

# Применение блочно-итерационного алгоритма для восстановления интегральных аэрозольных распределений по данным солнечной спектрофотометрии

В.В. Веретенников, С.С. Меньщикова\*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 24.12.2009 г.

Представлена модификация метода восстановления интегральных аэрозольных распределений в задачах солнечной фотометрии. Предполагается наличие в атмосфере частиц субмикронной ( $m$ ) и грубодисперсной ( $g$ ) фракций. Используется разбиение матрицы исходной системы на четыре блока, соответствующих двум фракциям частиц в двух спектральных диапазонах — коротковолновом и длинноволновом. В блочно-итерационном алгоритме обращения системы производится раздельное восстановление интегральных распределений каждой фракции с их последующей итеративной коррекцией. Проведена численная оценка возможностей предложенной методики в сравнении с результатами обращения на полном ансамбле частиц.

*Ключевые слова:* микроструктура аэрозоля, обратные задачи, солнечная фотометрия; aerosol microstructure, inverse problems, sun spectrophotometry.

## Введение

Для интерпретации спектральных измерений аэрозольной оптической толщи (АОТ), проводимых с использованием сетевых солнечных фотометров SP-6(7) [1] на территории Сибири, в работе [2] предложен алгоритм, основанный на представлении дисперсного состава аэрозоля с помощью интегральных аэрозольных распределений. Отличительной особенностью алгоритма является восстановление интегральной функции распределения по размерам при минимальных априорных предположениях, что позволяет автоматизировать процесс обработки рутинных измерений [3]. По интегральным измерениям легко рассчитываются такие микроструктурные параметры, как суммарное сечение, объемная концентрация и средний радиус частиц.

В настоящей статье рассматривается модификация алгоритма, разработанная с учетом присутствия в атмосфере частиц двух фракций — субмикронной ( $m$ ) и грубодисперсной ( $g$ ). Одновременное существование в атмосфере двух и более фракций аэрозоля, различающихся по происхождению, составу и физико-химическим свойствам, является достаточно распространенной ситуацией. Нами принята упрощенная трактовка, когда признаком выделения отдельных фракций служит принадлежность частиц непересекающимся диапазонам дисперсности. В предлагаемой методике учитываются различия в оптическом проявлении двух фракций,

связанные с особенностями поведения фактора эффективности ослабления для каждой фракции в разных областях спектра.

## 1. Описание алгоритмов

### 1.1. Решение на полном ансамбле частиц (алгоритм А)

Дисперсный состав аэрозольных частиц, которые содержатся в вертикальном столбе атмосферы единичной площади, можно характеризовать функцией  $S(r)$ , определяющей суммарное геометрическое сечение частиц с радиусом, большим или равным  $r$ . При одинаковых размерностях сечения частиц и площади основания столба атмосферы определенная указанным образом функция является безразмерной характеристикой, которая удовлетворяет интегральному уравнению вида [2]:

$$\int_0^R \frac{\partial K(\lambda, r)}{\partial r} S(r) dr = \tau(\lambda), \quad (1)$$

где функция  $K(\lambda, r)$  есть фактор эффективности ослабления излучения на длине волны  $\lambda$  для одной частицы радиуса  $r$ , зависящий от показателя преломления вещества частицы;  $\tau(\lambda)$  — спектральная зависимость АОТ. Искомая функция  $S(r)$  принадлежит множеству неотрицательных монотонных невозрастающих функций, непрерывных слева. При кусочно-линейной аппроксимации функции  $S(r)$  интегральное уравнение (1) преобразуется к дискретному виду:

\* Виктор Васильевич Веретенников (vuv@iao.ru);  
Светлана Сергеевна Меньщикова (mss.@iao.ru).

$$\sum_{j=1}^n Q_j(\lambda) S_j = \tau(\lambda), \quad (2)$$

где  $S_j = S(r_j)$  – значения искомой функции в узлах  $r_j$ ,  $j = 1, \dots, n$ . Вектор  $S$  принадлежит ограниченному замкнутому выпуклому многограннику  $M_n$  в  $R^n$ :

$$M_n = \{S : S \in R^n, C \geq S_1 \geq S_2 \geq \dots \geq S_n \geq 0\}. \quad (3)$$

