = 0,15$ ;  $C_2 = 0,85$ . По теории Ми для выбранного аэрозоля находятся индикатриса  $p^a(\gamma_s, \lambda)$ , альbedo однократного рассеяния  $\omega_0^a(\lambda) \approx 0,996$ , а также сечение экстинкции  $\sigma(\lambda)$ . Из формулы Ангстрема (22) и определения (5) вычисляется показатель  $\alpha = 1,6$ .

Для построения модельных коэффициентов яркости  $\tilde{R}_\lambda^m$ ,  $\tilde{R}_\lambda^{b,m}$ ,  $\tilde{R}_\lambda^{w,m}$  и пропускания  $\tilde{T}_\lambda^{b,m}$ ,  $\tilde{T}_\lambda^{w,m}$  вводятся сетки (15)–(18) с шагами  $\Delta\theta = 10^\circ$ ;  $\Delta\tau^a = 0,1$ ;  $\Delta\tau^R = 0,1$ ;  $\Delta\omega_0^a = 0,05$ ; принимается индикатриса рассеяния для базовой длины волны  $p^a(\gamma_s, \lambda_0)$ . Модельные коэффициенты являются функциями четырех параметров  $\tau^a(\lambda_0)$ ,  $\alpha$ ,  $\omega_0^a$ ,  $\mu_0$  и альbedo поверхности  $A_\lambda^s$  (см. соотношения (24)–(26)).

Для нахождения «измеренных» коэффициентов яркости  $R_\lambda^{\text{md}}$ ,  $R_\lambda^{b,\text{md}}$ ,  $R_\lambda^{w,\text{md}}$  и пропускания  $T_\lambda^{b,\text{md}}$ ,  $T_\lambda^{w,\text{md}}$  вводятся сетки (15) и (16) с шагами  $\Delta\theta = 5^\circ$ ;  $\Delta\tau^a = 0,1$ . При заданной оптической толщине для базовой длины волны  $\tau^a(\lambda_0)$  с помощью равенства (5) определяются оптические толщины на других длинах волн:

$$\tau^a(\lambda) = \tau^a(\lambda_0)\sigma(\lambda)/\sigma(\lambda_0). \quad (39)$$

Принимаются индикатрисы  $p^a(\gamma_s, \lambda)$  и альbedo однократного рассеяния  $\omega_0^a(\lambda)$ , найденные по теории Ми. Толщина рэлеевского рассеяния задается формулой (23).

Альbedo пшеницы  $A_\lambda^{\text{wheat}}$  и кукурузы  $A_\lambda^{\text{corn}}$  принимаются из работы [12. С. 168] и табл. 4.

Находятся решения задачи (1)–(7) и (19); искомые величины  $R_\lambda^{\text{md}}, R_\lambda^{b, \text{md}}, R_\lambda^{w, \text{md}}, T_\lambda^{b, \text{md}}, T_\lambda^{w, \text{md}}$  определяются по формулам (12) и (13). Все задачи для уравнения переноса излучения решаются сеточным методом дискретных ординат [11] с использованием вычислительных ресурсов МСЦ РАН.

Таблица 4  
Альbedo подстилающей поверхности

$\lambda$ , мкм	$A_\lambda^{\text{corn}}$	$A_\lambda^{\text{wheat}}$
0,380	0,030	0,0300
0,385	0,030	0,0294
0,390	0,030	0,0284
0,400	0,032	0,0300
0,405	0,032	0,0355
0,410	0,032	0,0400
0,415	0,033	0,0405
0,420	0,034	0,0410

Сначала оценим точность введенных моделей. Сравним «измеренные» величины и соответствующие модельные значения, полученные при  $\alpha = 1,6$ ;  $\omega_0^a = 0,996$  и выбранных значениях  $\tau^a(\lambda_0)$ ,  $\mu_0$ . Найдем относительные погрешности модельных коэффициентов для различных длин волн по формулам

$$E_R^d(\lambda) = \left\langle \left| 1 - R_\lambda^{d, \text{m}} / R_\lambda^{d, \text{md}} \right| \right\rangle \cdot 100\%,$$

$$E_T^d(\lambda) = \left\langle \left| 1 - T_\lambda^{d, \text{m}} / T_\lambda^{d, \text{md}} \right| \right\rangle \cdot 100\%, \quad d = b, w, \quad (40)$$

$$E(\lambda) = \left\langle \left| 1 - R_\lambda^{\text{m}} / R_\lambda^{\text{md}} \right| \right\rangle \cdot 100\%, \quad (41)$$

где  $\langle \rangle$  – среднее по параметрам  $\tau^a(\lambda_0)$  и  $\mu_0$ .

