

Микрофизическая экстраполяция в задаче обращения спектральных измерений аэрозольной оптической толщины

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 26.05.2011 г.

Рассмотрены особенности определения дисперсного состава аэрозоля из спектральных измерений аэрозольной оптической толщины (АОТ) с учетом малой информативности решения в микродисперсной области. Предложен алгоритм коррекции результатов обращения АОТ с использованием процедуры микрофизической экстраполяции, которая позволяет учитывать вклад частиц из микродисперсной области в рамках существующих модельных представлений. Описанный подход реализован применительно к методу интегральных распределений в обратной задаче солнечной фотометрии и исследован в замкнутых численных экспериментах.

Ключевые слова: микроструктура аэрозоля, аэрозольная оптическая толщина, обратные задачи; aerosol microstructure, aerosol optical depth, inverse problem.

Введение

Спектральные измерения аэрозольной оптической толщины (АОТ) относятся к традиционным инструментам, которые используются уже не одно десятилетие при исследовании атмосферного аэрозоля в природных условиях. Со спектральными измерениями связаны первые работы по определению микроструктуры атмосферного аэрозоля оптическими методами на основе решения обратных задач [1–5]. Достигнутый уровень развития экспериментальной техники солнечной спектрофотометрии в сочетании с современными методами решения обратных задач обеспечивает возможность регулярного получения информации об оптических и микрофизических свойствах аэрозоля, охватывая обширные регионы Земли [6–9].

Известно, что измерения АОТ в видимой и ИК-областях спектра являются малоинформативными относительно дисперсного состава аэрозоля в диапазоне размеров частиц менее 0,1–0,15 мкм. Одна из причин этого заключается в том, что для таких частиц в указанных областях спектра фактор эффективности ослабления принимает небольшие значения, что определяет их низкую оптическую активность.

Другая особенность фактора эффективности ослабления света малыми частицами приводит к тому, что практически одинаковый спектральный ход коэффициента ослабления может быть обусловлен как большим числом очень мелких частиц, так и меньшим количеством более крупных частиц.

Указанная неоднозначность затрудняет интерпретацию оптических экспериментов.

В то же время с развитием измерительной техники появились новые данные, свидетельствующие об относительно высоком содержании в аэрозоле микродисперсных частиц [10–14]. Оценки показывают, что их вклад в суммарное геометрическое сечение может достигать 50%. Значения микроструктурных параметров аэрозоля, восстановленные при обращении измерений АОТ без учета роли микродисперсных частиц, могут существенно отличаться от истинных значений.

Способы учета априорной информации о микроструктуре аэрозоля зависят от применяемых методов обращения оптических измерений. В настоящей статье предлагается алгоритм коррекции результатов обращения АОТ с использованием процедуры микрофизической экстраполяции, которая позволяет учитывать вклад частиц из микродисперсной области в рамках существующих модельных представлений. Рассмотренный подход реализован применительно к методу интегральных распределений [15], который разработан для интерпретации данных сетевых солнечных фотометров типа SP [8, 9, 16], созданных в ИОА СО РАН.

1. Постановка задачи

Информативность спектральных измерений ослабления света наиболее высока относительно тех частиц, размеры которых близки к длине волны излучения. Поскольку измерения ослабления света в земной атмосфере ограничены снизу по спектру областью $\lambda > 0,3$ мкм, то это накладывает соответствующие ограничения на диапазон оптически активных частиц. Оптическая активность аэрозольных частиц характеризуется фактором эффектив-

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

ности ослабления. Например, средний фактор эффективности ослабления $\bar{K}(\lambda)$ на длине волны $\lambda = 0,55$ мкм в диапазоне радиусов частиц 0,4–0,5 мкм равен 3,95 (для показателя преломления $n = 1,45$). При переходе в диапазон 0,001–0,1 мкм значение $\bar{K}(\lambda)$ опускается до 0,067, т.е. почти в 60 раз. Следовательно, для того чтобы вклады в ослабление света ансамблями частиц из указанных диапазонов были соизмеримыми, их суммарные сечения должны соотноситься в обратной пропорции. При переходе к счетным концентрациям различие уже будет составлять более трех порядков. Следует подчеркнуть, что приведенные оценки относятся к выбранной длине волны и с изменением λ все соотношения также изменятся.

