«Оптика атмосферы», **3**, № 8 (1990)

УДК 519.68:551.521.14

В.С. Антюфеев, А.Л. Маршак

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА ПО КОЭФФИЦИЕНТУ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЯРКОСТИ

Описан алгоритм восстановления оптических и геометрических параметров растительного слоя по данным коэффициента спектральной яркости отраженного и пропущенного рассеянного солнечного излучения. Алгоритм построен на основе известного метода Ньютона. Приведены формулы для расчета производных коэффициента спектральной яркости по искомым параметрам среды методом Монте-Карло и краткие результаты модельных расчетов по решению обратной задачи.

1. Введение

В последние годы в связи с развитием методов дистанционного зондирования растительности возрастает необходимость разработок алгоритмов решения обратных задач определения оптических и геометрических параметров растительного покрова (РП) по данным о спектральной яркости системы «почва—растительность». Ключевую роль в решении таких задач играет построение моделей отражения от РП. Достаточно полные обзоры существующих моделей содержатся в [1, 2]. Различают два принципиально разных подхода к описанию радиационного режима РП: 1) моделирование растительности геометрическими фигурами с заданными размерами и отражательной способностью; 2) моделирование переноса излучения в сплошной мутной среде, заполненной «листьями» бесконечно малого размера с заданным распределением направления нормали и оптическими свойствами. Если первая модель больше подходит для описания неоднородных редких посевов, то вторая, напротив, применяется для густых неоднородных РП, в которых размеры фитоэлементов малы по сравнению с высотой РП [3]. Существуют и гибридные модели, которые в рамках мутной пластинчатой среды учитывают размеры пластин (см. [4, 5]). Одна из таких моделей использована в [6] для решения задачи методом Монте-Карло.

Первые работы по обращению моделей отражения для растительности были выполнены Гоэлем с коллегами (см. [1] и литература к ней). Им удалось решить обратные задачи для различных моделей как однородных, так и неоднородных РП. Техника решения заключалась в минимизации некоторого квадратичного функционала. В [7] по методике решения обратных задач при помощи метода Монте-Карло [8] восстанавливались оптические параметры посева, модель которого описана в [10]. Модель отражения Нильсона-Кууска была обращена ими же в [4], причем техника восстановления была такова, что восстанавливаемые параметры не могли попасть в «нефизическую» область. Процедуру обращения применяли одновременно к двум наборам оптических параметров в различных спектральных областях и к одному набору геометрических параметров [4].

Цель настоящей статьи — провести обращение модели отражения [6] с помощью метода Монте-Карло. В модели [6] процесс переноса радиации в РП описывается интегральным уравнением переноса в мутной пластинчатой среде, элементы которой имеют фиксированные размеры. Это уравнение решается методом Монте-Карло.

2. Обозначения и постановка задачи

Будем пользоваться обозначениями из [5, 6]: $x = (t, \Omega)$ — точка фазового пространства x, $t = t(z)$ — суммарный индекс листовой поверхности на высоте z, Ω направление движения частицы непосредственно перед столкновением; $\Omega_0 = (\mu_0, \varphi_0)$, $\mu_0 < 0$, $\Omega_0^* = (\mu_0^*, \varphi_0^*)$, $\mu_0^* > 0$ — соответственно векторы направления солнечного излучения и наблюдения, $\Omega_L = (\mu_L, \varphi_L)$ — случайный вектор нормали к поверхности листа. Оптическое расстояние от точки z до верхней границы слоя в направлении Ω равно $r(x) = t(z)G(\Omega)$, где

$$G(\Omega) = \frac{1}{2\pi} \int\limits_{\{\Omega+\}} g_L(\Omega_L) / \Omega\Omega_L / d\Omega_L$$

— средняя проекция нормалей листьев на направление Ω. Эта величина равна коэффициенту ослабления в направлении Ω без учета размеров листьев. Здесь $g_L(\Omega_L)$ — плотность распределения нормалей листьев

$$g_L(\Omega_L) = \frac{1}{2\pi} g_\Theta(\Theta_L);$$

$g_\Theta(\Theta_L)$ — плотность широтного угла Θ_L нормали имеет вид [10]

$$g_\Theta(\Theta_L)\, d\Omega_L = [2/\pi + b\cos 2\Theta_L + c\cos 4\Theta_L]\, d\Theta_L\, d\varphi_L.$$