Погрешности (40) и (41) имеют три источника:

1. Использование полиномиальных аппроксимаций при построении функций (20) и (21).

2. Применение формулы Ангрстрема (22) вместо точной спектральной зависимости (39).

3. Замена индикатрисы рассеяния  $p^a(\gamma_s, \lambda)$  для всех длин волн  $\lambda$  индикатрисой для базовой длины волны  $p^a(\gamma_s, \lambda_0)$ .

Оценим влияние каждого источника погрешности. При использовании в модельных коэффициентах  $R_\lambda^{\text{m}}$  точной спектральной зависимости (39) и зависящей от длины волны  $p^a(\gamma_s, \lambda)$  индикатрисы рассеяния погрешности (40) и (41) определяются только точностью полиномиальных аппроксимаций (20) и (21) и не превышают 1%. При привлечении формулы Ангрстрема (22) погрешности (40) и (41) возрастают до 3%.

При использовании формулы Ангрстрема и не зависящей от длины волны индикатрисы рассеяния  $p^a(\gamma_s, \lambda_0)$  погрешности (41) возрастают до 3,2%

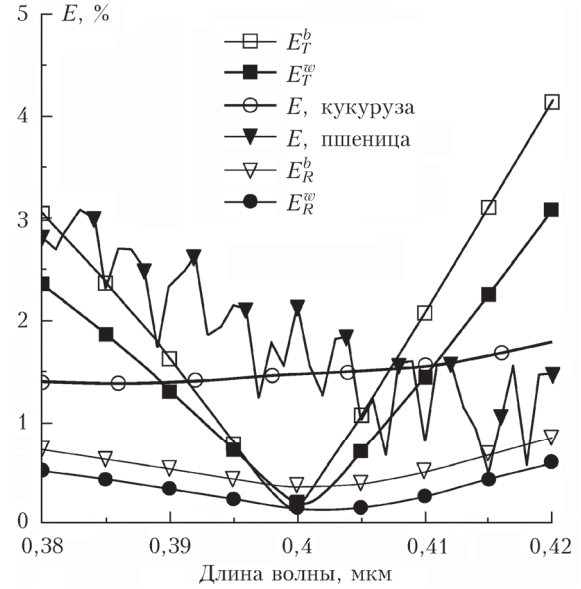


Рис. 2. Средние по углам Солнца ошибки модельных коэффициентов яркости

(рис. 2), хотя погрешности (40) составляющих коэффициенты яркости решений базовых задач  $R_\lambda^{b, \text{m}}, R_\lambda^{w, \text{m}}, T_\lambda^{b, \text{m}}, T_\lambda^{w, \text{m}}$  могут достигать 4,5%.

Построенные модельные коэффициенты яркости используются в алгоритме восстановления оптических параметров. По «измеренным» значениям  $R_\lambda^{\text{md}}$  определяются параметры аэрозоля  $\tau_{\text{retr}}^a(\lambda_0)$ ,  $\omega_{0, \text{retr}}^a$ ,  $\alpha_{\text{retr}}$ . При этом в алгоритме восстановления в неравенстве (35) используется допустимое отклонение  $e = 0,05$ . Находятся ошибки восстановления параметров:

$$\varepsilon_{\tau_0} = \left\langle \left| \tau^a(\lambda_0) - \tau_{\text{retr}}^a(\lambda_0) \right| \right\rangle,$$