Другая, не менее важная причина состоит в том, что с уменьшением размеров частицы по своим оптическим свойствам становятся все более близкими к рэлеевским частицам [17], для которых $|n| \rho \ll 1$, $\rho = kr$, $k = 2\pi/\lambda$. Рассматривая для простоты непоглощающие рэлеевские частицы, для которых фактор эффективности ослабления $K_{\text{Rey}}(\rho) \sim \rho^4$, нетрудно убедиться, что одинаковая спектральная зависимость коэффициента ослабления $\varepsilon^{\text{Rey}}(\lambda) \sim \lambda^{-4}$ может быть обеспечена как большим количеством мелких частиц, так и меньшим числом более крупных частиц, также принадлежащих рэлеевской области.

Рассмотрим, например, два ансамбля рэлеевских частиц с радиусом r_i и счетной концентрацией N_i , $i = 1, 2$. Тогда для равенства коэффициентов ослабления $\varepsilon_1^{\text{Rey}}(\lambda) = \varepsilon_2^{\text{Rey}}(\lambda)$ необходимо выполнение следующего соотношения:

$$N_1/N_2 = (r_2/r_1)^6. \quad (1)$$

При переходе к полидисперсному ансамблю получим

$$\varepsilon^{\text{Rey}}(\lambda) \sim \lambda^{-4} S^{\text{Rey}} \langle r^4 \rangle_{\text{Rey}}, \quad (2)$$

где S^{Rey} – суммарное сечение всех рэлеевских частиц, а скобками $\langle \rangle_{\text{Rey}}$ обозначено усреднение по размерам. Из формулы (2) видно, что сечение и размер частиц определяют коэффициент ослабления $\varepsilon^{\text{Rey}}(\lambda)$ мультипликативно, поэтому разделить их в оптических экспериментах невозможно.

Хотя такой вывод строго справедлив только в отношении рэлеевских частиц, отмеченные тенденции будут проявляться и для более крупных частиц, усиливаясь по мере продвижения их размеров в микродисперсную область. Неопределенность в оценке параметров частиц микродисперсной области отразится на результатах восстановления интегральных параметров микроструктуры для полного ансамбля частиц, таких, например, как суммарное геометрическое сечение, объемная концентрация, средний размер и т.п.

Из сказанного следует очевидное предложение: при оценке перечисленных параметров по результатам решения обратной задачи исключать из рассмотрения частицы размерами меньше некоторого порогового значения r_p , определяющего верхнюю границу микродисперсной области.

Поскольку микродисперсные частицы могут вносить заметный вклад в оптические свойства аэрозоля, то естественно учесть это разделение на этапе постановки обратной задачи. Обратимся для примера к схеме обращения спектральных измерений аэрозольной оптической толщины $\tau(\lambda)$, в которой для описания дисперсного состава аэрозоля используется интегральная функция распределения $S(r)$ [15]. Функция $S(r)$ определяет суммарное геометрическое сечение частиц радиусом, большим или равным r , которые содержатся в вертикальном столбе атмосферы единичной площади. В частности, значение $S(r_p)$ определяет суммарное сечение без учета вклада микродисперсных частиц. Выделяя в оптической толщине $\tau(\lambda)$ вклад, вносимый микродисперсными частицами, $\tau_c(\lambda)$, запишем уравнение относительно распределения $S(r)$ в области $r \geq r_p$ в следующем алгебраизованном виде:

$$\sum_{j=p}^n Q_j(\lambda) S_j + \tau_c(\lambda) = \tau(\lambda), \quad (3)$$

где $S_j = S(r_j)$ – значения искомой функции в узлах r_j , $j = p, \dots, n$; коэффициенты $Q_j(\lambda)$ находятся по формулам [18]:

$$Q_j(\lambda) = \begin{cases} \bar{K}_p(\lambda), & j = p; \\ \bar{K}_j(\lambda) - \bar{K}_{j-1}(\lambda), & j \neq p; \end{cases} \quad (4)$$

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

– среднее значение фактора эффективности ослабления $K(\lambda, r)$ на интервале $[r_j, r_{j+1}]$. В случае рэлеевского рассеяния $\tau_c(\lambda) = A\lambda^{-c}$, где $c = 4$. С учетом отклонения рассеивающих свойств микродисперсных частиц от рэлеевских последнее соотношение можно рассматривать как степенную аппроксимацию спектральной зависимости $\tau_c(\lambda)$ с параметрами A и $c \leq 4$. В итоге мы приходим к следующему уравнению относительно параметров A , c и вектора S :

$$\sum_{j=p}^n Q_j(\lambda) S_j + A\lambda^{-c} = \tau(\lambda). \quad (6)$$

В случае априорного задания параметра c остальные неизвестные входят в уравнение (6) линейно, что значительно упрощает его решение. Таким образом, в рассмотренной постановке задача определена относительно дисперсного состава аэрозоля при $r \geq r_p$, характеризуемого вектором S , и спектральной зависимости $\tau_c(\lambda)$, обусловленной ослаблением света остальными частицами.