Здесь параметры b, c определяют распределение угла наклона листьев. Следующий параметр [4, 5, 6]

$$\sigma_\varkappa(t,\ \Omega',\ \Omega) = \begin{cases} G(\Omega), & \mu\mu' < 0, \\ G(\Omega)\, h_\varkappa(t,\ \Omega',\ \Omega), & \mu\mu' > 0, \end{cases}$$

где

$$h_\varkappa(t,\ \Omega',\ \Omega) = 1 - \left(\frac{G(\Omega')\,\mu}{G(\Omega)\,\mu'}\right)^{1/2} \exp\left(-\frac{\Delta(\Omega,\ \Omega')\, t}{\varkappa H}\right),$$

$$\Delta(\Omega,\ \Omega') = (\mu^{-2} + \mu'^{-2} + 2\,(\Omega\Omega')/|\mu\mu'|)^{1/2},$$

$\sigma_\varkappa$ — это новый коэффициент ослабления, учитывающий эффект обратного блеска и относительные размеры пластин. Здесь $H = t(T)$ — индекс листовой поверхности слоя высоты T. Условная плотность рассеяния в направлении Ω из Ω' равна

$$P(\Omega' \to \Omega) = \frac{1}{2\pi}\int g_L(\Omega_L)\,|\Omega\Omega'|\, f(\Omega' \to \Omega,\ \Omega_L)\, d\Omega_L / G(\Omega'),$$

где

$$f(\Omega' \to \Omega,\ \Omega_L) = \begin{cases} r_L\,|\Omega\Omega_L|/\pi, & (\Omega'\Omega_L)\,(\Omega'\Omega_L) < 0, \\ t_L\,|\Omega\Omega_L|/\pi, & (\Omega'\Omega_L)\,(\Omega'\Omega_L) > 0, \end{cases}$$

— это индикатриса отражения-пропускания ламбертовой поверхности листа с диффузными коэффициентами отражения r_L и пропускания t_L. Обозначив r_s альбедо подстилающей поверхности, получим набор из 7 параметров, подлежащих восстановлению: b, c, $\varkappa$, H, r_L, t_L, r_s.

Постановка обратной задачи: на внешнюю поверхность плоского слоя растительности падает мононаправленный поток солнечного излучения. На верхней границе слоя находятся детекторы, измеряющие коэффициент спектральной яркости (КСЯ) растительности, по которым следует определить 3 оптических параметра слоя (r_L, t_L, r_s) и 4 геометрических (b, c, $\varkappa$, H). Из перечисленных параметров более существенными являются геометрические, так как их труднее измерить.

Мы предполагаем, что: 1) приемник находится невысоко над верхней границей слоя; 2) оптическая плотность атмосферы пренебрежимо мала по сравнению с оптической плотностью растительного слоя. Поэтому атмосферным рассеянием света внутри растительного слоя и на пути от верхней границы слоя до приемника излучения можно пренебречь. Для учета влияния атмосферы на падающий сверху поток солнечного излучения следует к мононаправленному потоку добавить диффузную составляющую. Это никак не сказывается на алгоритме решения задачи, поэтому в первых экспериментах с модельной задачей этот эффект не был учтен.

3. Алгоритм решения задачи

Искомые параметры входят в уравнение переноса для интенсивности сложным образом, поэтому трудно (или невозможно) составить замкнутые аналитические уравнения для них. К тому же эти попытки заведомо должны привести к различным уравнениям для разных параметров. Предпочтительнее воспользоваться универсальным алгоритмом, мы возьмем модификацию метода Ньютона [17]. Пусть $\alpha_1^*,\ldots,\alpha_n^*$ искомые значения параметров $\alpha_1^*,\ldots,\alpha_n^*$, которые следует восстановить. Обозначим $R_k \equiv R_k(\alpha_1,\ldots,\alpha_n)$, $k = 1,\ldots,N > n$ — КСЯ в направлении визирования Ω^* для растительности с параметрами $\alpha_1,\ldots,\alpha_n$ соответственно. Пусть $R_k^* \equiv R_k^*,\ldots,\alpha_1^*\ (\alpha_n^*)$ — измеренные КСЯ. Для определения величин $\alpha_1^*,\ldots,\alpha_n^*$ рассмотрим систему нелинейных уравнений