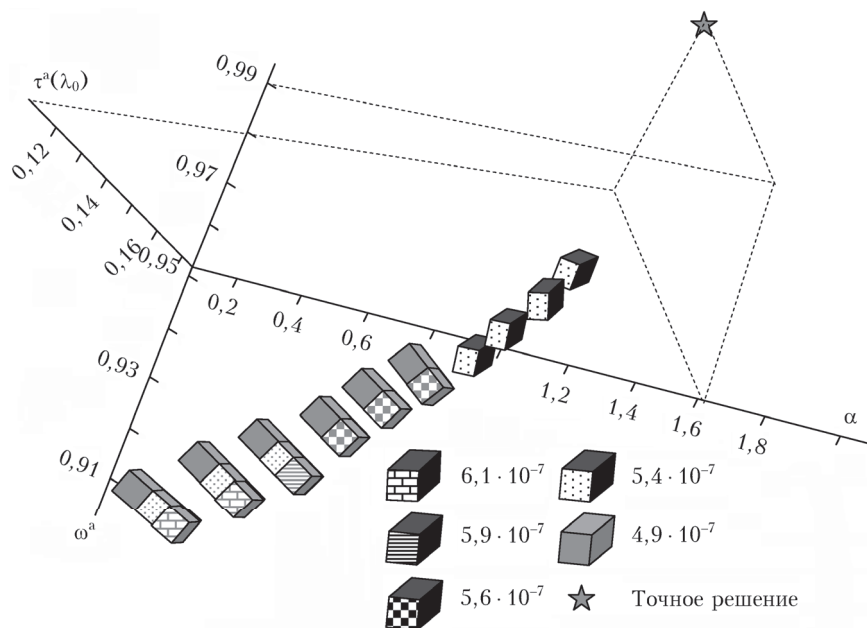
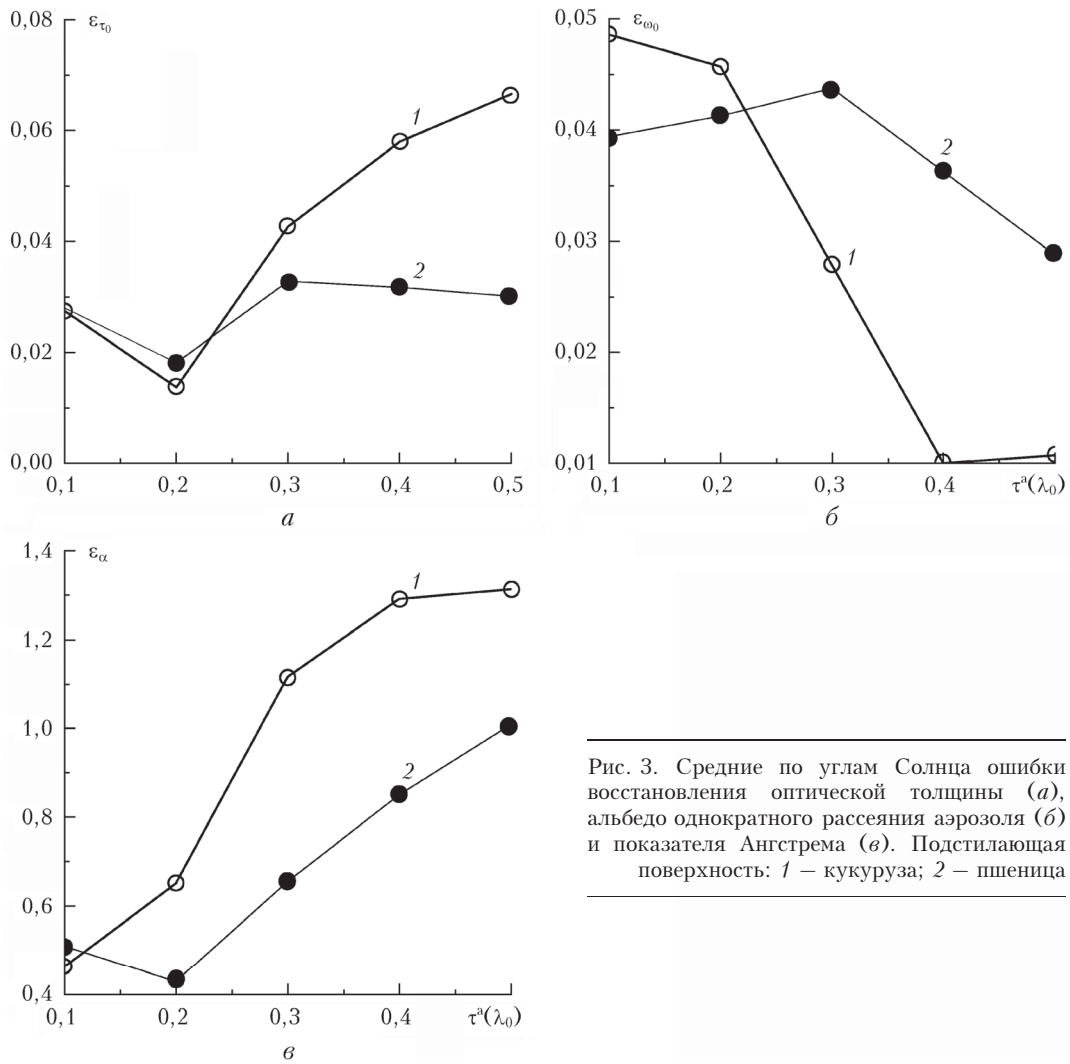
$$\varepsilon_{\omega_0} = \left\langle \left| \omega_0^a - \omega_{0, \text{retr}}^a \right| \right\rangle, \quad \varepsilon_\alpha = \left\langle \left| \alpha - \alpha_{\text{retr}} \right| \right\rangle, \quad (42)$$