2. Алгоритм коррекции микродисперсной фракции

В подходе, рассмотренном в разд. 1, оценка вклада малых частиц в ослабление света осуществляется без рассмотрения их дисперсного состава. Учет микроструктуры малых частиц, которые

определяют поведение второго слагаемого в правой части уравнения (3), предлагается провести на основе современных модельных представлений следующим способом.

Предположим, что в качестве микроструктурной модели таких частиц рассматривается функция распределения геометрического сечения $s_c(r) = A_c s_{c0}(r)$ с неизвестным параметром A_c и заданными остальными параметрами. Это позволяет представить выражение для оптической толщины $\tau_c(\lambda)$ в уравнении (3) в виде

$$\tau_c(\lambda) = A_c \tau_{c0}(\lambda), \quad \tau_{c0}(\lambda) = \int_0^{r_p} K(\lambda, r) s_{c0}(r) dr. \quad (7)$$

Дополнительно определим условия, на основе которых будет установлена связь между модельным аэрозольным распределением $s_c(r)$ и искомым интегральным распределением $S(r)$. Это можно сделать разными путями.

Оценим, например, приращение функции $S(r)$ на интервале $[r_p, r_{p+1}]$:

$$\Delta S_p = S_p - S_{p+1} \quad (8)$$

и потребуем, чтобы среднее значение на указанном интервале

$$\bar{s}_p = \Delta S_p / \Delta_p, \quad \Delta_p = r_{p+1} - r_p \quad (9)$$

совпадало со значением модельного распределения $s_c(r)$ в точке r_p . Это позволяет определить параметр модели

$$A_c = \frac{\bar{s}_p}{s_{c0}(r_p)}, \quad (10)$$

что приводит к выражению оптической толщины $\tau_c(\lambda)$ в виде

$$\tau_c(\lambda) = \tau_{c0}(\lambda) \frac{\bar{s}_p}{s_{c0}(r_p)}. \quad (11)$$

Другую оценку можно получить, если потребовать, чтобы сечение частиц модельного распределения на интервале $[r_p, r_{p+1}]$

$$\Delta S_{c,p} = A_c \int_{r_p}^{r_{p+1}} s_{c0}(r) dr = A_c \Delta S_{c0} \quad (12)$$

совпадало с приращением ΔS_p (8):

$$\Delta S_{c,p} = \Delta S_p. \quad (13)$$

Формула для параметра A_c при этом приобретает вид

$$A_c = \frac{\Delta S_p}{\Delta S_{c0}}, \quad (14)$$

где

$$\Delta S_{c0} = \int_{r_p}^{r_{p+1}} s_{c0}(r) dr. \quad (15)$$

Если для вычисления интеграла (15) на интервале $[r_p, r_{p+1}]$ применить формулу прямоугольников, то (14) совпадет с (10).

Независимо от выбора оценки A_c по формуле (10) или (14) в любом случае мы по значениям интегрального распределения $S(r)$ в смежных точках r_p и r_{p+1} прогнозируем дисперсный состав аэрозоля при $r \leq r_p$, осуществляя тем самым микрофизическую экстраполяцию $\tau_c(\lambda)$.

Это дает нам возможность решения уравнения (3) следующим способом. Предполагая на начальном шаге отсутствие второго слагаемого в левой части уравнения (3), $\tau_c^{(0)}(\lambda) = 0$, решаем уравнение (3) относительно вектора $S = (S_p, S_{p+1}, \dots, S_n)$. Для этого, следуя [15, 18], достаточно минимизировать функционал невязки

$$F^2 = \|QS - \tau\|^2 \quad (16)$$

при дополнительных ограничениях

$$C \geq S_p \geq S_{p+1} \geq \dots \geq S_n \geq 0, \quad (17)$$

налагаемых на допустимое решение. Константа C является оценкой верхней границы суммарного сечения аэрозольных частиц радиусом $r \geq r_p$ и должна задаваться априорно. В такой постановке обратная задача решается устойчиво. Численное исследование ее решения проведено в [15].