$$R_k(\alpha_1,\ \ldots,\ \alpha_n) = R_k^*,\ k = 1,\ \ldots,\ N, \tag{1}$$

где R_k — функции достаточно сложной природы. Решение этой системы методом Ньютона—Канторовича [11] приводит к итерациям

$$\alpha_i^{l+1} = \alpha_i^l + \delta_i^l,\ i = 1,\ \ldots,\ n,\ l = 0,\ 1,\ \ldots, \tag{2}$$

где δ_l^l удовлетворяют системе линейных уравнений

$$\sum_{i=1} \frac{\partial R_k}{\partial \alpha_i}\delta_i^l = R_k^* - R_k(\alpha_1^l,\ \ldots,\ \alpha_n^l),\ k = 1,\ \ldots,\ n. \tag{3}$$

В качестве начального приближения искомых параметров взяты прогностические значения $\alpha_1^0,...,\alpha_n^0$. Процесс (2) продолжается до тех пор, пока не выполнится неравенство

$$|R_k^* - R_k(\alpha_1^l, \ldots, \alpha_n^l)| < \varepsilon,$$

где ε заданное малое число. Система (3), вообще говоря, переопределена. Ее можно решать методом наименьших квадратов. Если система плохо определена, можно использовать регуляризацию [12]. Значения КСЯ и их производных вычисляются методом Монте-Карло (см. п. 4, 5).

Иногда удобно пользоваться модификацией описанной схемы. Представим величину R в виде суммы: $R = R_1+(R-R_1)$, где R_1 — это КСЯ однократно рассеянных фотонов. Заметим, что часто в практически важных случаях (например ,в спектральной области фотосинтетически активной радиации) роль однократно рассеянного излучения в общем потоке велика. Нетрудно проверить, что это же утверждение справедливо относительно соответствующих производных. Поэтому естественно попытаться заменить в системе (3) производные $\partial R/\partial\alpha$ на производные $\partial R_1/\partial\alpha$. Преимущество такой замены связано с алгоритмом расчета производных (п. 5), производные $\partial R_1/\partial\alpha$ вычисляются быстрее и точнее производных $\partial R/\partial\alpha$. Разумеется, теоретическая скорость сходимости при этом несколько снизится. Однако на практике это может компенсироваться большей точностью расчета производных $\partial R_1/\partial\alpha$. Кроме того, относительная разница производных $\partial R/\partial\alpha$ и $\partial R_1/\partial\alpha$ невелика для небольших значений индекса листовой поверхности.

4. Вычисление КСЯ методом Монте-Карло

Пусть $J(t, \Omega)$ — значение интенсивности рассеянного излучения в точке (t, Ω). Функция J удовлетворяет интегральному уравнению [6]:

$$J(t, \Omega) = \int_0^H \int_{\{\Omega\}} k[(t', \Omega') \to (t, \Omega)] J(t', \Omega')\, dt' d\Omega' + F(t, \Omega), \tag{4}$$

где

$$F(t, \Omega) = I_0 \delta(\Omega - \Omega_0)\, G(\Omega) \exp[-G(\Omega)\, t]/|\mu|], \ \mu < 0, \tag{5}$$

I_0 — интенсивность излучения, падающего в направлении Ω_0, а ядро $k(x' \to x)$ {$x = (t, \Omega)$ — точка фазового пространства X) равно

$$k[(t', \Omega') \to (t, \Omega)] = \begin{cases} \dfrac{1}{|\mu|} \exp\left[\dfrac{1}{\mu}\displaystyle\int \sigma_x(\tau, \Omega', \Omega)\, d\tau\right] P(\Omega' \to \Omega)\, G(\Omega), & (t - t') < 0, \\ 0, & (t - t') > 0. \end{cases} \tag{6}$$

Решив уравнение (4), можно найти КСЯ в направлении визирования

$$R(\Omega^*) = J(0, \Omega^*)/[G(\Omega^*)\, I_0 |\mu_0|]. \tag{7}$$

Уравнение (4) решается методом Монте-Карло [6, 8]. Запишем его в операторном виде $J = KJ+F$. Известно, что при $\|K\| < 1$ его решение представимо в виде ряда Неймана [И]: $J = F + KF + K^2F + \ldots$.

