

М.А. Свириденков

## Определение характеристик атмосферного аэрозоля по спектральным измерениям прозрачности и малоуглового рассеяния

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, г. Москва

Поступила в редакцию 8.08.2001 г.

Обсуждается возможность использования данных измерений спектральной прозрачности для восстановления характеристик однократного рассеяния из наблюдений яркости неба в области солнечного ореола. Предложен простой итерационный алгоритм такого восстановления. Показано, что при умеренной мутности атмосферы раздельное решение обратных задач для индикатрис яркости ореола и спектральной прозрачности позволяет получить распределение частиц по размерам, не вычитая вкладкратно рассеянного света.

### Введение

Основные трудности при интерпретации данных измерений яркости безоблачного неба связаны с необходимостью выделения индикатрисы однократного рассеяния из наблюдаемой яркости. В частности, необходимо иметь информацию в максимально большом диапазоне углов рассеяния, что невозможно при малых зенитных углах солнца. Часто наблюдениям препятствует частичное покрытие небосвода облаками. На точность измерений при низком солнце может оказывать влияние пространственная неоднородность аэрозоля. Измерения в малоугловой области ( $2-10^\circ$ ) проще с точки зрения аппаратной реализации и, в значительной мере, лишены указанных недостатков. Однако для определения характеристик однократного рассеяния необходимо привлекать априорную информацию о поведении индикатрисы рассеяния вне области измерений.

В настоящее время существует несколько подходов к решению этой проблемы. При использовании малоуглового приближения решения уравнения переноса (см., например, [1]) вкладом излучения, рассеянного под большими углами и отраженного от поверхности, пренебрегают. В работе [2] предлагается аналитическое представление индикатрисы многократного рассеяния с параметрами, зависящими от фактора мутности, зенитного угла солнца и длины волны. Используется также доопределение индикатрисы рассеяния вне диапазона углов рассеяния, в котором проводятся измерения [3].

Яркость ореола в значительной мере обусловлена рассеянием на частицах грубодисперсной фракции аэрозоля. Совместное обращение данных ореольных наблюдений и спектральной зависимости аэрозольной оптической толщины (АОТ) позволяет расширить диапазон восстанавливаемого спектра размеров. В настоящей статье рассматривается возможность привлечения параллельных измерений спектральной прозрачности и для интерпретации собственно малоугловых измерений. При анализе использовались модельные распределения частиц по размерам, близкие к реальным, полученным по данным измерений в различных географических регионах. Поле яркости приходящего излучения рассчитывалось методом Монте-Карло по программе, подготовленной Т.Б. Журавлевой.

### 1. Восстановление индикатрисы однократного рассеяния

В видимой области спектра оптическая толщина аэрозоля формируется в основном за счет рассеяния света на субмикронной фракции аэрозоля (за исключением экстремальных ситуаций типа пыльной мглы). Эта же фракция определяет и рассеяние в широком диапазоне углов, кроме углов, близких к направлениям вперед и назад. Следовательно, можно ожидать, что микрофизическая экстраполяция АОТ на индикатрису рассеяния (решение обратной задачи и последующий расчет угловых характеристик для полученного распределения частиц) позволит получить оценку индикатрисы рассеяния вне малоугловой области. Расчеты были проведены для трех распределений, каждое из которых является суперпозицией трех логарифмически нормальных мод с параметрами, приведенными в табл. 1.

Таблица 1

Параметр	Параметры логнормальных фракций		
	Распределение		
	1-е	2-е	3-е
$N_1$	$1,5 \cdot 10^9$	$1,5 \cdot 10^9$	$5,5 \cdot 10^9$
$N_2$	$6,8 \cdot 10^5$	$9,6 \cdot 10^5$	$2,4 \cdot 10^5$
$N_3$	$6,8 \cdot 10^4$	$4,8 \cdot 10^3$	$2,4 \cdot 10^4$
$r_1$	0,042	0,042	0,040
$r_2$	0,42	0,48	0,40
$r_3$	1,5	1,8	1,7
$v_1$	0,55	0,55	0,53
$v_2$	0,50	0,45	0,50
$v_3$	0,78	0,68	0,70

$N$ ,  $r$  и  $v$  в табл. 1 – счетная концентрация, медианный радиус и стандартное отклонение логарифмов радиуса соответственно. Первое распределение является аналитической аппроксимацией результатов решения обратной задачи по измерениям в шт. Оклахома, США, в октябре 1995 г., второе – по измерениям на о. Шпицберген в марте 1997 г. и третье – по измерениям на Звенигородской научной станции ИФА РАН в июле 1997 г. [4]. Эти распределения, различающиеся по соотношению между субмикронным и грубодисперсным аэрозолями, были выбраны как

типичные для каждого из регионов в соответствующие периоды измерений. Частицы с радиусами менее одного микрона обуславливают около 75% аэрозольной оптической толщины в видимой области спектра в первом случае и более 90% во втором и третьем.