Обозначив полученное решение $S^{(1)} = (S_p^1, \dots, S_n^1)$ и воспользовавшись, например, формулой (14), получим первое приближение для функции

$$\tau_c^{(1)}(\lambda) = \tau_{c0}(\lambda) \frac{\Delta S_p^{(1)}}{\Delta S_{c0}}, \quad (18)$$

которое подставим в уравнение (3). Затем, вновь обращая уравнение (3), получим следующее приближение $S^{(2)}$ и т.д. Общую итерационную схему решения можно записать в виде

$$\sum_{j=p}^n Q_j(\lambda) S_j^{(k)} = \tau(\lambda) - \tau_c^{(k-1)}(\lambda), \quad (19)$$

где k – номер итерации. Как показывают результаты численного моделирования, для сходимости достаточно 2–3 итераций.

3. Результаты численных экспериментов

Для практической реализации алгоритма коррекции требуется располагать модельным описанием функции распределения частиц по размерам в микродисперсной области. В свете сказанного интерес представляют микроструктурные модели аэрозоля, разработанные В.А. Смеркаловым [10, 11]. Эти модели построены на основе обработки обширного эмпирического материала, включающего несколько сотен реализаций случайных распределений, которые получены различными методами и в разнообразных условиях. Весьма существенным для нашего рассмотрения является тот факт, что

в моделях более адекватно реальным распределениям учитывается наличие высоких концентраций частиц микродисперсной фракции. Примером может служить модельное распределение

$$n(r) = dN(r)/dlgr = \frac{A_n}{r_0^v + |r - r_0|^{\bar{v}}}, \quad (20)$$

параметры которого для тропосферного аэрозоля имеют следующие значения: $r_0 = 0,03$ мкм, $v = 2,33$ и $\bar{v} = 3$. На рис. 1, а представлены модельные распределения $n(r)$, рассчитанные по формуле (20), и связанные с ним функции распределения геометрического сечения $s(r)$ (рис. 1, б) и объема $v(r)$ (рис. 1, в) для тропосферного (кривые 1) и приземного (кривые 2) аэрозоля.

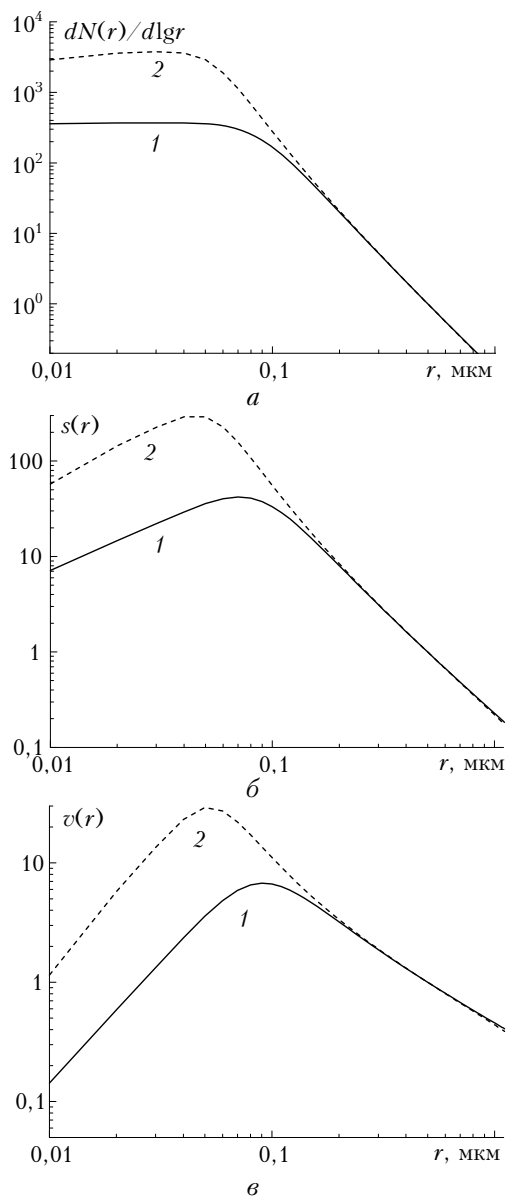


Рис. 1. Модель средневзвешенной функции распределения по размерам счетной концентрации $n(r) = dN(r)/dlgr$ (а), геометрического сечения $s(r)$ (б) и объема частиц $v(r)$ (в) для тропосферного (1) и приземного (2) аэрозоля по данным [11]