Пусть скалярное произведение в пространстве X есть

$$(\psi, \varphi) = \int_X \psi(x)\, \varphi(x)\, dx = \int_0^H \int_{\{\Omega\}} \psi(t, \Omega)\, \varphi(t, \Omega)\, dt d\Omega.$$

Тогда

$$J(0, \Omega^*) = J(x^*) = (J, \delta_{x^*}) = (F, \delta_{x^*}) + (KF, \delta_{x^*}) + (K^2F, \delta_{x^*}) + \ldots = (F, K^*\delta_{x^*}) + \\ + (KF, K^*\delta_{x^*}) + (K^2F, K^*\delta_{x^*}) + \ldots. \tag{8}$$

Здесь $x^* = (0, \Omega^*)$, δ_x^* дельта-функция, а K^* — оператор, сопряженный K,

$$[K^*\delta_{x^*}](x) = \psi(x)\, G(\Omega^*); \tag{9}$$

$$\psi(x) = \Psi(t, \Omega) = \frac{P(\Omega \to \Omega^*)}{\mu^*} \exp\left[-\frac{1}{\mu^*}\int_0^t \sigma_x(t', \Omega, \Omega^*)\, dt'\right]. \tag{10}$$

Из (5), (7), (8), (9) следует:

$$R(\Omega^*) = (Q, \Psi) + (KQ, \Psi) + (K^2Q, \Psi) + ..., \tag{11}$$

где Q — плотность начальных столкновений:

$$Q(t, \Omega) = F(t, \Omega)\pi/I_0|\mu_0| = \frac{\pi G(\Omega)}{|\mu|}\exp\left[-\frac{G(\Omega)}{|\mu|}t\right]\delta(\Omega - \Omega_0). \tag{12}$$

Выражение (11) соответствует следующему алгоритму метода Монте-Карло. Согласно плотности перехода k моделируется цепь Маркова $x_0^n \to x_1^n \to ... \to x_m^n$, где m — случайный номер последнего столкновения для n-й траектории. После каждого столкновения в точке x_i^n в оценку R вносится вклад $W_i^n\Psi(x_i^n)$ и

$$R(\Omega^*) \approx \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}\sum_{i=0}^{m} W_i^n \psi(x_i^n), \tag{13}$$

где N — число траекторий, а W_i^n — вес n-го фотона после первого столкновения.

В случае отражения от почвы функция вклада равна

$$\psi_s(t, \Omega) = \frac{r_s|\mu|}{\pi G(\Omega)}\exp\left[-\frac{1}{\mu^*}\int_0^t \sigma_x(t', \Omega, \Omega^*)\,dt'\right]\delta(t - H),$$

где r_s — КСЯ почвы, а $\|\mu^*|/\pi$— угловая плотность рассеяния от подстилающей ламбертовой поверхности.

5. Вычисление производных КСЯ методом Монте-Карло

Запишем ряд Неймана (11) в кратком виде:

$$R = \int Q_0\psi_0 + \int Q_0K_{01}\psi_1 + \int Q_0K_{01}K_{12}\psi_2 + ... \tag{14}$$

Здесь $Q_0 = Q(x_0)$, $\Psi_0 = \Psi(x_0)$, $k_{12} = k(x_1 \to x_2)$. Для вычисления производной $\partial R/\partial\alpha$ продифференцируем ряд (14), обозначив $\partial f/\partial\alpha = f'$:

$$R = \int [Q_0'\psi_0 + Q_0\psi_0'] + \int [Q_0'K_{01}\psi_1 + Q_0K_{01}'\psi_1 + Q_0K_{01}\psi_1'] + ... = \int Q_0\psi_0\left[\frac{Q_0'}{Q_0} + \frac{\psi_0'}{\psi_0}\right] +$$

$$+ \int Q_0K_{01}\psi_0\left[\frac{Q_0'}{Q_0} + \frac{K_{01}'}{K_{01}} + \frac{\psi_1'}{\psi_1}\right] + ... = \int Q_0\psi_0W_0 + \int Q_0K_{01}\psi_0W_{01} + ...$$

Последнее представление соответствует следующему алгоритму расчета: как и прежде моделируем марковские цепи столкновений и в каждой точке столкновения x вносим в оценку $\partial R/\partial\alpha$ вклад $\Psi(x)W$. Таким образом, производные вычисляются по тем же траекториям, что и КСЯ. Строгое обоснование алгоритма расчета приведено в [8]. Очевидно, трудоемкость расчета производной сравнительно с КСЯ определяется трудоемкостью вычисления сомножителя $W_{0...i}$.

