

В.В. Веретенников

Обратные задачи солнечной фотометрии для интегральных аэрозольных распределений.

II. Разделение на субмикронную и грубодисперсную фракции

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 3.10.2005 г.

Представлены результаты численного моделирования обратных задач солнечной фотометрии по восстановлению микроструктурных параметров аэрозоля с разделением на фракции по интервалу размеров частиц. Решение обратной задачи не использует никаких модельных представлений о функциях распределения частиц по размерам и основано на описании микроструктуры аэрозоля с помощью интегральных распределений. Для субмикронной и грубодисперсной фракций аэрозоля разработанная методика позволяет оценивать объемный фактор заполнения с погрешностью около 10%. При этом средний радиус частиц можно восстановить с точностью 0,02–0,06 мкм.

Введение

Настоящая статья является второй частью работы [1], в которой рассмотрены методические вопросы использования интегральных аэрозольных распределений при решении обратных задач солнечной фотометрии. Было показано, что переход от дифференциальных распределений частиц по размерам к интегральным распределениям при описании микроструктуры аэрозоля обеспечивает получение устойчивого решения обратной задачи путем минимизации функционала невязки при естественных ограничениях на класс допустимых решений (неотрицательность, монотонность, ограниченность). Располагая информацией об интегральном распределении по размерам, в дальнейшем легко перейти к более привычному для специалистов параметрам, характеризующим микроструктурные свойства аэрозоля, таким как концентрация, средний размер частиц, ширина распределения и т.п.

Хотя указанных параметров может оказаться вполне достаточно для решения многих задач, тем не менее представляет интерес получение более детализированной информации о состоянии микроструктуры на основе данных об интегральных аэрозольных распределениях. В первую очередь это относится к определению микроструктурных параметров аэрозоля на локальных интервалах области определения. Такая задача возникает, например, в случае, когда аэрозоль образован несколькими фракциями частиц, свойства которых могут изменяться независимо. При этом важно контролировать не только микрофизическое состояние ансамбля частиц в целом, но и параметры каждой его фракции.

В работе [1] представлены результаты численных экспериментов по определению среднего радиуса и объемного фактора заполнения из интегральных аэрозольных распределений, восстановленных при обращении коэффициента ослабления света. При этом микроструктурная модель включала только одну субмикронную фракцию, в качестве которой была выбрана модель типа «дымка H » [2]. В настоящей статье рассмотрена аналогичная задача для модели аэрозоля, образованного двумя фракциями – субмикронной и грубодисперсной. Микроструктурные параметры восстанавливались в численных экспериментах как для всей среды, так и для обеих ее фракций. В качестве входных данных для решения обратной задачи спектральные зависимости коэффициента ослабления были дополнены измерениями индикатрис рассеяния в малоугловой области.

1. Оптико-микроструктурная модель рассеивающей среды

Как уже упоминалось во введении, в численном эксперименте использовалась модель дисперсной среды, образованной двумя фракциями частиц, субмикронной (m) и грубодисперсной (g). В качестве модели для субмикронной фракции было выбрано модифицированное гамма-распределение с параметрами, соответствующими модели «дымка H » [2], а аналитическое описание грубодисперсной фракции задавалось в виде широкого логнормального распределения. Значения среднего радиуса \bar{r}_s для обеих фракций равны 0,25 и 1,23 мкм соответственно.

Веса, с которыми указанные фракции были представлены в суммарном распределении по размерам, могли варьироваться таким образом, чтобы обеспечить заданный относительный вклад $p = \varepsilon_r(\lambda^*)/\varepsilon(\lambda^*)$, вносимый γ -фракцией в коэффициент ослабления $\varepsilon = \varepsilon_m + \varepsilon_r$ на некоторой длине волны λ^* при дополнительном условии $\varepsilon(\lambda^*) = 1 \text{ км}^{-1}$ ($\lambda^* = 0,55 \text{ мкм}$). Выбирая различные значения p ($0 \leq p \leq 1$), можно изменять форму моделируемого распределения в широких пределах. Два крайних случая соответствуют ситуациям, в которых присутствует только одна из рассмотренных фракций, субмикронная ($p = 0$) или грубодисперсная ($p = 1$). Случай $p = 0$ детально рассмотрен в первой части работы [1]. Перейдем к рассмотрению случая $p > 0$.

На рис. 1, *а* изображена зависимость функции распределения геометрического сечения частиц по размерам $s(r)$ для значения $p = 0,2$ (кривая 3), когда в рассеянии света в видимом диапазоне спектра преобладающую роль играет субмикронная фракция частиц. Ей соответствует интегральное распределение $S_{\downarrow}(r) = \int_r^R s(r')dr'$, представленное ниже на рис. 4 (кривая 1). Об изменении спектра размеров частиц, происходящем с повышением содержания частиц γ -фракции, дает представление рис. 1, *б*, на котором показаны зависимости для $p = 0,5$. Из рис. 1 видно,

что при $r > 0,7 \text{ мкм}$ m -фракция частиц практически исчезает и γ -фракция становится доминирующей.