Как видно из рис. 1, микродисперсные частицы в рассматриваемых моделях играют значительную роль, обеспечивая, например, 52% от суммарного геометрического сечения для первой модели. В то же время относительная объемная доля этих частиц составляет всего 15%. Отсюда ясно, что некорректный учет вклада микродисперсных частиц может исказить общую картину о дисперсном составе аэрозоля. С целью апробации алгоритма коррекции были проведены замкнутые численные эксперименты. Для решения прямой задачи в спектральном диапазоне [0,37; 4] мкм были выбраны две различные модели дисперсной среды, которые условно обозначены как А и В. В обоих случаях модельная дисперсная среда состояла из частиц субмикронной и грубодисперсной фракций.

Распределение по размерам субмикронного аэрозоля в среде А соответствовало модели «дымка Н» [19]. Как отмечалось в [11], для распределений такого типа характерен дефицит мелких частиц. При моделировании грубодисперсного аэрозоля было использовано широкое логнормальное распределение (детали см. в [20]). Относительная доля по сечению частиц радиусом менее 0,1 мкм в модели А составляет всего 4,2%.

На первом этапе для обращения спектральной зависимости АОТ был использован обычный алгоритм «без коррекции» решения в микродисперсной области. На рис. 2, а представлен пример восстановления интегрального распределения $S(r)$ для модели А. Как видно из рис. 2, а, для выбранной модели А получено вполне удовлетворительное решение.

Картина существенно меняется при переходе к модели В (рис. 2, б). Единственное отличие модели В от модели А состоит в более высоком содержании микродисперсных частиц радиусом $r < 0,1$ мкм. Их доля по сечению значительно выросла и составила 54%. Заметим, что этот показатель близок к значению, полученному для модели (20). Кривая 1 на рис. 2, б представляет собой решение, восстановленное «без коррекции» в микродисперсной области (решение 1). Как видно, полученный результат оказался заметно хуже, чем для модели А, в первую очередь при $r < 0,1$ мкм.

Кроме интегральной функции распределения в качестве количественных характеристик решения обратной задачи рассматривались микроструктурные параметры, такие как суммарное геометрическое сечение S , объемная концентрация частиц

$$V = (4/3) \int_0^R S(r) dr \text{ и средний радиус } r_s = 0,75V/S.$$

Их значения для модели В приведены в табл. 1. Индексами (м) и (г) обозначены аналогичные параметры для субмикронной и грубодисперсной фракций частиц. Условная граница между фракциями была выбрана в точке $r = 0,55$ мкм.

Из табл. 1 видно, что для решения 1 получены заниженные значения геометрического сечения. Существенную погрешность имеют восстановленное суммарное сечение S (28%), а также его субмикронная