Величина  $C$  в (3) определяет верхнюю границу суммарного сечения частиц  $S$ . Коэффициенты  $Q_j(\lambda)$  в уравнении (2) находятся по формуле

$$Q_j(\lambda) = \bar{K}_j(\lambda) - \bar{K}_{j-1}(\lambda), \quad (4)$$

где

$$\bar{K}_j(\lambda) = \frac{1}{r_{j+1} - r_j} \int_{r_j}^{r_{j+1}} K(\lambda, r) dr, j = 1, \dots, n; \quad \bar{K}_0(\lambda) = 0. \quad (5)$$

Функции  $\bar{K}_j(\lambda)$  (5),  $j \neq 0$ , являются средними значениями фактора эффективности  $K(\lambda, r)$  на интервале  $[r_j, r_{j+1}]$ .

Обратная задача по восстановлению вектора  $S$  из уравнения (2) для дискретного набора спектральных измерений АОТ  $\tau(\lambda_i)$ ,  $\lambda_i \in \Lambda$ ,  $i = 1, \dots, m$ , сводится к минимизации на множестве векторов  $S \in M_n$  (3) функционала невязки

$$F^2 = \|QS - \tau\|^2. \quad (6)$$

В качестве приближенного решения обратной задачи рассматривается любой вектор  $S \in M$ , для которого значение функционала невязки не превышает уровня погрешности входных данных. В указанной постановке обеспечивается устойчивость решения обратной задачи [4]. По восстановленному распределению  $S(r)$  находятся такие интегральные параметры аэрозоля, как суммарное геометрическое сечение частиц  $S = S(0)$ , объемный фактор заполнения  $V = a \int_0^R S(r) dr$  и средний радиус частиц  $r_s = V/(aS)$ ,  $a = 4/3$ .

## 1.2. Решение с разделением ансамбля частиц на фракции (алгоритм В)

Для «широких» аэрозольных распределений полный ансамбль частиц можно разделить на фракции, соответствующие различным диапазонам дисперсности. В этом случае рассмотренную методику можно модифицировать с учетом особенностей, которые проявляются в поведении фактора эффективности ослабления  $K(\lambda, r)$  при различных соотношениях между размером частицы и длиной волны излучения. Известно, что спектральные характеристики ослабления излучения наиболее чувствительны к частицам с размерами, соизмеримыми с длиной волны. Положение главного максимума  $r_m$

на зависимости  $K(\lambda, r) = K(kr)$ ,  $k = 2\pi/\lambda$  можно приближенно оценить из соотношения [5]:

$$r_m = 2,1/[k(v-1)],$$

где  $v$  – показатель преломления аэрозольного вещества.

Рассмотрим среду, образованную частицами двух фракций – субмикронной (м) и грубодисперсной (г), граница между которыми находится в некоторой точке  $r_{n_1}$  сетки узлов  $\{r_j\}$ . В этом случае вектор  $S$  можно представить в виде суммы векторов  $S = S^{(м)} + S^{(г)}$ , компоненты которых определяются по формулам:

$$S_j^{(м)} = \begin{cases} S_j - S_{n_1}, j = 1, \dots, n_1; \\ 0, j = n_1 + 1, \dots, n; \end{cases} \quad (7)$$

$$S_j^{(г)} = \begin{cases} S_{n_1}, j = 1, \dots, n_1; \\ S_j, j = n_1 + 1, \dots, n. \end{cases}$$

С учетом соотношений (7) уравнение (2) преобразуется к виду

$$\sum_{j=1}^{n_1-1} \hat{Q}_j(\lambda) S_j^{(м)} + \sum_{j=n_1}^n \hat{Q}_j(\lambda) S_j^{(г)} = \tau(\lambda) \quad (8)$$

относительно  $(n_1 - 1)$  ненулевых компонент вектора  $S^{(м)}$  и  $(n - n_1 + 1)$  компонент вектора  $S^{(г)}$  при  $\hat{Q}_j(\lambda) = Q_j(\lambda)$ ;  $j \neq n_1$  и  $\hat{Q}_{n_1}(\lambda) = \bar{K}_{n_1}(\lambda)$ .