По выбранной микроструктурной модели рассчитывался дискретный набор значений коэффициента ослабления $\varepsilon(\lambda)$ из спектрального интервала $[0,31; 4,0] \text{ мкм}$ и индикатрис рассеяния $\mu(\theta)$ в диапазоне углов $2-12^\circ$, которые, после внесения в них ошибки, служили исходной информацией при решении обратной задачи.

На рис. 2 представлены результаты расчета спектральной зависимости коэффициента ослабления $\varepsilon(\lambda)$ (кривая 3) для двухкомпонентной модели аэрозольной среды с функцией распределения геометрического сечения частиц по размерам $s(r)$, изображенной на рис. 1. Здесь же приведены зависимости $\varepsilon_m(\lambda)$ (кривая 1) и $\varepsilon_r(\lambda)$ (кривая 2) для m - и γ -фракций аэрозоля. Комплексный показатель преломления $m = n - ik$ считался одинаковым для обеих фракций и равным $1,5 - i \cdot 0$ на всех длинах волн. Для представленной на рис. 2, *а* модели значение $\varepsilon_r(\lambda)$ на длине волны $\lambda = 0,55 \text{ мкм}$ составляет 20% от величины полного коэффициента ослабления $\varepsilon(\lambda)$. При перемещении от указанной длины волны вправо роль γ -фракции в ослаблении света непрерывно повышается и при $\lambda > 1,18 \text{ мкм}$ становится преобладающей. Как видно из рис. 2, *а*, изменчивость функции $\varepsilon(\lambda)$ в рассматриваемом диапазоне спектра обусловлена, главным образом, m -фракцией частиц,

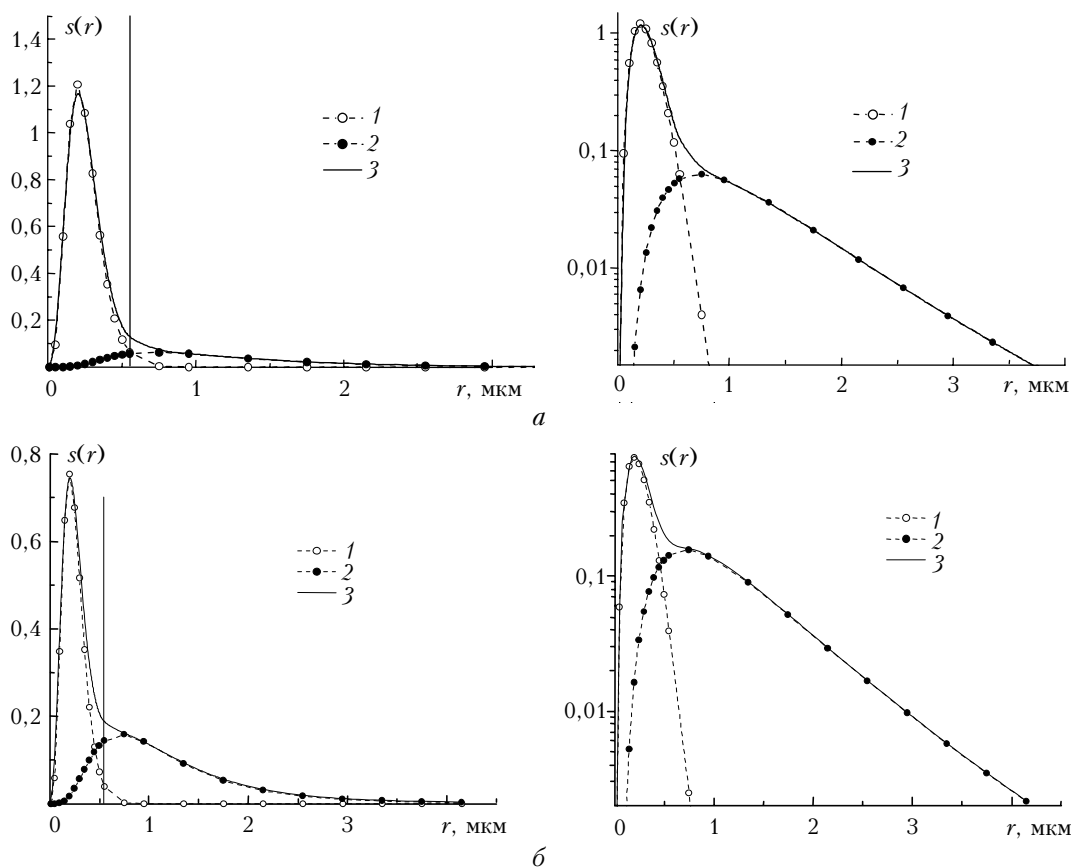


Рис. 1. Аэрозольные распределения субмикронной (1) и грубодисперсной (2) фракций и их взвешенная сумма (3). $p = 0,2$ (а); $0,5$ (б)