Как уже отмечено, расчет всех величин $W_{0...i}$ с удовлетворительной точностью требует значительных затрат времени ЭВМ. Иногда можно упростить задачу и вычислять производную лишь от первого слагаемого в (11). Пусть $R_1 = \int Q_0\Psi_0$, тогда для оценки производной $\partial R_1/\partial\alpha$ достаточно вычислить множитель $W_0 = Q_0' / Q_0 + \Psi_0' / \Psi_0$.

Запишем выражение для величины R_1. Есть два типа столкновений — на поверхности листьев и на поверхности почвы:

$$R_1 = R_{1L} + R_{1s}, \tag{15}$$

где R_{1L} КСЯ однократно рассеянного излучения от листьев, а R_{1s} — от почвы. Из (10)—(12) получаем

$$R_{1L}(\Omega^*) = \pi\frac{G(\Omega_0)}{|\mu_0|}\,\frac{P(\Omega_0 \to \Omega^*)}{\mu^*}\int_0^H \exp\left[-\frac{G(\Omega_0)}{|\mu_0|}t - \frac{1}{\mu^*}\int \sigma_x(t', \Omega, \Omega^*)\,dt'\right]dt; \tag{16}$$

$$R_{1s}(\Omega^*) = r_s G(\Omega_0)\exp\left[-\frac{G(\Omega_0)}{|\mu_0|}H - \frac{1}{\mu^*}\int \sigma_\kappa(t', \Omega, \Omega^*)\,dt'\right]. \qquad (17)$$

Теперь рассмотрим статистические оценки $\partial R_1/\partial\alpha$ по конкретным параметрам α.

а. Альбедо подстилающей поверхности r_s. Очевидно, что от r_s зависит лишь R_{1s}, поэтому $W_0 = 1/r_s$ и

$$\frac{\partial R_1}{\partial r_s} = \int Q_0\psi_0 W_0 = G(\Omega_0)\exp\left[-\frac{G(\Omega_0)}{|\mu_0|}H - \frac{1}{\mu^*}\int \sigma_\kappa(t', \Omega, \Omega^*)\,dt'\right].$$

б. Коэффициенты отражения и пропускания листьев r_L и t_L. От этих параметров зависит лишь индикатриса f отражения листьев, которая входит в формулу, определяющую $P(\Omega\to\Omega^*)$. Отсюда

$$W_0 = \frac{\psi'_\alpha}{\psi} = \frac{P'_\alpha(\Omega_0\to\Omega^*)}{P(\Omega_0\to\Omega^*)} = \frac{f'_\alpha(\Omega'\to\Omega,\ \Omega)}{f(\Omega'\to\Omega,\ \Omega)};$$

$$W_{0r} = \begin{cases} |\Omega\Omega_L|/\pi, & (\Omega\Omega_L)(\Omega'\Omega_L) < 0,\\ 0, & (\Omega\cdot\Omega_L)(\Omega'\cdot\Omega_L) > 0;\end{cases}$$

$$W_{0r} = \begin{cases} 0, & (\Omega\Omega_L)(\Omega'\Omega_L) < 0,\\ |\Omega\cdot\Omega_L|/\pi, & (\Omega\cdot\Omega_L)(\Omega'\cdot\Omega_L) > 0.\end{cases}$$

в. Параметры b и c, характеризующие плотность распределения ориентации нормали листьев. От этих параметров зависят обе функции Ψ и Q:

$$\frac{Q'_\alpha}{Q} = \frac{G'_\alpha}{G} - \frac{t}{\mu}G'_\alpha;$$

$$\frac{\psi'_\alpha}{\psi} = \frac{P'_\alpha(\Omega_0\to\Omega^*)}{P(\Omega_0\to\Omega^*)} - \int_0^t \left[-\frac{1}{\mu}\sigma_\kappa(t',\ \Omega_0,\ \Omega^*)\right]'_\alpha dt'.$$

Окончательно, подставляя вместо α один из параметров b или c, получим

$$W_{0\alpha} = Q'_\alpha/Q + \psi'_\alpha/\psi,$$

причем интеграл во втором слагаемом вычисляется аналитически.