Для частиц г-фракции, размер которых в видимом диапазоне превышает длину волны, фактор эффективности ослабления  $K(\lambda, r)$  близок к константе 2, осциллируя в ее окрестности с убывающей амплитудой [5]. При этом средние значения фактора эффективности на соседних участках будут мало отличаться и их разность  $\bar{K}_j(\lambda) - \bar{K}_{j-1}(\lambda)$  стремится к нулю. Поэтому во втором слагаемом в левой части уравнения (8) все коэффициенты при  $S_j^{(г)}$ , за исключением случая  $j = n_1$ , для которого  $\hat{Q}_{n_1}(\lambda) \approx 2$ , будут пренебрежимо малы. В результате уравнение (8) для коротковолновой области спектра,  $\lambda \in \Lambda_1$ , может быть записано в виде

$$\sum_{j=1}^{n_1-1} \hat{Q}_j(\lambda) S_j^{(м)} + 2S_{n_1}^{(г)} = \tau(\lambda). \quad (9)$$

Уравнение (9) определено относительно вектора  $S^{(м)}$  и величины  $S_{n_1}^{(г)} = S_\Gamma$ , которая характеризует суммарное геометрическое сечение частиц г-фракции. Из уравнения (9) видно, что появление частиц г-фракции аэрозоля выразится в сдвиге спектральной зависимости  $\tau(\lambda)$  при  $\lambda \in \Lambda_1$  в положительном направлении оси ординат. Значение сдвига в зависимости от  $\lambda$  мало отличается от постоянной величины, которая вдвое превышает геометрическое

сечение частиц  $S_r$ . Отсюда следует, что измерения  $\tau(\lambda)$  в коротковолновой области спектра мало информативны относительно распределения по размерам частиц  $\gamma$ -фракции и несут информацию лишь о ее интегральном содержании в виде геометрического сечения  $S_r$ .

Для частиц, размеры которых значительно меньше длины волны, фактор эффективности ослабления мал и монотонно убывает при  $\lambda > \pi r(v-1)$  [5]. Поэтому в ИК-области спектра более существенна роль частиц  $\gamma$ -фракции, где вклад  $m$ -фракции в ослабление излучения относительно мал и может быть аппроксимирован степенной функцией  $\sim \lambda^{-c}$  [6, 7]. В итоге уравнение (8) для длинноволновой области спектра,  $\lambda \in \Lambda_2$ , можно представить в виде

$$\sum_{j=n_1}^n \hat{Q}_j(\lambda) S_j^{(r)} + A\lambda^{-c} = \tau(\lambda). \quad (10)$$

Уравнение (10) определено относительно вектора  $S^{(r)}$ , определяющего микроструктуру  $\gamma$ -фракции, с добавочным членом, представленным вторым слагаемым, который обусловлен вкладом в ослабление  $m$ -фракции.

Таким образом, мы расщепили исходное уравнение (2) относительно  $n$ -вектора  $S$  на систему двух уравнений (9) и (10), слабо связанных друг с другом, которые определены относительно двух векторов  $S^{(m)}$  и  $S^{(r)}$  меньшей размерности. Рассуждения, которые привели к построению этих уравнений, носят в определенной мере качественный характер и служат ориентиром для построения блочного алгоритма обращения уравнения (2) в общем виде.

С этой целью перепишем уравнение (8) для набора длин волн  $\lambda_i \in \Lambda = (\Lambda_1, \Lambda_2)$  и вектора правой части  $\tau = (\tau_1, \tau_2)^T$ , где  $\tau_p : \{\tau(\lambda_i), \lambda_i \in \Lambda_p\}$ ,  $p = 1, 2$ , в виде системы уравнений

$$\begin{aligned} A_1 S^{(m)} + A_2 S^{(r)} &= \tau_1, \\ A_3 S^{(m)} + A_4 S^{(r)} &= \tau_2, \end{aligned} \quad (11)$$

где  $A_1, \dots, A_4$  — блоки (подматрицы), составляющие матрицу  $A = \begin{pmatrix} A_1 & A_2 \\ A_3 & A_4 \end{pmatrix}$ , элементы которой определяются коэффициентами  $\hat{Q}_j(\lambda_i)$ . С учетом сделанных ранее замечаний, подматрицы  $A_2$  и  $A_3$  близки к вырожденным. Поэтому целесообразно выделить в первом уравнении системы (11) блок с подматрицей  $A_1$  и рассматривать уравнение относительно вектора  $S^{(m)}$ :

$$A_1 S^{(m)} = \tau_1^{(m)} \quad (12)$$

с правой частью  $\tau_1^{(m)} = \tau_1 - A_2 S^{(r)}$ . Его решение может быть получено аналогично решению исходного уравнения (2) путем минимизации функционала