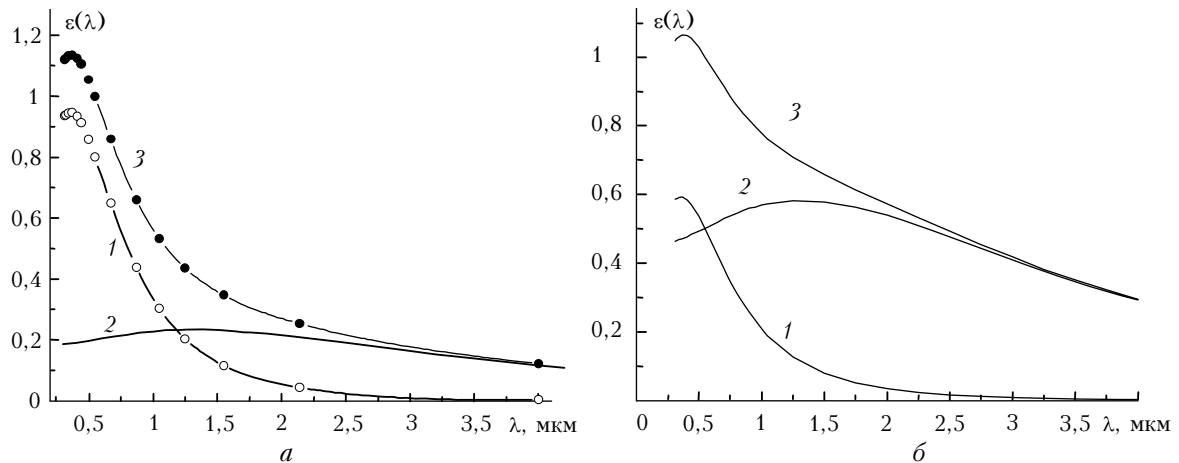


Рис. 2. Спектральный ход коэффициента ослабления $\varepsilon(\lambda)$ для аэрозольной модели, изображенной на рис. 1: 1, 2 – вклад субмикронной и грубодисперсной фракций; 3 – их сумма; $p = 0,2$ (а); $0,5$ (б)

для которой коэффициент ослабления $\varepsilon_m(\lambda)$ имеет максимум на длине волны $\lambda = 0,37$ мкм и круто спадает в направлении ИК-области. Ослабление света частицами г-фракции имеет более плавную спектральную зависимость с максимумом в окрестности $\lambda = 1,3$ мкм, понижаясь примерно вдвое к правому концу спектрального диапазона. Положение максимума по спектру близко к величине среднего радиуса \bar{r}_g для частиц г-фракции.

Рис. 2, б дает представление об изменении соотношения вкладов отдельных фракций в ослабление света с увеличением параметра p до 0,5. Особенностью данного примера является то, что, начиная с $\lambda = 0,55$ мкм и выше, г-фракция доминирует во всей области спектра. Тем не менее в поведении суммарного коэффициента ослабления $\varepsilon(\lambda)$ вплоть до $\lambda = 1,3$ мкм сохраняются качественные признаки, характерные для спектральной зависимости ослабления света м-фракцией частиц.

Рассмотрим теперь влияние микроструктуры двухкомпонентной модельной среды на поведение ореольных индикатрис рассеяния. На рис. 3, а показано поведение суммарной индикатрисы рассеяния $\mu(\theta)$ и ее составляющих $\mu_m(\theta)$ и $\mu_r(\theta)$ на длине волны $\lambda = 0,55$ мкм в диапазоне углов рассеяния $\theta = 2 \div 12^\circ$ при $p = 0,2$.

Из рис. 3, а видно, что индикатриса рассеяния $\mu_m(\theta)$ в указанном диапазоне углов меняется незначительно, что является признаком малой информативности данных измерений относительно м-фракции частиц. Вместе с тем эта компонента вносит основной вклад в рассеяние для углов более $5,5^\circ$.

С увеличением параметра p роль м-фракции частиц в малоугловом рассеянии еще более понижается, и, как видно, например, из рис. 3, б, при $p = 0,5$ вклад г-фракции становится доминирующим во всем рассматриваемом диапазоне углов рассеяния. В целом следует ожидать, что ореольные измерения индикатрисы рассеяния могут быть перспективны для диагностики микроструктурных параметров только г-фракции частиц. Данный вывод сохраняет силу при переходе к другим длинам волн.