На рис. 1 и 2 проведено сопоставление угловых зависимостей коэффициентов направленного светорассеяния на длине волны 0,53 мкм, соответствующих распределениям 1–3, с расчетами по оптической толщине. Обратная задача решалась с использованием модифицированного алгоритма Твитти [4].

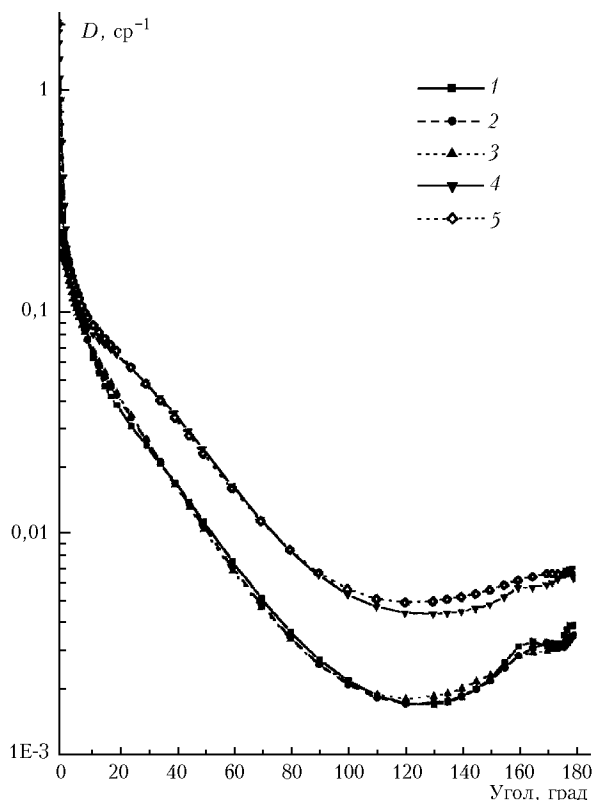


Рис. 1. Индикатрисы рассеяния для распределений 2 (1–3) и 3 (4, 5): 1, 4 – расчет для распределений; 2, 5 – решение обратной задачи для АОТ; 3 – расчет для обратностепенного распределения

Из рис. 1 и 2 следует, что в диапазоне углов рассеяния 20–150° различия не превышают 15%. Данные спектральных измерений АОТ не позволяют определить показатель преломления аэрозоля  $n$ . Коэффициенты направленного светорассеяния для исходных распределений рассчитывались в предположении  $n = 1,48$ . Как показано на рис. 2, ошибочный выбор  $n$  в диапазоне 1,40–1,55 не оказывает существенного влияния на точность микрофизической экстраполяции. И наконец, для оценки индикатрисы рассеяния можно вообще обойтись без решения обратной задачи, рассчитав показатель Ангрстрема и индикатрису рассеяния обратностепенного распределения, соответствующего этому показателю. Результат такого расчета приведен на рис. 1. Следует отметить, что при расчетах яркости неба ошибки в задании индикатрисы рассеяния частично нивелируются вследствие заметного вклада молекулярного рассеяния для больших углов рассеяния.

Для определения индикатрисы однократного рассеяния в области ореола может быть предложен простой итерационный алгоритм.