невязки (6) при ограничениях вида (3). Из подобных соображений для определения вектора  $S^{(r)}$  во втором уравнении системы (11) необходимо выделить блок с подматрицей  $A_4$  и решить уравнение

$$A_4 S^{(r)} = \tau_2^{(r)} \quad (13)$$

с правой частью  $\tau_2^{(r)} = \tau_2 - A_3 S^{(m)}$ . Поскольку искомыми векторы  $S^{(m)}$  и  $S^{(r)}$  входят в каждое из уравнений (12) и (13), то для совместного обращения системы (12)–(13) следует применять итерационные методы. Например, для начального приближения  $S_0^{(r)}$  из уравнения (12) находится первое приближение вектора  $S_1^{(m)}$ . Это приближение используется для вычисления правой части  $\tau_2^{(r)} = \tau_2 - A_3 S_1^{(m)}$  уравнения (13) и последующего его обращения. В результате находим новое приближение для вектора  $S_1^{(r)}$ . Затем возвращаемся к уравнению (12) и процедура снова повторяется. Общая схема итераций в этом случае имеет следующий вид:

$$A_1 S_{k+1}^{(m)} = \tau_1 - A_2 S_k^{(r)}, \quad A_4 S_{k+1}^{(r)} = \tau_2 - A_3 S_{k+1}^{(m)}, \quad (14)$$

где  $k = 0, 1, 2, \dots$  — номер итераций. Численные эксперименты показывают, что для сходимости процесса достаточно 2–4 итераций. Учитывая замечания, сделанные при получении уравнения (9), на первом шаге достаточно задать оценку  $S_{r0}$  сечения частиц  $\gamma$ -фракции и положить в первом уравнении системы (14)  $A_2 S_0^{(r)} = 2S_{r0}$ . На практике в качестве начального приближения удовлетворительные результаты дает выбор  $A_2 S_0^{(r)} = \min_i \tau(\lambda_i)$ .

## 2. Численный пример

Рассмотрим результаты численного моделирования, которые иллюстрируют эффективность предложенной методики. Для моделирования была выбрана аэрозольная среда, образованная частицами двух фракций, причем вклад в ослабление излучения частиц  $\gamma$ -фракции на длине волны  $\lambda = 0,55$  мкм составлял 20%. В качестве модели  $m$ -фракции рассматривалась дымка  $H$  [8], а дисперсный состав  $\gamma$ -фракции характеризовался широким логнормальным распределением (подробнее см. в [9]). Граница раздела между фракциями выбрана в точке  $R^* = 0,55$  мкм. При указанном выборе границы на интервале  $[0, R^*]$  мкм сосредоточено 98,5% от общего геометрического сечения частиц дымки  $H$ . Комплексный показатель преломления вещества частиц считался одинаковым для обеих фракций и равным  $1,5-i \cdot 0$  на всех длинах волн.

Рис. 1, а дает представление о поведении интегральных функций распределения  $S^{(m)}(r)$ ,  $S^{(r)}(r)$  и их суммы для выбранной микроструктурной модели, а на рис. 1, б изображены соответствующие им спектральные зависимости АОТ.