где  $\langle \rangle$  – среднее по  $\mu_0$ ; точные значения  $\omega_0^a = 0,996$ ;  $\alpha = 1,6$ . Ошибки (42) как функции точной оптической толщины  $\tau^a(\lambda_0)$  приведены на рис. 3.

Можно видеть, что представленный алгоритм позволяет восстановить значения оптической толщины аэрозоля  $\tau^a(\lambda_0)$  с погрешностью  $\varepsilon_{\tau_0} = 0,03$  при  $\tau^a(\lambda_0) \leq 0,2$  и  $\varepsilon_{\tau_0} = 0,07$  при  $\tau^a(\lambda_0) \leq 0,5$  (рис. 3, а). Погрешность восстановления альbedo однократного рассеяния аэрозоля не превышает  $\varepsilon_{\omega_0} = 0,05$  при точном значении  $\omega_0^a = 0,996$  (рис. 3, б).

При этом погрешность определения оптической толщины  $\tau^a(\lambda_0)$  при альbedo пшеницы меньше, чем при альbedo кукурузы (см. рис. 3, а). Это может быть следствием того, что альbedo кукурузы является фактически линейной функцией длины волны, а альbedo пшеницы имеет сложную нелинейную зависимость (см. табл. 4). Поэтому применение условия (35) в этом случае оказывается более эффективным.

Однако показатель Ангрстрема  $\alpha$  определяется с очень большой погрешностью (рис. 3, в). Причину этого объясняет рис. 4, где представлены отклонения





$G$  (36) модельных и «измеренных» коэффициентов яркости при  $\theta_0 = 60^\circ$ ,  $\tau^a(\lambda_0) = 0,1$ . На рисунке отмечены те области, в которых выполнено условие (35) для альbedo поверхности; штриховка указывает на величину отклонения  $G$ .

Можно видеть, что решение задачи не единственное и если для оптической толщины  $\tau^a(\lambda_0)$  и альbedo однократного рассеяния  $\omega_0^a$  находится небольшой интервал значений, то для показателя  $\alpha$  этот интервал велик.

Таким образом, представленный алгоритм может быть использован для определения только параметров  $\tau^a(\lambda_0)$  и  $\omega_0^a$ , но не для определения показателя  $\alpha$ .

## Заключение

Представлен алгоритм восстановления оптических свойств аэрозоля (оптическая толщина, альbedo однократного рассеяния) по многоспектральным измерениям коэффициента яркости отраженного излучения в окрестности 0,4 мкм. Здесь существенно рэлеевское рассеяние, определяющее рассеяние назад, которое вносит основной вклад в измеренный коэффициент яркости. Таким образом уменьшается зависимость коэффициента яркости от неизвестной аэрозольной индикатрисы.

В алгоритме используется аналитическая формула, описывающая зависимость модельного коэффициента яркости от выбранных параметров атмосферы: аэрозольной и рэлеевской оптических толщин, альbedo однократного рассеяния аэрозоля, косинуса зенитного угла Солнца, альbedo земной поверхности. Спектральная зависимость аэрозольной оптической толщины задается формулой Ангстрема, альbedo однократного рассеяния и индикатриса рассеяния аэрозоля считаются не зависящими от длины волны.

Искомые параметры аэрозоля находятся из двух условий:

1. Минимум отклонения измеренного и модельного коэффициентов яркости.
2. Близость альbedo поверхности и характерного альbedo для поверхности данного типа.