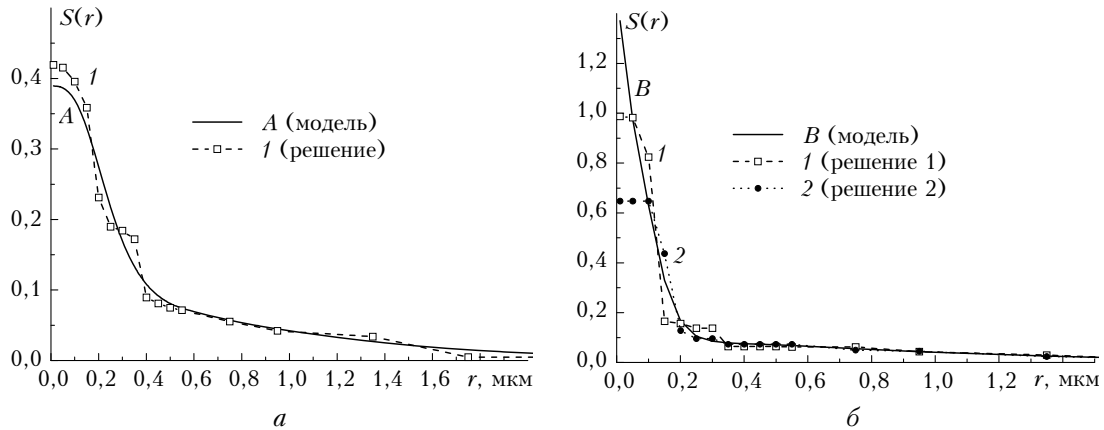


Рис. 2. Интегральные функции распределения $S(r)$, восстановленные в численном эксперименте без коррекции (1) и с коррекцией (2) вклада микродисперсных частиц при различном их содержании: а – модель А – включает субмикронную фракцию с низким содержанием микродисперсных частиц (дымка Н [19]); $S(0,1)/S = 4,2\%$; б – модель В – включает субмикронную фракцию с повышенным содержанием микродисперсных частиц $S(0,1)/S = 54\%$

Таблица 1

Микроструктурные параметры модели В, восстановленные на полном интервале [0,01; 4] мкм без экстраполяции (решение 1) и с экстраполяцией (решение 2) в области $r < 0,1$ мкм

Параметр	S	$S^{(м)}$	$S^{(r)}$	$V, \text{ см}^3/\text{м}^2$	$V^{(м)}, \text{ см}^3/\text{м}^2$	$V^{(r)}, \text{ см}^3/\text{м}^2$	$r_s, \text{ мкм}$	$r_s^{(м)}, \text{ мкм}$	$r_s^{(r)}, \text{ мкм}$
Модель В	1,37	1,30	0,068	0,294	0,174	0,121	0,161	0,10	1,34
Решение 1	0,987	0,925	0,062	0,291	0,167	0,124	0,221	0,135	1,50
Решение 2	1,30	1,23	0,069	0,295	0,176	0,119	0,169	0,107	1,29

часть $S^{(м)}$ (29%). Минимальная ошибка допущена при восстановлении объемных концентраций всех частиц V и грубодисперсной фракции $V^{(r)}$.

Восстановленному распределению $S(r)$ (кривая 1, рис. 2, б) соответствует спектральная зависимость оптической толщины $\tau(\lambda)$ с тем же номером на рис. 3, которая практически совпадает с модельной кривой В.

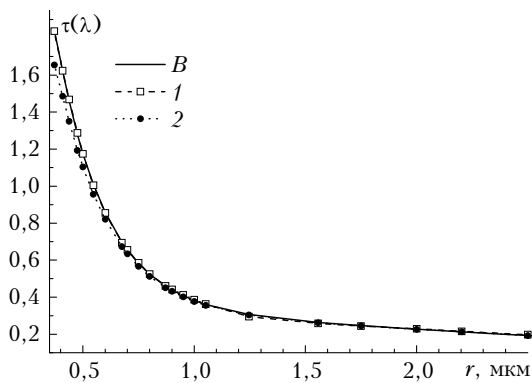


Рис. 3. Спектральные зависимости АОТ $\tau(\lambda)$ для модели В и аэрозольных распределений $S(r)$, восстановленных при ее обращении без коррекции (1) и с коррекцией (2) вклада микродисперсных частиц по данным рис. 2, б

Это служит подтверждением малой информативности рассматриваемой оптической характеристики по отношению к микродисперсным частицам.

Как видно из рис. 2, б, в области $r > 0,1$ мкм решение 1 воспроизводит модельное распределение В с более высокой точностью. Можно было бы ожидать, что микроструктурные параметры аэрозоля, рассчитанные без учета малых частиц, будут также восстановлены с меньшими ошибками. Для проверки этого предположения был произведен перерасчет всех параметров микроструктуры на усеченном интервале с отброшенной областью $r \leq 0,1$ мкм. Полученные результаты приведены в табл. 2 (решение 1).

Из приведенных данных видно, что положительный эффект действительно достигается, однако он незначительный. В частности, погрешности восстановления сечений S и $S^{(м)}$ на усеченном интервале уменьшились до 22 и 26% соответственно.

Наконец, рассмотрим распределение $S(r)$, восстановленное с коррекцией решения в микродисперсной области $r \leq r_p$ на основе разработанного алгоритма (решение 2). В этом случае при решении обратной задачи в качестве модели микродисперсного аэрозоля нами использовано распределение вида (20).