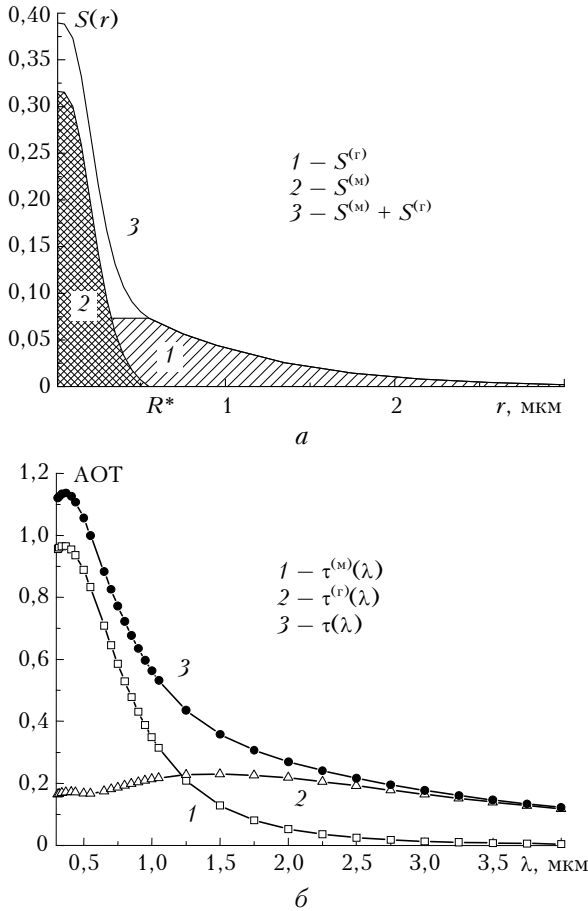


Рис. 1. Модель интегрального распределения  $S(r)$  геометрического сечения частиц по размерам ( $a$ ) и спектральные зависимости АОТ  $\tau(\lambda)$  ( $b$ ) с разделением на субмикронную ( $m$ ) и грубодисперсную ( $g$ ) фракции

Приведенные результаты иллюстрируют специфику оптико-микроструктурных взаимосвязей в спектральных зависимостях  $\tau(\lambda)$  для двух фракций, которая была отмечена при построении уравнений (9), (10).

На рис. 2 представлены результаты численного моделирования решения обратной задачи с известным показателем преломления в отсутствие ( $a$ ) и при наличии ( $b$ ) частиц  $g$ -фракции. Кривые (2) были получены из решения системы уравнений (2) путем минимизации функционала невязки  $F^2$  (6) на полном ансамбле частиц при ограничениях (3) методом условного градиента (алгоритм А). Из приведенных на рис. 2 зависимостей видно, что при добавлении  $g$ -фракции точность решения обратной задачи ухудшается. Это наводит на мысль о том, что потери в точности решения можно избежать, если разделить в оптических измерениях вклад

обеих фракций и решать обратную задачу для каждой из них. Рассмотренная в настоящей статье блочно-итерационная процедура (алгоритм В) предназначена для реализации этой идеи. Интегральное распределение  $S(r)$ , восстановленное при разделении ансамбля частиц на две фракции, представлено кривой 3 на рис. 2, б. Сравнение зависимостей, приведенных на рис. 2, б, указывает на положительный эффект, достигнутый в результате применения разработанного алгоритма.

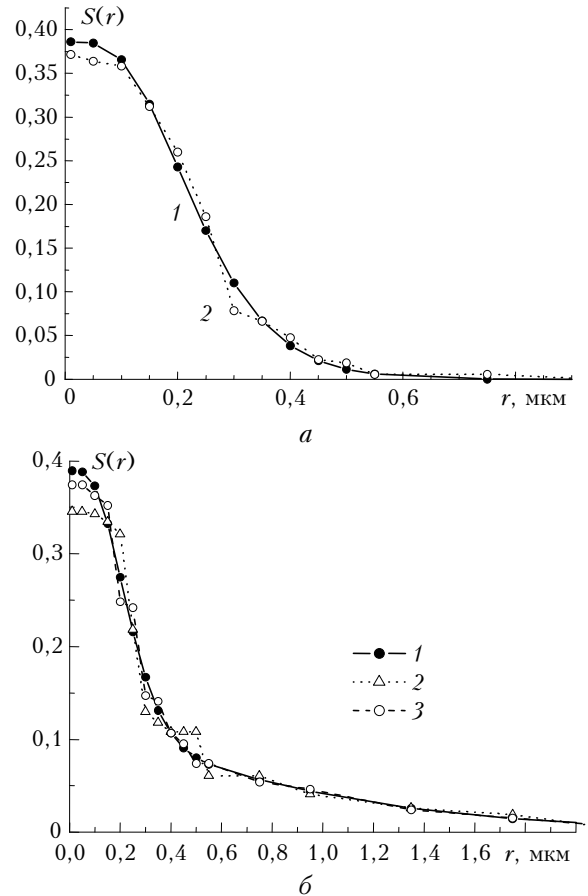


Рис. 2. Результаты восстановления интегральных аэрозольных распределений  $S(r)$  в численном эксперименте для модели субмикронного аэрозоля ( $a$ ) и при добавлении грубодисперсной фракции ( $b$ ); 1 – модель; 2 – решение на полном ансамбле; 3 – с применением блочно-итерационного алгоритма

Для рассмотренного примера в табл. 1 приведены результаты расчета интегральных параметров микроструктуры модельной среды – геометрического сечения  $S$ , объемного фактора заполнения  $V$  и среднего радиуса  $r_s$ , в том числе при разделении ансамбля на фракции.