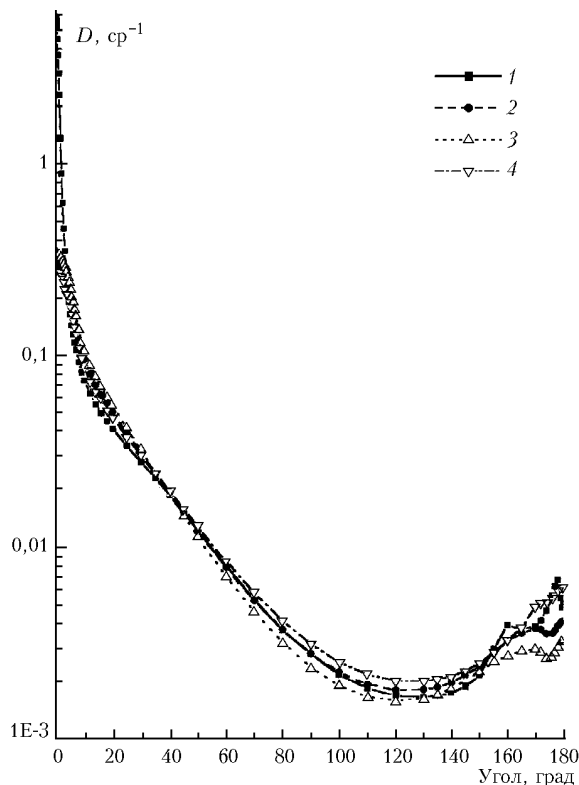


Рис. 2. Индикатрисы рассеяния для распределения 1: 1 – расчет для распределения; 2–4 – решение обратной задачи для АОТ (2 –  $n = 1,48$ , 3 – 1,4, 4 – 1,55)

1. Решается обратная задача (или определяется показатель Ангрстрема) по данным спектральной АОТ и рассчитывается угловая зависимость коэффициентов направленного светорассеяния.
2. Методом Монте-Карло рассчитываются яркость неба в области ореола и отношение однократного к полному рассеянию для углов, на которых проводились измерения.
3. Измеренная яркость неба умножается на это отношение и принимается в качестве приближения для яркости однократного рассеяния.
4. Индикатриса однократного рассеяния трансформируется в соответствии с п. 3.
5. При необходимости повторяются пп. 2–4.

Проведенный нами анализ показал, что при  $\tau m < 1$  ( $\tau$  – оптическая толщина атмосферы,  $m$  – воздушная масса атмосферы в направлении на солнце) достаточно не более двух итераций. Метод остается применимым и при высокой мутности атмосферы. В качестве примера приведем результаты определения коэффициентов направленного светорассеяния  $D$  для распределения 3 на длине волны 0,46 мкм. При моделировании  $m$  принималось равным 5,8,  $\tau = 1$ . В табл. 2 приведены результаты расчетов коэффициентов направленного светорассеяния по АОТ (первый столбец) изменения  $D$  в ходе итерационного процесса (столбцы 2–5) и их точное значение (6) для трех углов рассеяния.

Как следует из табл. 2, необходимое число итераций возрастает с уменьшением угла рассеяния. Отметим, что для данной модельной ситуации доля однократного рассеянного света составляет всего от 45% для угла  $1,9^\circ$  до 20% для угла  $10,3^\circ$ .

Таблица 2

Итерационное восстановление индикатрисы рассеяния

Угол, град	Коэффициенты направленного светорассеяния					
	1	2	3	4	5	6
1,9	0,76	1,02	1,21	1,31	1,34	1,39
2,6	0,73	0,82	0,88	0,90	0,91	0,91
10,3	0,42	0,41	0,41	0,40	0,39	0,38

## 2. О возможности обращения ореольных измерений без учета многократного рассеяния

Составляющая яркости неба, обусловленная кратным рассеянием и отражением от земной поверхности, имеет значительно меньшую по сравнению с однократным рассеянием вытянутость и обладает ярко выраженной спектральной селективностью, уменьшаясь с ростом длины волны. Поэтому пренебрежение вкладом многократного рассеяния при обращении ореольных измерений при не слишком большой мутности атмосферы приводит к искажению получаемого распределения частиц по размерам только в области размеров, меньших или сравнимых с длиной волны, где ореольные измерения и без того малоинформативны. Таким образом, спектр размеров может быть получен путем «сшивания» результатов обращения спектральной прозрачности (субмикронная фракция) и отягощенной кратным рассеянием яркости неба в области ореола (грудисперсная фракция).