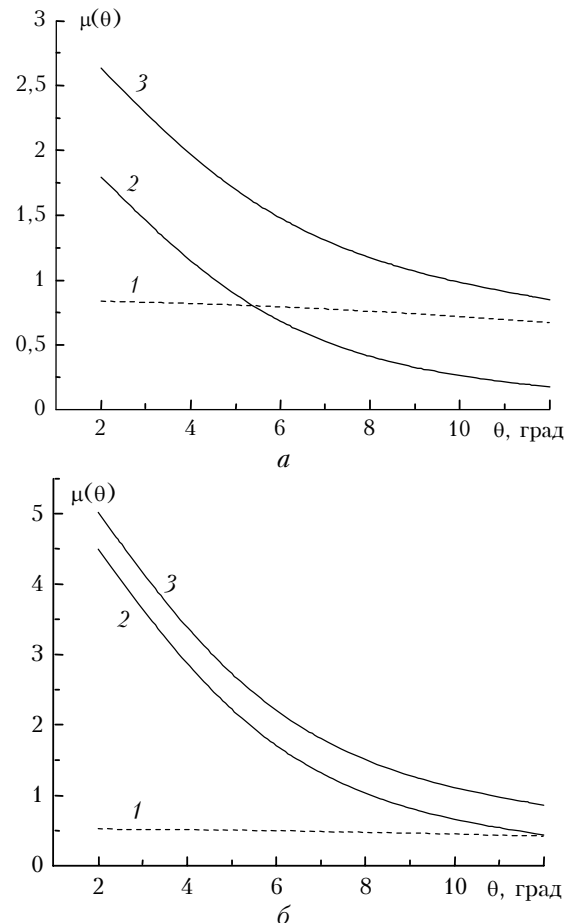


Рис. 3. Угловое поведение индикатрисы рассеяния $\mu(\theta)$ на длине волны $\lambda = 0,55$ мкм для аэрозольной модели, изображенной на рис. 1: 1, 2 – вклад субмикронной и грубодисперсной фракций; 3 – их сумма; $p = 0,2$ (а); $0,5$ (б)

Моделирование ошибок измерений. В численных экспериментах случайная ошибка вносилась в i -е измерение оптической характеристики f_{0i} по следующему правилу:

$$f_i = f_{0i}(1 + k_i \delta_i), \quad (1)$$

где коэффициент $k_i = \varepsilon_{0,i}/\varepsilon_{0i}$ для спектральных измерений $f_{0i} = \varepsilon_{0i}$ и $k_i = 1$ для угловых измерений $f_{0i} = \mu_{0i}$; $\delta_i = \delta(2\eta_i - 1)$, δ определяет уровень относительной погрешности, а η_i представляет собой реализацию случайной величины, равномерно распределенной в интервале $[0, 1)$.

2. Моделирование обратной задачи для коэффициента ослабления света

В данном разделе представлены результаты численных экспериментов по решению обратной задачи для коэффициента ослабления света в случае, когда в дисперсном составе присутствуют субмикронная и грубодисперсная фракции частиц (см. рис. 1).

При решении обратной задачи с использованием алгоритма [1] восстанавливалось интегральное распределение $S_{\downarrow}(r)$, по которому находились суммарное геометрическое сечение частиц $S = S_{\downarrow}(0)$, средний радиус частиц $\bar{r}_s = S^{-1} \int_0^R S_{\downarrow}(r) dr$, а также

объемный фактор заполнения $V = (4/3)S\bar{r}_s$. Поскольку в рассматриваемом случае среда образована двумя фракциями частиц, то представляет также интерес оценка указанных параметров на тех подынтервалах, где эти фракции преимущественно локализованы. Исходя из анализа аэрозольных распределений, представленных на рис. 1, в качестве условной границы, разделяющей обе фракции, было выбрано значение $R^* = 0,55$ мкм. Эта граница изображена на рис. 1 вертикальной линией. Интегральные распределения отдельных фракций имеют следующий вид:

$$S_{\downarrow}^{(m)}(r) = \begin{cases} S_{\downarrow}(r) - S_{\downarrow}(R^*), & r \leq R^*, \\ 0, & r > R^*, \end{cases} \quad (2)$$

$$S_{\downarrow}^{(r)}(r) = \begin{cases} S_{\downarrow}(R^*), & r \leq R^*, \\ S_{\downarrow}(r), & r > R^* \end{cases} \quad (3)$$

для м- и г-фракций частиц соответственно, а аналогичные микроструктурные параметры фракций рассчитываются по формулам:

$$S^{(m)} = S - S_{\downarrow}(R^*), \quad S^{(r)} = S_{\downarrow}(R^*), \quad (4)$$

$$V^{(m)} = (4/3) \int_0^{R^*} S_{\downarrow}^{(m)}(r) dr, \quad V^{(r)} = V - V^{(m)}, \quad (5)$$

$$\bar{r}_s^{(m)} = (3/4)V^{(m)}/S^{(m)}, \quad \bar{r}_s^{(r)} = (3/4)V^{(r)}/S^{(r)}. \quad (6)$$

2.1. Результаты обращения для $p = 0,2$

Результаты решения обратной задачи для спектральных зависимостей коэффициента ослабления $\varepsilon(\lambda)$ для $p = 0,2$ (см. рис. 2, а) с внесенной в них по формуле (1) случайной ошибкой представлены на рис. 4.