Таблица 1

Микроструктурные параметры аэрозоля, восстановленные в численном эксперименте							
	$S$	$V, \text{ см}^3/\text{м}^2$	$V^{(m)}, \text{ см}^3/\text{м}^2$	$V^{(g)}, \text{ см}^3/\text{м}^2$	$r_s, \text{ мкм}$	$r_s^{(m)}, \text{ мкм}$	$r_s^{(g)}, \text{ мкм}$
Модель	0,390	0,227	0,102	0,125	0,437	0,241	1,285
Алгоритм А	0,345	0,223	0,108	0,116	0,485	0,283	1,432
Алгоритм В	0,374	0,225	0,101	0,124	0,448	0,249	1,303

Первая строка табл. 1 содержит точные значения микроструктурных параметров, а две последующие — результаты расчетов параметров по распределениям  $S(r)$ , изображенным на рис. 2, б кривыми 2 и 3 соответственно.

Мерой эффективности приведенных оценок служат данные об их относительной погрешности, приведенные в табл. 2, которые также позволяют объективно сравнивать результаты двух алгоритмов, полученные для различных восстанавливаемых параметров.

Таблица 2

Относительные погрешности восстановления микроструктурных параметров аэрозоля при известном показателе преломления, %

Алгоритм	$\varepsilon_S$	$\varepsilon_V$	$\varepsilon_V^{(M)}$	$\varepsilon_V^{(r)}$	$\varepsilon_r$	$\varepsilon_r^{(M)}$	$\varepsilon_r^{(r)}$
A	11,5	1,76	5,88	7,20	11,0	17,4	11,4
B	4,10	0,88	0,98	0,80	2,52	3,32	1,40

Данные табл. 2 наглядно демонстрируют преимущества, которые обеспечивает применение блочно-итерационного алгоритма при восстановлении практически всех рассмотренных параметров. В частности, ошибка восстановления геометрического сечения  $S$  уменьшается более чем на 7%. Также заметно улучшается точность определения среднего радиуса субмикронной фракции частиц  $r_s^{(M)}$ ; в то же время выбор метода оказывает слабое влияние на результаты восстановления суммарного объема частиц  $V$ . В целом, более высокая точность обеспечивается любым из рассмотренных алгоритмов при восстановлении объемного фактора заполнения как для полного ансамбля частиц, так и для его отдельных фракций.

Данные, представленные в табл. 1, 2, получены при решении обратной задачи с известным показателем преломления. Влияние ошибок в априорном задании показателя преломления на результаты обращения спектральных измерений АОТ  $\tau(\lambda)$  можно оценить на основании результатов работы [10]. Согласно [10], например, оценки объемного фактора  $V(v)$ , полученные при различных значениях показателя преломления  $v$ , удовлетворяют соотношению

$$V(v)(v-1) = \text{const}, \quad (15)$$

которое следует из формулы Хюльста [5] для фактора эффективности ослабления. Пользуясь формулой (15), нетрудно получить выражение среднего квадрата ошибки восстановления параметра  $V$

$$\delta_V^2 = V^2(v_0) \frac{\delta_v^2}{(v_0-1)^2} + [V(v_0) - V_0]^2, \quad (16)$$

где  $v_0$  и  $V_0$  — точные значения показателя преломления и параметра  $V$ ;  $\delta_v^2$  — средний квадрат ошибок

при задании показателя преломления  $v$ . Соотношения, аналогичные формулам (15), (16), справедливы также и для остальных параметров, приведенных в табл. 1, кроме геометрического сечения  $S$ .

С использованием формул вида (16) и данных табл. 1, 2 были рассчитаны относительные погрешности восстановления микроструктурных параметров при учете ошибки задания показателя преломления  $\delta_v = 0,05$ . Результаты расчетов представлены в табл. 3.