Тип поверхности предварительно определяется анализом значений измеренного коэффициента яркости во всем спектре (включая ИК-диапазон).

Представлены результаты тестирования алгоритма восстановления на модельных задачах с морским аэрозолем и подстилающей поверхностью с травянистой растительностью. Они позволяют сделать следующие выводы:

1. Погрешность модельного коэффициента яркости не превышает 3%.
2. Оптическая толщина аэрозоля на базовой длине волны восстанавливается с погрешностью порядка 10%.
3. Альbedo однократного рассеяния аэрозоля восстанавливается с погрешностью порядка 5%.

4. Показатель Ангстрема не может быть восстановлен, поскольку в его отношении решение обратной задачи не является единственным.

Заметим, что большая точность восстановления могла бы быть получена при более точном учете в модельном коэффициенте яркости модельных индикатрисы рассеяния и коэффициента экстинкции аэрозольных частиц. Однако при решении реальных задач эти величины неизвестны и использование предложенных аппроксимаций для них представляется оправданным.

1. Васильев А.В., Мельникова И.Н. О множественности решений обратной задачи определения оптических параметров рассеивающей атмосферы по дистанционным измерениям // Оптика атмосфер. и океана. 2009. Т. 22, № 2. С. 155–162; Vasilyev A.V., Melnikova I.N. Multiple solutions of the inverse problem of retrieval of scattering-atmosphere optical parameters from remote measurements // Atmos. Ocean. Opt. 2009. V. 22, N 1. P. 49–56.
2. Remer L.A., Tanre D., Kaufman Y.J. Algorithm for remote sensing of tropospheric aerosol from Modes: Collection 5. ATB. Greenbelt, USA. 2002. 87 p.
3. Katsev I.L., Prikhach A.S., Zege E.P., Ivanov A.P., Kokhanovsky A.A. Iterative procedure for retrieval of spectral aerosol optical thickness and surface reflectance from satellite data using fast radiative transfer code and application to MERIS measurements // Satellite Aerosol Remote Sensing over Land. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 2009. P. 101–133.
4. Kassianov E., Ovchinnikov M., Berg L.K., McFarlane S.A., Flynn C. Retrieval of aerosol optical depth in vicinity of broken clouds from reflectance ratios: Sensitivity study // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2009. V. 110. P. 1677–1689. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2009.01.014>.
5. Кабанов М.В., Кабанов Д.М., Сакерин С.М. Методы определения оптической толщи атмосферы и коэффициентов ослабления света с аэрокосмических носителей // Оптика атмосфер. и океана. 1988. Т. 1, № 1. С. 107–114.
6. Катковский Л.В. Параметризация уходящего излучения для быстрой атмосферной коррекции гиперспектральных изображений // Оптика атмосфер. и океана. 2016. Т. 29, № 9. С. 778–784. DOI: 10.15372/AOO20160909.
7. Мишин И.В., Овечкин В.Н. Расчет оптических характеристик поля естественного излучения в земной атмосфере. М.: МИИГАиК, 2000. 58 с.
8. Николаева О.В. Новый алгоритм восстановления альbedo поверхности по данным спутникового зондирования // Оптика атмосфер. и океана. 2016. Т. 29, № 3. С. 204–209. DOI: 10.15372/AOO20160306; Nikolaeva O.V. A new algorithm of retrieving the surface albedo by satellite remote sensing data // Atmos. Ocean. Opt. 2016. V. 29, N 4. P. 342–347.
9. Hansen J.E., Travis L.D. Light scattering in planetary atmospheres // Space Sci. Rev. 1974. V. 16. P. 527–610. DOI: 10.1007/BF00168069.
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 // Междунар. симпоз. «Атмосферная радиация и динамика». СПб., 2011 г. С. 81–82.

12. *Кринов Е.Л.* Спектральная отражательная способность природных образований. М.: Изд-во АН СССР, 1947. 271 с.

***O.V. Nikolaeva, A.G. Chebykin. Algorithm for retrieval of atmospherical aerosol parameters from multispectral data of remote sensing.***

A new algorithm for retrieval of aerosol parameters from multispectral reflectance data of remote sensing for transparent atmosphere is presented. Model reflectance as fractional-polynomial function of parameters being found is used. These parameters are aerosol and Rayleigh optical depths, aerosol single scattering albedo, zenith angle of the sun, albedo of surface. Test results for model problems are given.