Таблица 2

Микроструктурные параметры модели В, восстановленные на усеченном интервале [0,1; 4] мкм без экстраполяции (решение 1) и с экстраполяцией (решение 2) в области $r < 0,1$ мкм

Параметр	S	$S^{(м)}$	$S^{(r)}$	$V, \text{ см}^3/\text{м}^2$	$V^{(м)}, \text{ см}^3/\text{м}^2$	$V^{(r)}, \text{ см}^3/\text{м}^2$	$r_s, \text{ мкм}$	$r_s^{(м)}, \text{ мкм}$	$r_s^{(r)}, \text{ мкм}$
Модель В	0,630	0,562	0,068	0,244	0,123	0,121	0,290	0,164	1,34
Решение 1	0,771	0,708	0,063	0,258	0,143	0,115	0,25	0,151	1,37
Решение 2	0,624	0,552	0,072	0,241	0,121	0,119	0,289	0,165	1,24

Восстановленное решение представлено на рис. 2, б (кривая 2). Обратим внимание на то, что в соответствии с предлагаемой схемой решения функция $S(r)$ определена при $r \geq r_p$, где для рассмотренного примера взято $r_p = 0,1$ мкм.

Параметры микроструктуры, соответствующие восстановленной зависимости $S(r)$, приведены в табл. 2 (последняя строка). Вид полученного решения $S(r)$ и значения параметров микроструктуры, представленных в табл. 2, свидетельствуют о несомненном положительном эффекте, достигнутом в результате коррекции микродисперсной фракции. Например, для сечений S и $S^{(м)}$ погрешность восстановления не превышает 1 и 1,8% соответственно.

Спектральная зависимость $\tau(\lambda)$, рассчитанная по восстановленному распределению $S(r)$, изображена на рис. 3 (кривая 2). Она отличается от модельной зависимости (кривая В) на величину $\tau_c(\lambda)$, определяющую вклад в ослабление света микродисперсными частицами.

Предыдущее рассмотрение относилось к микроструктурным параметрам аэрозоля, восстановленным на усеченном интервале $[0,1; 4]$ мкм. Предлагаемая процедура экстраполяции позволяет учитывать не только вклад в ослабление света, обусловленный микродисперсными частицами, но и содержание таких частиц в рамках модельных представлений. Это дает возможность коррекции интегральных параметров микроструктуры с учетом роли частиц, размеры которых меньше r_p . Результаты коррекции микроструктурных параметров в численном эксперименте для модели В приведены в последней строке табл. 1. Как видно из сравнения данных табл. 1, в результате коррекции достигнуто существенное повышение точности оценки всех рассматриваемых параметров. В частности, погрешность восстановления суммарного сечения S уменьшилась после коррекции с 28 до 5,1%. Для сечения субмикронной фракции частиц $S^{(м)}$ аналогичные оценки составляют 29 и 5,4%. Также значительно повысилась точность оценки среднего радиуса частиц как для полного ансамбля, так и для его отдельных фракций.

Заключение

Из полученных результатов можно сделать следующие основные выводы. Нами рассмотрены особенности определения дисперсного состава аэрозоля из спектральных измерений АОТ с учетом малой информативности решения в микродисперсной области. Показано, что при переходе к микродисперсным частицам зависимость АОТ от среднего размера и геометрического сечения таких частиц приобретает мультипликативную форму. Как следствие, спектральные измерения АОТ в области $[0,37; 4]$ мкм допускают неоднозначную интерпретацию в отношении микроструктуры частиц радиусом менее 0,1–0,15 мкм. Установлено, что степень

неопределенности восстанавливаемых параметров микроструктуры можно уменьшить путем ограничения снизу информативного диапазона размеров частиц в сочетании с микрофизической экстраполяцией за его пределами. Рассмотрен алгоритм обращения АОТ на основе метода интегральных распределений с экстраполяцией функции распределения в микродисперсной области. Алгоритм позволяет также осуществлять дополнительную коррекцию восстанавливаемых микроструктурных параметров аэрозоля с учетом вклада микродисперсных частиц на основе современных моделей.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке ФЦП (государственные контракты № 02.740.11.0674 и 14.740.11.0204).