Согласно работе [10] ошибка определения сечения  $S$  не зависит от выбора  $v$  и в табл. 3 не приводится.

Таблица 3

Относительные погрешности восстановления микроструктурных параметров аэрозоля с учетом ошибки в показателе преломления ( $\delta v = 0,05$ ), %

Алгоритм	$\varepsilon_V$	$\varepsilon_V^{(M)}$	$\varepsilon_V^{(r)}$	$\varepsilon_r$	$\varepsilon_r^{(M)}$	$\varepsilon_r^{(r)}$
A	9,98	12,1	11,8	15,6	21,0	16,0
B	9,95	9,95	9,95	10,6	10,9	10,2

Анализ данных, представленных в табл. 3, показывает, что при наличии ошибки в показателе преломления преимущества блочно-итерационного алгоритма заметно падают. В первую очередь это относится к оценкам объемного фактора заполнения, где различие между алгоритмами не превышает около 2%. Вместе с тем блочно-итерационный алгоритм сохраняет, хотя и в меньшей степени, свою эффективность при оценке среднего размера частиц. Ошибка определения среднего радиуса понижается на 10% для м-фракции и на 5–6% для полного ансамбля и г-фракции частиц.

Полезно также оценить, в какой степени выбор алгоритма отражается на результатах обращения данных реальных измерений. Для примера на рис. 3 приведен временной ход микроструктурных параметров атмосферного аэрозоля, восстановленных двумя методами по среднечасовым измерениям АОТ в течение одного дня 20.08.2003 в условиях чистой атмосферы. Экспериментальные данные получены в ИОА СО РАН С.М. Сакеиным и Д.М. Кабановым с использованием солнечного фотометра SP [1, 11].

Как видно из рис. 3, а, в рассматриваемом случае, в отличие от модельного, объемная концентрация частиц г-фракции примерно вдвое превышает концентрацию частиц м-фракции. Относительное среднеквадратическое расхождение восстановленных зависимостей минимально для объемного фактора заполнения  $V$  полного ансамбля и составляет 3,4%, в то время как для отдельных фракций расхождение достигает 6–6,3%. Эти результаты хорошо согласуются с данными модельного эксперимента, приведенными в табл. 2. Среднеквадратическое расхождение восстановленных значений среднего радиуса частиц составляет 0,04 мкм по всему ансамблю и немного больше для г-фракции — 0,06 мкм.

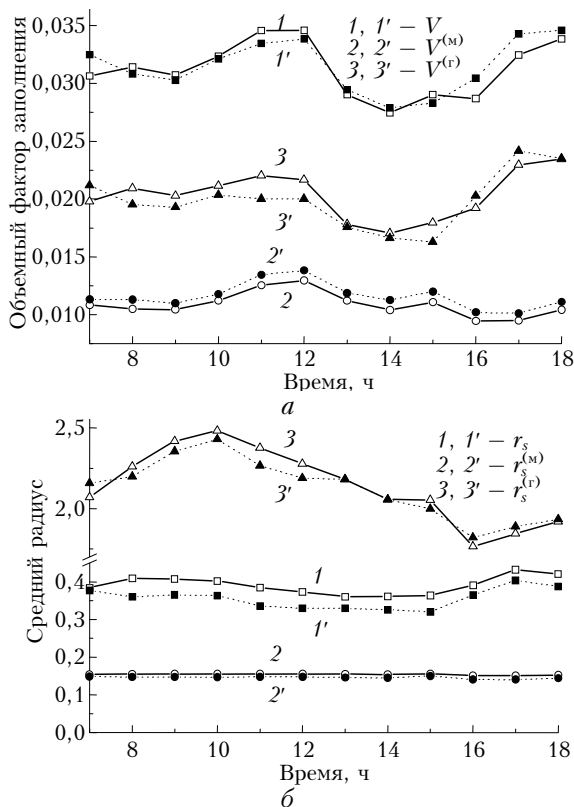


Рис. 3. Микроструктурные параметры аэрозоля, восстановленные по среднечасовым измерениям АОТ [11] в условиях чистой атмосферы на полном ансамбле (сплошные кривые) и с применением блочно-итерационного алгоритма (пунктир)