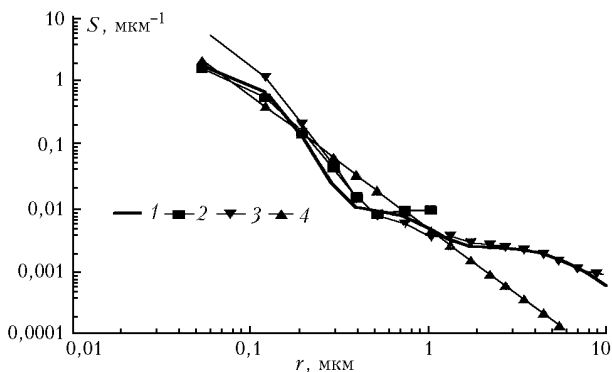


Рис. 3. Решение обратной задачи без вычитания кратного рассеяния: 1 – исходное распределение; 2 – решение обратной задачи для АОТ; 3 – обращение индикатрис яркости ореола

Проведенные нами расчеты показали, что такой подход применим по крайней мере до  $tm = 2$ . На рис. 3 распределение 1 сопоставлено с результатами обращения яркости ореола и АОТ. Расчеты выполнялись для  $m = 5,8$ . На рис. 3 нанесена также прямая (в логарифмическом масштабе), соответствующая обратностепенному распределению с показателем, определенным по показателю Ангстрема. Распределения представлены в форме  $S(r) = \pi r^2 dN/dr$ , где  $dN/dr$  – счетное распределение.

Как отмечалось выше, спектральные измерения прозрачности не позволяют оценить показатель преломления вещества аэрозоля. Возможные ошибки, возникающие при неправильном задании показателя преломления, можно оценить по данным, приведенным на рис. 4, где показаны результаты решения обратной задачи по АОТ для распределения 2 с показателями преломления  $n = 1,4; 1,48$  и  $1,55$ . Изменение априорно задаваемого показателя преломления ведет к закономерному сдвигу распределения при сохранении его формы. Дифференциальные концентрации, соответствующие  $n = 1,4$  и  $1,55$ , отличаются не более чем в 1,5 раза.

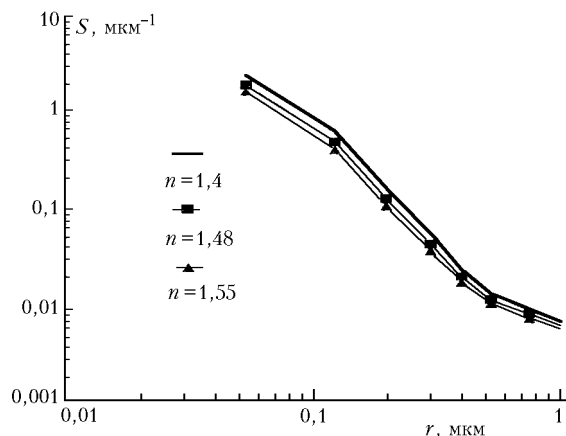


Рис. 4. Влияние выбора показателя преломления на восстанавливаемый спектр размеров аэрозоля

## 3. Интерпретация результатов наблюдений

Изложенные выше подходы были использованы при обработке результатов наблюдений, проведенных в марте 2001 г. на Звенигородской научной станции ИФА РАН. Ореольные измерения велись на солнечном ореольном фотометре на основе акустооптического спектрометра «Кварц-4» [4]. Диапазон углов рассеяния –  $2-10^\circ$ , длин волн –  $0,46-0,75$  мкм. Измерения оптической толщины выполнялись параллельно с помощью прибора MFRSR на пяти длинах волн в интервале  $0,415-0,869$  мкм.

Индикатрисы яркости экстраполировались в области углов меньше  $2^\circ$  с использованием микрофизической экстраполяции – решалась обратная задача для измеренных индикатрис яркости и для полученного распределения рассчитывался «нос» индикатрисы рассеяния. Модельные оценки показали, что такой прием не приводит к заметному искажению окончательных результатов. В качестве примера на рис. 5 представлены результаты обработки одного из измерений 27.03.01. Воздушная масса за время цикла измерений менялась в пределах  $m = 3,5 \div 3,4$ . Аэрозольная оптическая толщина  $\tau_{\text{аэр}}$  составляла  $0,23$  на длине волны  $0,415$  мкм и  $0,07$  на длине волны  $0,869$  мкм. Альbedo подстилающей поверхности принималось равным  $0,3$ . На рис. 5 приведены спектр размеров, полученный при совместном обращении спектральной прозрачности и восстановленных по методу, изложенному в разд. 2, индикатрис однократного рассеяния (кривая 1), и синтетический спектр, образованный в результате «сшивания» в точке  $r = 0,3$  мкм распределений, соответствующих спектральной зависимости АОТ (кривая 2) и спектральной яркости ореола (3).