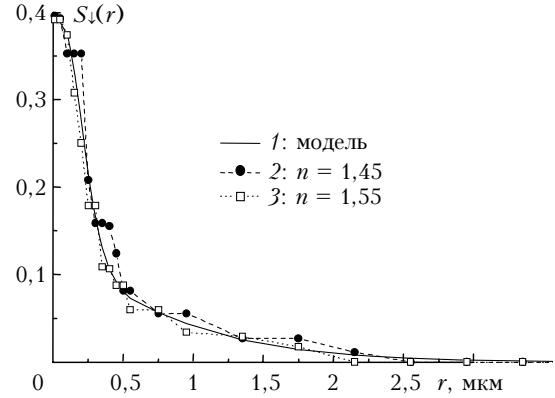


Рис. 4. Примеры обращения спектральных измерений коэффициента ослабления $\varepsilon(\lambda)$: 1 – модельное распределение $S_{\downarrow 0}(r)$ для $p = 0,2$; 2, 3 – распределения $S_{\downarrow \delta}(r)$, восстановленные при различном выборе показателя преломления и ошибке измерений $\delta = 0,1$

В рассмотренном примере, как и для одной фракции при $p = 0$ [1], ошибки задания вещественной и мнимой частей показателя преломления не превышали 0,05 по абсолютной величине. Как видно из рис. 4, все восстановленные решения $S_{\downarrow \delta}(r)$ сосредоточены в пределах $r < 2,15$ – $2,55$ мкм. За пределами указанных границ вклад частиц в суммарное сечение в точном распределении $S_{\downarrow 0}(r)$ не превышает 1–2%.

Результаты оценки интегральных параметров микроструктуры V и \bar{r}_s по восстановленным распределениям $S_{\downarrow \delta}(r)$ представлены в табл. 1 и 2. Интегральные параметры отдельных фракций $\bar{r}_s^{(m)}$ и $V^{(m)}$, $\bar{r}_s^{(r)}$ и $V^{(r)}$ вычислялись на подынтервалах $[0; 0,55]$ и $[0,55; 4,15]$ мкм соответственно.

Таблица 1

Результаты восстановления объемного фактора заполнения V в задаче обращения спектральных зависимостей $\varepsilon(\lambda)$ при $p = 0,2$ и $\delta = 0,1$

Параметр	Точные данные	$n = 1,5$	$n = 1,45$	$n = 1,55$	$\kappa = 0,05$
V	0,227	0,226	0,249	0,210	0,217
$V^{(m)}$	0,102	0,112	0,108	0,105	0,119
$V^{(r)}$	0,125	0,113	0,142	0,105	0,098

Таблица 2

Результаты восстановления средних радиусов модельных распределений в задаче обращения спектральных зависимостей $\varepsilon(\lambda)$ при $p = 0,2$ и $\delta = 0,1$

Параметр, мкм	Точные данные	$n = 1,5$	$n = 1,45$	$n = 1,55$	$\kappa = 0,05$
\bar{r}_s	0,437	0,460	0,472	0,402	0,419
$\bar{r}_s^{(m)}$	0,241	0,273	0,257	0,237	0,262
$\bar{r}_s^{(r)}$	1,285	1,448	1,30	1,323	1,527

Табл. 1 содержит сведения о восстановлении объемного фактора заполнения с разделением по фракциям. Объем частиц, занимаемый каждой фракцией, примерно одинаковый. Обращает на себя внимание высокая точность определения полного фак-

тора заполнения V — ошибка составляет около 0,5% при известном показателе преломления и возрастает до 10% при наличии ошибок в показателе преломления. Что же касается отдельных фракций, то в целом факторы заполнения $V^{(м)}$ и $V^{(г)}$ восстанавливаются хуже — ошибка достигает 10% уже при известном показателе преломления. Неточности в задании показателя преломления в большей степени влияют на погрешность в оценке $V^{(г)}$, которая при $\kappa = 0,05$ увеличивается до 22%.

Табл. 2 имеет аналогичную структуру и содержит сведения о восстановленных средних радиусах по всему диапазону размеров в целом и с разделением по фракциям. Так же, как и в случае восстановления объемного фактора заполнения, более точными здесь оказываются оценки \bar{r}_s , которые характеризуют дисперсный состав в целом. Абсолютная ошибка определения среднего радиуса \bar{r}_s составляет около 0,02 мкм при известном показателе преломления и может увеличиться до 0,035 мкм при $|\Delta n| = 0,05$. Для частиц субмикронного диапазона погрешность определения $\bar{r}_s^{(м)}$ немного выше и равна 0,03 мкм для $n = 1,5$. Более высокой по абсолютной величине оказывается погрешность определения среднего радиуса $\bar{r}_s^{(г)}$ частиц грубодисперсной фракции. При известном показателе преломления она достигает 0,16 мкм.

2.2. Результаты обращения для $p = 0,5$

На рис. 5 представлены результаты восстановления распределений $S_{\downarrow\delta}(r)$ в численном эксперименте при более высоком вкладе больших частиц ($p = 0,5$). В остальных условиях численного моделирования полностью идентичны случаю $p = 0,2$.

