

М.А. Свириденков

## Корреляционные связи между оптическими характеристиками и микроструктурой приземного аэрозоля

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

Поступила в редакцию 28.11.2002 г.

Решена обратная задача для двух массивов данных спектрофелометрических измерений коэффициента направленного светорассеяния  $D$  под углом  $45^\circ$ . Измерения проводились в Подмоскowie и в районе г. Одессы как для натурального аэрозоля, так и для его сухой основы. Выполнен статистический анализ логарифмов полученных распределений площадей сечений  $S(r)$  частиц по размерам с использованием метода главных компонент. Рассмотрены корреляционные связи между статистическими характеристиками  $\ln D$  и  $\ln S$ . Получено соотношение, связывающее первые собственные векторы их ковариационных матриц.

### Введение

Результаты статистического анализа характеристик светорассеяния приземным аэрозолем [1, 2] свидетельствуют о том, что изменчивость этих характеристик может быть описана с помощью небольшого числа статистических параметров — коэффициентов разложения по системе собственных векторов соответствующих ковариационных матриц, причем первый коэффициент, описывающий около 90% дисперсии, тесно связан с коэффициентом рассеяния. Этот факт послужил основой для однопараметрической модели оптических характеристик аэрозоля [2, 3]. Закономерности трансформации оптических свойств аэрозоля являются отображением изменчивости его микроструктуры. Предложенные в [2, 4] однопараметрические модели микроструктуры аэрозоля получены путем решения обратной задачи для модельных оптических характеристик, соответствующих нескольким значениям коэффициента рассеяния (или метеорологической дальности видимости). Эти модели позволяют проследить основные закономерности трансформации аэрозоля при изменении замутненности атмосферы — при ее росте происходит укрупнение частиц за счет обводнения и накопления сухого вещества. Показатель преломления вещества аэрозоля уменьшается, приближаясь к показателю преломления воды в туманных дымаках.

Возможен и другой подход к оптическому моделированию микроструктуры аэрозоля — проведение одновременных измерений оптических характеристик и распределений частиц по размерам, их раздельный анализ по методу главных компонент и установление взаимосвязей между полученными статистическими параметрами. Оптические свойства аэрозоля в видимом диапазоне спектра в значительной мере определяются его субмикронной фракцией. К сожалению, известные методы и приборы (счетчики подвижности и фотоэлектрические счетчики) не позволяют по отдельности надежно

определить микроструктуру во всем субмикронном диапазоне размеров, что значительно затрудняет проведение подобных измерений.

В данной статье сделана попытка сопоставления статистических характеристик спектральных зависимостей коэффициентов направленного светорассеяния под углом  $45^\circ$   $D(\lambda)$  и микроструктуры аэрозоля, полученной из обращения этих зависимостей. Несмотря на некоторую искусственность этого подхода, такой анализ представляет, на наш взгляд, интерес как с точки зрения оценки возможности оперативного определения параметров аэрозоля без решения обратной задачи, так и для построения оптических моделей микроструктуры аэрозоля, учитывающих не только главное направление ее изменчивости.

### Массивы экспериментальных данных

Измерения спектральных зависимостей коэффициента направленного светорассеяния под углом  $45^\circ$  в диапазоне длин волн 254–578 нм проводились зимой 1986 г. на Звенигородской научной станции (ЗНС) Института физики атмосферы и осенью 1987 г. в районе г. Одессы на спектрофелометре на базе дифракционного монохроматора МДР-2. Источником излучения являлась ртутная лампа ДРШ-250-2. Нефелометр был снабжен нагревателем воздушного потока, прокачиваемого через рабочий объем, что позволило измерить характеристики не только натурального аэрозоля, но и его сухой основы. Цикл измерений, включая характеристики «сухого» аэрозоля, длился около 10 мин. Рассеивающий объем был равен примерно  $100 \text{ см}^3$ . Для дальнейшей обработки было отобрано 118 серий измерений на ЗНС и 133 в районе Одессы.

### Решение обратной задачи

Для решения обратной задачи использовался модифицированный алгоритм Твитти [5, 6]. Чис-

ленные эксперименты с модельными распределениями показали, что спектр размеров частиц может быть восстановлен в диапазоне от 0,07 до ~ 0,8–1 мкм. Среднеквадратическое отклонение исходных  $D(\lambda)$  от восстановленных не превышало нескольких процентов.