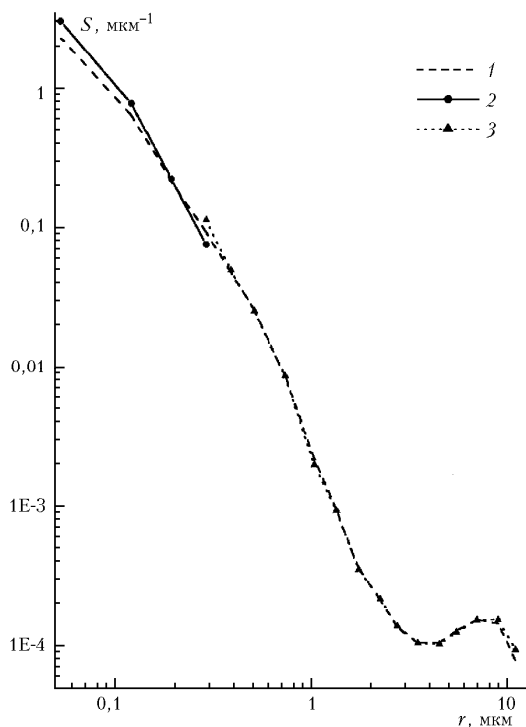


Рис. 5. Сопоставление двух методов восстановления распределений частиц по размерам. Звенигород, 27.03.01

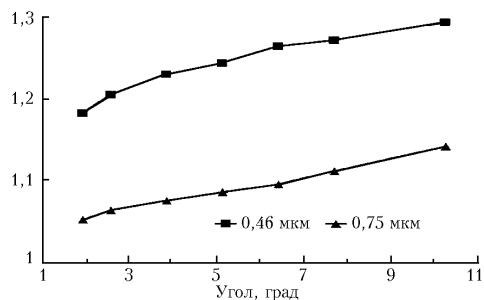


Рис. 6. Угловые зависимости отношения яркости ореола к яркости, обусловленной однократным рассеянием

Угловой ход отношения индикатрисы яркости к индикатрисе однократного рассеяния показан на рис. 6 для двух длин волн (0,46 и 0,75 мкм).

### Заключение

Изложенные в настоящей статье подходы могут быть, на наш взгляд, полезны при интерпретации ореольных измерений в условиях замутненности атмосферы. Они заведомо неприменимы в ситуациях, когда рассеяние на крупнодисперсном аэрозоле является преобладающим. В этих условиях близкий к нейтральному спектральный ход АОТ не является информативным относительно параметров микроструктуры аэрозоля. Второе ограничение связано с поглощающими свойствами аэрозоля. Наши расчеты проводились в предположении отсутствия аэрозольного поглощения. Если же альbedo однократного рассеяния заметно меньше единицы, то необходимо привлечение дополнительной информации о действительной и мнимой частях показателя преломления вещества аэрозоля.

Автор благодарит Т.Б. Журавлеву за предоставление программы расчета яркости безоблачного неба методом Монте-Карло.

Работа выполнена при частичной поддержке программы ARM (Atmospheric Radiation Measurement), контракт № 354760-A-Q1.

1. *Weinman J.A., Twitty J.T., Browning S.R., Herman B.M.* Derivation of phase functions from multiply scattered sunlight transmitted through a hazy atmosphere // *J. Atmos. Sci.* 1975. V. 32. № 3. P. 577–583.
2. *Павлов В.Е.* Угловая структура многократно рассеянного света безоблачной атмосферы // *Оптика атмосф. и океана.* 1996. Т. 5. № 9. С. 688–693.
3. *Nakajima T., Tanaka M., Yamauchi T.* Retrieval of the optical properties of aerosols from aureole and extinction data // *Appl. Opt.* 1983. V. 22. P. 2951–2959.
4. *Аникин П.П., Свириденков М.А.* Оптические характеристики и микроструктура аэрозоля по данным измерений индикатрисы рассеяния в области солнечного ореола // *Международная конференция «Оптика атмосферного аэрозоля» (к 85-летию со дня рождения Г.В. Розенберга): Труды конференции.* М.: Диалог-МГУ, 1999. С. 20–28.

#### *M.A. Sviridenkov. Retrieval of characteristics of atmospheric aerosol from spectral measurements of transparency and near-forward scattering.*

The possibility of applying the data of spectral transparency measurement for retrieval of single scattering characteristics from solar aureole observations is discussed. A simple iteration algorithm for such retrieval is suggested. It is shown that for moderate atmospheric turbidity, the separate inversion of phase functions of the aureole brightness and spectral transparency enables one to get the aerosol size distribution without subtracting the multiply scattered light.