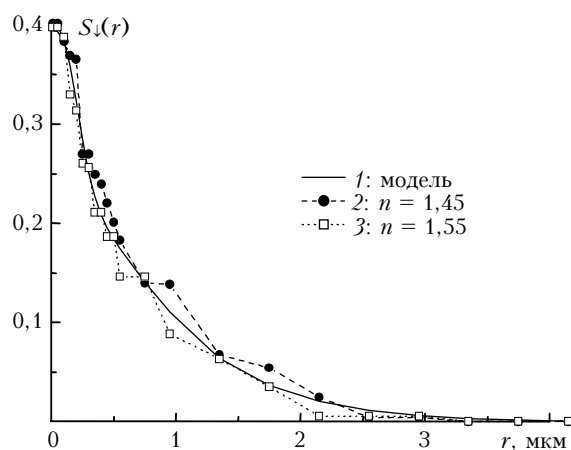


Рис. 5. Примеры обращения спектральных измерений коэффициента ослабления $\epsilon(\lambda)$: 1 — модельное распределение $S_{\downarrow\delta}(r)$ для $p = 0,5$; 2, 3 — распределения $S_{\downarrow\delta}(r)$, восстановленные при различном выборе показателя преломления и ошибке измерений $\delta = 0,1$

Соответствующие оценки микроструктурных параметров приведены в табл. 3 и 4. Отметим основные отличия полученных результатов от предыдущего случая. Во-первых, как видно из рис. 5, верхняя граница области, в которой локализованы восста-

новленные микроструктурные распределения, сместилась правее и составляет 3,35–3,75 мкм. При этом доля частиц в модельном распределении $S_{\downarrow\delta}(r)$ за пределами указанных границ по-прежнему мала — не более 1% по геометрическому сечению.

Таблица 3

Результаты восстановления объемного фактора заполнения V в задаче обращения спектральных зависимостей $\epsilon(\lambda)$ при $p = 0,5$ и $\delta = 0,1$

Параметр	Точные данные	$n = 1,5$	$n = 1,45$	$n = 1,55$	$\kappa = 0,05$
V	0,382	0,367	0,412	0,351	0,359
$V^{(м)}$	0,0758	0,0937	0,0804	0,0905	0,0871
$V^{(г)}$	0,306	0,273	0,331	0,260	0,272

Таблица 4

Результаты восстановления средних радиусов модельных распределений в задаче обращения спектральных зависимостей $\epsilon(\lambda)$ при $p = 0,5$ и $\delta = 0,1$

Параметр, мкм	Точные данные	$n = 1,5$	$n = 1,45$	$n = 1,55$	$\kappa = 0,05$
\bar{r}_s	0,725	0,737	0,768	0,660	0,650
$\bar{r}_s^{(м)}$	0,258	0,315	0,276	0,269	0,259
$\bar{r}_s^{(г)}$	1,317	1,367	1,356	1,334	1,258

Сравнение данных табл. 1 и 3 показывает, что изменение соотношения между содержанием частиц разных фракций слабо влияет на точность определения полного фактора заполнения V . При разделении на фракции картина становится несколько иной. Здесь при сравнении следует иметь в виду, что с увеличением p от 0,2 до 0,5, наряду с существенным возрастанием суммарного объема частиц (почти на 70%), значительно уменьшилась по объёмному содержанию относительная доля субмикронных частиц: от 45 до 20%. Поэтому более корректным будет сравнение результатов восстановления частичных факторов $V^{(м)}$ и $V^{(г)}$ при различных значениях p по отношению к соответствующим суммарным значениям V . С учетом сказанного, например при известном показателе преломления, ошибка восстановления объемного фактора заполнения $V^{(м)}$, отнесенная к V , заключена в пределах 4–5% для обоих случаев. Расхождение между аналогичными результатами, полученными при восстановлении объемных факторов заполнения $V^{(г)}$, составляет около 3%.

Перейдем к анализу данных по восстановлению среднего радиуса частиц, представленных в табл. 4 для модели аэрозоля с параметром $p = 0,5$. Прежде всего, отметим, что увеличение p привело к сдвигу вправо среднего радиуса \bar{r}_s для полного ансамбля частиц от 0,44 до 0,73 мкм. Сравнение данных табл. 2 и 4 показывает, что так же, как и в случае восстановления полного фактора заполнения V , изменение соотношения между фракциями практически не повлияло на точность определения среднего радиуса \bar{r}_s при известном показателе преломления. При этом для частиц м- и г-фракций абсолютные

ошибки определения средних радиусов $\bar{r}_s^{(m)}$ и $\bar{r}_s^{(r)}$ выровнялись и составили 0,05–0,06 мкм. С учетом неопределенности в задании показателя преломления в пределах 0,05 максимальная ошибка определения \bar{r}_s не превосходит 0,075 мкм.

3. Результаты обращения измерений ореольных индикатрис рассеяния

Из результатов численного моделирования решения обратной задачи для спектральных измерений ослабления света можно сделать вывод, что указанные измерения вполне достаточно для эффективного восстановления как аэрозольной функции распределения по размерам, так и интегральных микроструктурных параметров частиц при широких вариациях их дисперсного состава, особенно при известном показателе преломления частиц аэрозоля.

С точки зрения получения информации о микроразличиях свойствах аэрозоля представляет интерес сравнение двух оптических методов диагностики: по измерениям спектрального ослабления света и рассеянного света в области солнечного ореола.

Как показали результаты обращения ореольных измерений индикатрис рассеяния, их точность невысока для субмикронных частиц, где спектральные измерения ослабления света имеют явные преимущества. Для больших частиц оба метода сопоставимы по точностным характеристикам. Данный результат вполне предсказуем из сравнения рассеивающих свойств грубодисперсных и субмикронных частиц в малоугловой области, наблюдаемых на рис. 3. Для того чтобы хоть в какой-то степени повысить роль субмикронных частиц в области ореола, необходимо производить угловые измерения индикатрис в УФ-области спектра.