### Заклучение

Нами рассмотрена модификация алгоритма обращения спектральных измерений АОТ, в котором для описания дисперсного состава аэрозоля используются интегральные функции распределения. Для решения обратной задачи в предположении наличия в атмосфере субмикронной и грубодисперсной фракций матрица исходной системы уравнений была разделена на блоки, которые соответствуют двум фракциям в коротковолновом и длинноволновом диапазонах спектра. С учетом особенностей в оптическом проявлении различных фракций выделены подматрицы, отвечающие наибольшей информативности при решении обратной задачи. Это позволило проводить раздельное восстановление микроструктуры каждой фракции с применением итерационной процедуры.

В численном эксперименте исследована эффективность разработанной методики в сравнении с ранее предложенной. Анализ полученных результатов

показал следующее. Применение блочно-итерационного алгоритма обеспечивает повышение точности решения обратной задачи, в том числе при восстановлении интегральных микроструктурных параметров, таких как суммарное геометрическое сечение частиц, объемный фактор заполнения, средний радиус частиц для полного ансамбля и его отдельных фракций. В наибольшей степени преимущества методики проявляются при решении обратных задач с известным показателем преломления и сохраняются, если ошибка задания показателя преломления достигает 0,05. В последнем случае относительная погрешность восстановления микроструктурных параметров составляет, в среднем, около 10%.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке интеграционного проекта СО РАН № 75.

1. Кабанов Д.М., Сакерин С.М., Турчинович С.А. Солнечный фотометр для научного мониторинга (аппаратура, методики, алгоритмы) // Оптика атмосф. и океана. 2001. Т. 14. № 12. С. 1162–1169.
2. Веретенников В.В. Обратные задачи солнечной фотометрии для интегральных аэрозольных распределений. I. Теория и численный эксперимент в субмикронной области размеров частиц // Оптика атмосф. и океана. 2006. Т. 19. № 4. С. 294–300.
3. Кабанов Д.М., Веретенников В.В., Воронина Ю.В., Сакерин С.М., Турчинович Ю.С. Информационная система для сетевых солнечных фотометров // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22. № 1. С. 61–67.
4. Тихонов А.Н., Гончарский А.В., Степанов В.В., Ягола А.Г. Регуляризирующие алгоритмы и априорная информация. М.: Наука, 1983. 200 с.
5. Хюлст Г. ван де. Рассеяние света малыми частицами. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1961. 536 с.
6. Angström A. Parameters of atmospheric turbidity // Tellus XVI. 1964. N 1. P. 64–75.
7. Сакерин С.М., Кабанов Д.М. О взаимосвязях формулы Ангстрема и аэрозольной оптической толщи атмосферы в области спектра 1–4 мкм // Оптика атмосф. и океана. 2007. Т. 20. № 3. С. 222–228.
8. Деирменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. М.: Мир, 1971. 165 с.
9. Веретенников В.В. Обратные задачи солнечной фотометрии для интегральных аэрозольных распределений. II. Разделение на субмикронную и грубодисперсную фракции // Оптика атмосф. и океана. 2006. Т. 19. № 4. С. 301–307.
10. Веретенников В.В. Совместное определение микроструктуры и показателя преломления аэрозоля по данным солнечной фотометрии // Оптика атмосф. и океана. 2007. Т. 20. № 3. С. 214–221.
11. Веретенников В.В., Кабанов Д.М., Сакерин С.М. Анализ параметров микроструктуры аэрозоля по данным измерений солнечного фотометра в летний период над г. Томском // XV Рабочая группа «Аэрозоли Сибири»: Тез. докл. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2008. С. 55.

### V.V. Veretennikov, S.S. Men'shchikova. A block-iterative algorithm as applied to retrieval of aerosol integral size distributions from sun spectrophotometry data.

A modified method of retrieval of aerosol integral size distributions for solving solar photometry problems is presented. We assume that the fine and coarse fractions of particles are presented in the atmosphere. The initial matrix of the system is subdivided into four blocks in accordance with the two particle fractions and two spectral regions, short- and long-wavelength. Each of the two fractional integral size distributions is reconstructed separately using a block-iterative inversion algorithm and then is corrected iteratively. The possibilities of the suggested method are numerically evaluated in comparison with the results of inversion for the entire particle ensemble.