г. Параметр H — индекс листовой поверхности (LAI). Из формулы (15) видно, что от H зависит верхний предел интегрирования и выражение σ_κ. Дифференцируя R_{1L} по параметру H, получим аналитическое выражение

$$\frac{\partial R_{1L}}{\partial H} = \pi\frac{G(\Omega_0)}{|\mu|}\frac{P(\Omega_0\to\Omega^*)}{\mu^*}\Bigg\{\exp\left[-\frac{G(\Omega_0)}{|\mu_0|}H - \frac{1}{\mu^*}\int_0 \sigma_\kappa(t', \Omega, \Omega^*)\,dt'\right] -$$
$$- \frac{\partial}{\partial H}\left[-\frac{1}{\mu^*}\int_0 \sigma_\kappa(t',\ \Omega_0,\ \Omega^*)\,dt'\right] -$$
$$- \int_0^H \exp\left[-\frac{G(\Omega_0)}{|\mu_0|}t - \frac{1}{\mu^*}\int \sigma_\kappa(t',\ \Omega_0,\ \Omega^*)\,dt'\right]dt\Bigg\}.$$

Таким образом, производная от R_{1L} по H равна сумме двух слагаемых. Первое из них — фиксированное аналитическое выражение, а второе — математическое ожидание от статистической оценки R_{1L}, умноженной на весовой множитель

$$W = -\frac{\partial}{\partial H}\left[-\int_0^t \sigma_\kappa/\mu^*\right].$$

Аналогично

$$\frac{\partial R_{1s}}{\partial H} = R_{1s}\left\{\frac{G(\Omega_0)}{|\mu_0|} + \frac{\sigma_\varkappa(H, \Omega, \Omega^*)}{\mu^*} + \int_0^H \frac{\partial}{\partial H}[-\sigma_\varkappa/\mu^*]\,dt'\right\}.$$

д. Параметр κ характеризует размеры листьев. От него зависит лишь функция вклада Ψ:

$$W = \frac{\psi'_\alpha}{\psi} = -\int_0^t \frac{\partial}{\partial \varkappa}[\sigma_\varkappa(t', \Omega_0, \Omega^*)]\,dt'.$$

6. Результаты расчетов

Здесь приведены результаты нескольких модельных расчетов по восстановлению параметров растительного слоя. Общая схема расчета такова: сначала для некоторой модельной среды вычисляем КСЯ пропущенного и отраженного излучения в нескольких направлениях. Затем вычисленные значения КСЯ используются для поочередного восстановления параметров модели. Выбор вариантов наблюдения зависит от восстанавливаемых параметров. Положение детектора и направление наблюдения выбираются так, чтобы: 1) доля однократно рассеянного излучения была по возможности больше; 2) по значениям однократно рассеянного излучения можно было восстановить искомый параметр (или параметры).

В расчетах зенитный угол Солнца $\theta_\odot = 40°$, азимутальный угол наблюдения (исключая вариант восстановления параметров b, c индикатрисы) $\varphi = 0°$. Ниже приведены параметры приемника (высота z и зенитный угол наблюдения θ).

1) H: $z = 0$; $\theta = 50°$ — наблюдается пропущенное излучение; угол θ близок к $\theta_\odot$ ($\theta \neq \theta_\odot$, чтобы в приемник не попало прямое излучение от Солнца).

2) $\varkappa$: $z = T$; $\theta = 210°$ — наблюдается отраженное излучение (оно «чувствительнее» к значениям $\varkappa$, чем пропущенное); угол θ близок к $\theta_\odot + 180°$ (при $\theta = \theta_\odot + 180°$ однократно рассеянное излучение не зависит от $\varkappa$, см. формулу для $\sigma_\varkappa$ в п. 2).

3) $\boldsymbol{r}_s$: $z = T$; $\theta = 180°$.