На рис. 6 показаны угловые зависимости модельных индикатрис рассеяния на трех длинах волн: $\lambda = 0,31$; 0,4 и 0,55 мкм, выбранные для решения обратной задачи при $p = 0,2$.

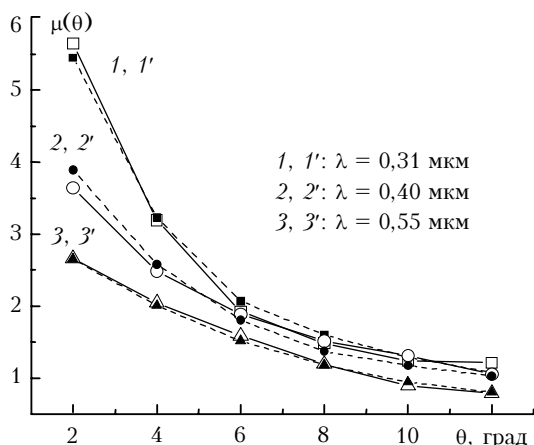


Рис. 6. Угловые зависимости индикатрис рассеяния $\mu(\theta)$ для трех длин волн. Сплошные кривые – расчет по модельному распределению $S_{\downarrow 0}(r)$ при $p = 0,2$; штриховые – расчет по распределению, восстановленному из решения обратной задачи для индикатрис рассеяния, приведенному на рис. 7 (кривая 1)

Случайная ошибка измерений индикатрис рассеяния моделировалась согласно формуле (1) при $\delta = 0,1$. Результат восстановления интегрального распределения $S_{\downarrow 0}(r)$ показан на рис. 7 (кривая 1). Основное отличие представленного решения от результатов обращения спектральных измерений коэффициента ослабления заключается, во-первых, в заниженных значениях функции $S_{\downarrow 0}(r)$ при малых радиусах $r < 0,15$ мкм и, во-вторых, в более полном учете больших частиц за счет сдвига вправо до 3,35 мкм верхней границы ненулевых значений восстановленного распределения.

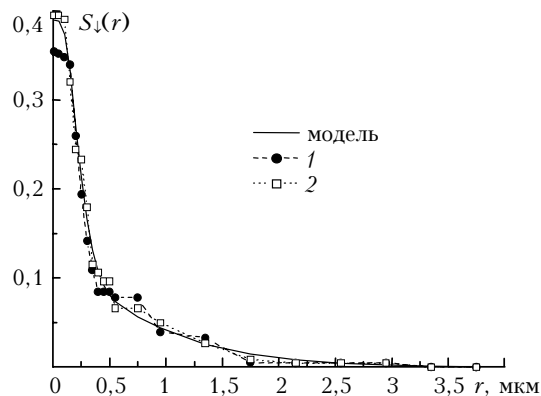


Рис. 7. Аэрозольные распределения $S_{\downarrow 0}(r)$, восстановленные при обращении индикатрисы рассеяния $\mu(\theta)$, представленной на рис. 6 (кривая 1), и при добавлении измерений коэффициента ослабления $\epsilon(\lambda)$ (кривая 2)

Отмеченные особенности отразились в результатах оценок микроструктурных параметров, представленных в табл. 5 и 6.

Таблица 5

Результаты восстановления объемного фактора заполнения V в задаче обращения ореольной индикатрисы рассеяния при $p = 0,2$ и $\delta = 0,1$

Параметр	Точные данные	$n = 1,5$	$n = 1,45$	$n = 1,55$	$\kappa = 0,05$	$(\mu + \epsilon)$
V	0,227	0,217	0,204	0,223	0,241	0,227
$V^{(m)}$	0,102	0,0865	0,0885	0,0926	0,132	0,108
$V^{(r)}$	0,125	0,131	0,116	0,130	0,109	0,120

Таблица 6

Результаты восстановления средних радиусов модельных распределений в задаче обращения ореольной индикатрисы рассеяния при $p = 0,2$ и $\delta = 0,1$

Параметр, мкм	Точные данные	$n = 1,5$	$n = 1,45$	$n = 1,55$	$\kappa = 0,05$	$(\mu + \epsilon)$
\bar{r}_s	0,437	0,459	0,559	0,465	0,467	0,431
$\bar{r}_s^{(m)}$	0,241	0,235	0,317	0,253	0,301	0,245
$\bar{r}_s^{(r)}$	1,285	1,253	1,335	1,148	1,388	1,357

Из табл. 5 видно, что в рассмотренном примере ошибка определения полного фактора заполнения V составляет около 4% при известном показателе преломления и не выходит за пределы 10% при ошибках в задании показателя преломления $|\Delta n|$, $|\Delta \kappa| = 0,05$. Эти оценки, так же как и оценки среднего радиуса \bar{r}_s , представленные в табл. 6, близки

к результатам, полученным при обращении спектральных зависимостей коэффициента ослабления.