1. Шифрин К.С., Перельман А.Я. Определение спектра частиц дисперсной системы по данным о ее прозрачности // Оптика и спектроскопия. 1963. Т. 15, вып. 4–6. С. 533–542.
2. Yamamoto G., Tanaka M. Determination of aerosol size distribution from spectral attenuation measurements // Appl. Opt. 1969. V. 8, N 2. P. 447–453.
3. Костин Б.С., Макиенко Э.В., Наац И.Э. Исследование информативности и решение обратных задач при оптическом зондировании атмосферного аэрозоля // Распространение оптических волн в атмосфере. Новосибирск: Наука, 1975. С. 208–211.
4. Костин Б.С., Наац И.Э. Определение спектра размеров аэрозольных частиц из оптических измерений методами регуляризации // Лазерное зондирование атмосферы. М.: Наука, 1976. С. 94–98.
5. Макиенко Э.В., Наац И.Э. Об одном алгоритме для обращения спектральных оптических измерений // Вопросы лазерного зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1976. С. 115–121.
6. Holben B.N., Eck T.F., Slutsker I., Tanre D., Buis J.P., Setzer A., Vermote E., Reagan J.A., Kaufman Y.J., Nakadjima T., Lavenu F., Jankowiak I., Smirnov A. AERONET – A federated instrument network and data archive for aerosol characterization // Remote Sens. Environ. V. 66, N 1. P. 1–16.
7. Dubovik O., King M.D. A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements // J. Geophys. Res. D. 2000. V. 105, N 16. P. 20,673–20,696.
8. Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Ростов А.П., Турчинович С.А., Турчинович Ю.С. Система сетевого мониторинга радиационно-активных компонентов атмосферы. Часть I. Солнечные фотометры // Оптика атмосф. и океана. 2004. Т. 17, № 4. С. 354–360.
9. 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.
10. Смеркалов В.А. Аппроксимация среднего распределения аэрозольных частиц по размерам // Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана. 1984. Т. 20, № 4. С. 317–321.
11. Смеркалов В.А. Прикладная оптика атмосферы. СПб.: Гидрометеиздат, 1997. 334 с.
12. Tunved P., Hansson H.-C., Kulmala M., Aalto P., Viisanen Y., Karlsson H., Kristensson A., Swietlicki E., Dal Maso M., Ström J., and Komppula M.

- One year boundary layer aerosol size distribution data from five nordic background stations // *Atmos. Chem. Phys.* 2003. V. 3, N 6. P. 2183–2205.
13. Hussein T., Puustinen A., Aalto P.P., Mäkelä J.M., Hämeri K., and Kulmala M. Urban aerosol number size distributions // *Atmos. Chem. Phys.* 2004. V. 4, N 2. P. 391–411.
 14. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д. Суточный ход концентрации микродисперсной фракции аэрозоля // *Оптика атмосфер. и океана.* 2000. Т. 13, № 11. С. 983–990.
 15. Веретенников В.В. Обратные задачи солнечной фотометрии для интегральных аэрозольных распределений. I. Теория и численный эксперимент в субмикронной области размеров частиц // *Оптика атмосфер. и океана.* 2006. Т. 19, № 4. С. 294–300.
 16. Кабанов Д.М., Сакерин С.М., Турчинович С.А. Солнечный фотометр для научного мониторинга (аппаратура, методики, алгоритмы) // *Оптика атмосфер. и океана.* 2001. Т. 14, № 12. С. 1162–1169.
 17. Хюлст Г. ван де. Рассеяние света малыми частицами. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1961. 536 с.
 18. Веретенников В.В., Меньщикова С.С. Применение блочно-итерационного алгоритма для восстановления интегральных аэрозольных распределений по данным солнечной спектрофотометрии // *Оптика атмосфер. и океана.* 2010. Т. 23, № 4. С. 259–264.
 19. Дейрменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. М.: Мир, 1971. 165 с.
 20. Веретенников В.В. Обратные задачи солнечной фотометрии для интегральных аэрозольных распределений. II. Разделение на субмикронную и грубодисперсную фракции // *Оптика атмосфер. и океана.* 2006. Т. 19, № 4. С. 301–307.

V.V. Veretennikov and S.S. Men'shchikova. Microphysical extrapolation in the problem of inversion of spectral measurements of the aerosol optical depth.

We consider the special features of determining the aerosol size distribution from spectral measurements of the aerosol optical depth (AOD) with allowance for low information content of the solution in the region of finely dispersed aerosol. We propose an algorithm of the AOD inversion data correction based on the microphysical extrapolation procedure, which allows the contribution of finely dispersed aerosols to be taken into account for the existing models. This approach is used to solve the inverse problem of solar photometry by the integral distribution method. It is investigated in closed numerical experiments.