4) r_L, t_L: два приемника — $z_1 = z_2 = T$; $\theta_1 = 230°$, $\varphi_1 = 0°$; $\theta_2 = 230°$, $\varphi_2 = 90°$. Здесь сделано несколько попыток для разных направлений наблюдения, однако хорошего результата добиться не удалось.

В зависимости от варианта используется стандартная или модифицированная схема. При удовлетворительном восстановлении число итераций выбирается так, чтобы получить две первые значащие цифры искомого параметра.

H	$\varkappa$	r_s	r_L	t_L	b	c
4	0,08	0,2	0,46	0,46	1	1
2	0,04	0,1	0,20	0,20	0	0
5	2	5	3	3	5	5
2	—	2	3	3	—	—
2%	1%	2%	1%	2%	20%	30%

Сначала был рассмотрен растительный слой с индексом листовой поверхности H-4. «Искомые» параметры модели и результаты их восстановления приведены в таблице.

Здесь в первой строке — «искомые» параметры, во второй — начальные приближения этих параметров, в третьей число итераций модифицированной схемы для восстановления параметра с указанной ниже точностью, в четвертой — аналогичное число итераций стандартной схемы, в пятой — относительная ошибка восстановления в процентах. Параметр κ удалось быстро восстановить с помощью модифицированной схемы, поэтому стандартная схема здесь не использовалась; параметры b, c посредством стандартной схемы восстановить не удалось, поэтому в таблице указано лишь число итераций модифицированной схемы.

Проведен аналогичный расчет по восстановлению параметров b, c для $H = 2$. За пять итераций модифицированной схемы удалось восстановить эти параметры с ошибкой около 10%.

Таким образом, как и следовало ожидать, поставленная задача решается лучше при меньших значениях индекса H. Для больших значений H предложенные алгоритмы не позволяют восстановить параметры b, c с высокой точностью и быстро. В связи с этим делаются попытки разработать более эффективную модификацию описанного алгоритма.

1. G o e l N . S . //Remote Sens. Reviews. 1988. № 4. p. 1—212.
2. M y n e n i R . B . , R o s s J . , A s r a r G . //Agricultural and Forest Meteorol. 1989. V. 45. P. 1—153.
3. Р о с с Ю . К . Радиационный режим и архитектоника растительного покрова. Л.: Гидрометеоиздат, 1975.
4. N i l s o n T . , K u u s k A . //Remote Sens. Environ. 1989. V. 27. P. 157—167.
5. M a r s h a k A . L . //J. Quant. Spectr. Radiat. Transfer. 1989.
6. А н т ю ф е е в В . С . , М а р ш а к А . Л . //Оптика атмосферы, 1989. № 11. С. 1206— 1212.
7. М а р ш а к А . Л . //Изв. АН ЭССР. 1987. Т. 36. № 3. С. 289—293.
8. Е р м а к о в С . М . , М и х а й л о в Г . А . Курс статистического моделирования. М.: Наука, 1976.
9. R o s s U . K . , M a r s h a k A . L . //Remote Sens. Environ. 1988. V. 24. P. 213—225.
10. B u n n i k N . J . J . The multispectral reflectance of shortwave radiation by agricultural crops in relation with their morphological and optical properties. Mededelingen Landbouwhogescholl Wageningen. 1978. Nederland, № 78-1.
11. К а н т о р о в и ч Л . В . , А к и л о в Г . П . Функциональный анализ. М.: Наука, 1978.
12. Т и х о н о в А . Н . , А р с е н и н В . Я . Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979.

Вычислительный центр СО АН СССР, г. Новосибирск
Институт астрофизики и физики атмосферы АН ЭССР, г. Тарту

Поступила в редакцию
7 февраля 1990 г.

V . S . A n t y u f e e v , A . L . M a r s h a k . **Vegetation Cover Parameters Restoration from the Values of Spectral Brightness Coefficient.**

The paper concerns with the algorithm for estimating optical and geometrical parameters of the vegetation cover using bidirectional reflectance data of scattered solar radiation. The algorithm is based upon the well-known Newtonian method. Formulas for calculating derivatives of the spectral density coefficient with respect to the sought parameters by the Monte-Carlo method and some results of calculations for solving the inverse problem are given.