Что же касается оценки аналогичных параметров для отдельных фракций, то здесь наблюдается несколько иная картина. При высокой точности оценки среднего радиуса м-фракции $\bar{r}_s^{(m)}$ измерения ореольных индикатрис рассеяния для ансамбля частиц с известным показателем преломления дают заниженную оценку объемного фактора $V^{(m)}$ с ошибкой 16%. Параметры г-фракции восстанавливаются более точно. В частности, при известном показателе преломления ошибки определения объемного фактора $V^{(r)}$ уменьшаются примерно вдвое и составляют 5%, а средний радиус $\bar{r}_s^{(r)}$ может быть определен с точностью около 0,03 мкм.

В заключение кратко остановимся на результатах совместного обращения спектральных измерений коэффициента ослабления и индикатрисы рассеяния. Условия моделирования соответствовали рассмотренным ранее примерам для каждой оптической характеристики при $p = 0,2$ и известном показателе преломления. Восстановленное интегральное распределение $S_{\downarrow s}(r)$ представлено на рис. 7 (кривая 2), а соответствующие микроструктурные параметры приведены в последних столбцах табл. 5 и 6. Сравнение кривых 1 и 2 на рис. 7 показывает заметное улучшение результатов восстановления функции $S_{\downarrow s}(r)$ в области малых радиусов r при добавлении спектральных измерений коэффициента ослабления к измерениям индикатрис рассеяния. Некоторое повышение точности решения обратной задачи достигается также во всем диапазоне размеров.

При восстановлении интегральных параметров частиц отличие полученных результатов проявилось в первую очередь в уточнении объемного содержания $V^{(m)}$ частиц м-фракции по отношению к результатам, достигнутым при раздельном обращении характеристик $\epsilon(\lambda)$ и $\mu(\theta)$. Как видно из табл. 5, измерения $\mu(\theta)$ обеспечивают высокую точность оценки параметра $V^{(r)}$ для грубодисперсной фракции. Дополнительное привлечение данных об ослаблении света не отражается на точности получаемого результата.

При восстановлении среднего радиуса частиц \bar{r}_s ошибка также уменьшилась, несмотря на то что она уже была достаточно низкой. Напротив, привлечение дополнительных измерений $\epsilon(\lambda)$ для оценки среднего радиуса $\bar{r}_s^{(r)}$ грубодисперсной фракции привело к ухудшению результата, который приблизился к тому значению, которое было получено только из одних измерений спектрального ослабления.

Заключение

В результате проведенных численных экспериментов получена обширная информация по оценке возможностей применения интегральных распреде-

лений при решении обратных задач солнечной фотометрии. В расчетах использована модель аэрозоля, образованного субмикронной и грубодисперсной фракциями, при изменении относительного содержания первой фракции по объему от 20 до 100%.

Показано, что разработанная методика решения обратной задачи позволяет контролировать микроструктуру аэрозоля, включая такие ее параметры, как геометрическое сечение, объемный фактор заполнения, средний радиус в широком диапазоне размеров частиц, в том числе с разделением на фракции. При этом за пределами границ размеров неучтенными могут оказаться не более 1–2% от общего содержания частиц по сечению.

Наиболее точно восстанавливаются те параметры микроструктуры, которые характеризуют весь ансамбль частиц в целом. При точности, которая обеспечивается солнечными фотометрами в реальных измерениях прозрачности атмосферы, и известном показателе преломления ошибка восстановления объемного фактора заполнения не превышает 6% и возрастает до 10% для отдельных фракций.

При тех же условиях средний радиус частиц по всему ансамблю можно определить с погрешностью около 0,02 мкм. Для отдельных фракций эта величина достигает уровня 0,06 мкм и может варьировать в зависимости от их относительного вклада в измеряемые характеристики.

Как показывают численные эксперименты, угловые измерения индикатрис рассеяния в области ореола малоинформативны относительно свойств субмикронного аэрозоля и соизмеримы по точности восстановления параметров микроструктуры со спектральными измерениями прозрачности для широких аэрозольных распределений, в которых присутствует грубодисперсная фракция. В частности, из измерений ореольных индикатрис рассеяния можно восстановить величину фактора заполнения грубодисперсной фракции с ошибкой около 5%, а средний радиус – с ошибкой 0,03 мкм.

При совместном обращении спектральных измерений коэффициента ослабления и ореольных индикатрис рассеяния наибольший положительный эффект достигается в более точной оценке объемного содержания частиц субмикронной фракции по отношению к результатам, полученным при раздельном обращении этих характеристик.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 05-05-64410).

1. 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.
2. Дейрменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. М.: Мир, 1971. 165 с.

V. V. Veretennikov. Inverse problems of solar photometry for integral aerosol distributions. II. Separation into sub-micron and coarse fractions.

The results of numerical modeling of reconstruction of aerosol microstructure parameters with separation into particle size fractions are presented. The solving of the inverse problem is based on description of the aerosol microstructure using integral distributions. In case of sub-micron and coarse aerosol fractions, the developed method allows an estimate of the volume factor with a 10% error; the average particle radius can be reconstructed with a 0.02–0.06 μm accuracy.