Одной из основных проблем при обращении спектральных измерений аэрозольного ослабления является невозможность определения коэффициента преломления. Аналогичная неопределенность существует и для рассеяния под углом  $45^\circ$ . Для сухой основы действительная часть коэффициента преломления  $n$  принималась постоянной и равной 1,5. Для натурального аэрозоля  $n$  оценивалось двумя способами – по однопараметрической модели [4] и по соотношению между коэффициентами направленного светорассеяния для сухого и натурального аэрозоля. Различие между двумя оценками не превышало обычно 0,03. При решении обратной задачи использовалось среднее из двух значений  $n$ . Мнимая часть показателя преломления предполагалась равной 0.

Анализ результатов обращения одних и тех же данных измерений с различными  $n$  показывает, что неправильное задание показателя преломления приводит к сдвигу кривой распределения площадей сечений  $S(r)$  по размерам (в логарифмическом масштабе) вдоль осей координат. Величина сдвига равна  $0,5 \ln(n - 1)$ . Этот результат отображен на рис. 1, 2.

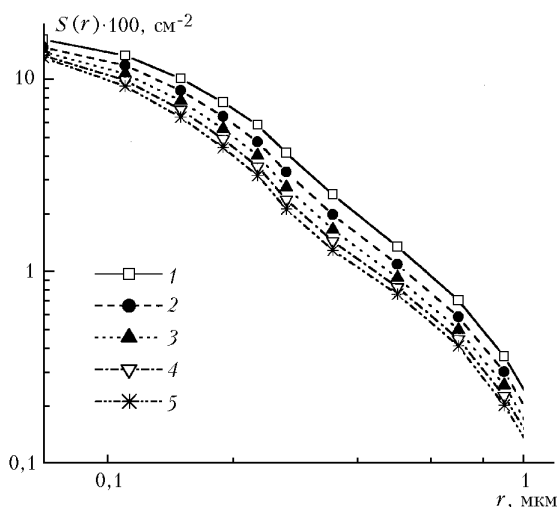


Рис. 1. Распределения сечений по размерам, полученные при решении обратной задачи для различных показателей преломления. ЗНС, 29.01.86: 1 –  $n = 1,35$ ; 2 – 1,4; 3 – 1,45; 4 – 1,5; 5 – 1,55

На рис. 1 приведены кривые  $S(r)$ , полученные для различных  $n$  в диапазоне 1,35–1,55. На рис. 2  $S(r)(n - 1)^{1/2}$  построены как функции  $r(n - 1)^{1/2}$ . Отметим, что аналогичный результат справедлив и для интерпретации спектральных измерений прозрачности, но с коэффициентом не  $(n - 1)^{1/2}$ , а  $n - 1$ . Следовательно, при обращении спектральных коэффициентов направленного светорассеяния под углом  $45^\circ$  неточность в задании  $n$  сказывается слабее, чем при обращении аэрозольного ослабления.

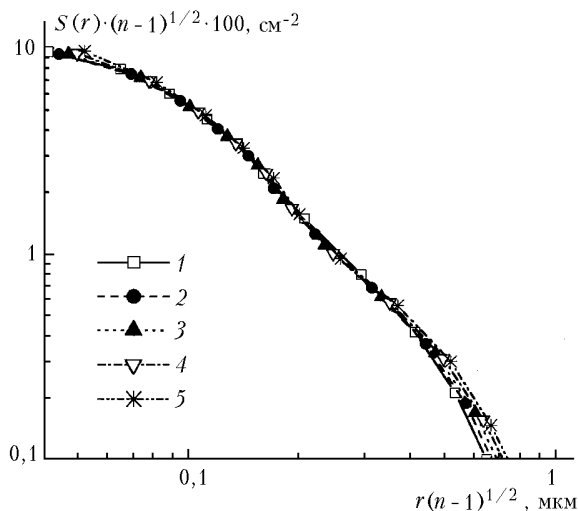


Рис. 2. Распределения сечений по размерам (см. рис. 1) как функции  $r(n - 1)^{1/2}$

## Статистический анализ спектров размеров

Статистический анализ полученных массивов  $\ln S(r)$  проводился по методу главных компонент [7]. Выбор логарифмического представления обусловлен тем, что  $S(r)$  обычно быстро убывает с ростом размера частиц при  $r > 0,1$  мкм и основной вклад в коэффициенты разложения по системе собственных векторов ковариационной матрицы  $S(r)$  вносили бы наиболее мелкие частицы. Кроме того, ковариационные матрицы, а следовательно и системы собственных векторов, для  $\ln S(r)$  такие же, как для счетного и объемного распределений.

Все четыре массива  $\ln S(r)$  оказались в первом приближении однопараметрическими – на первые главные компоненты приходится около 90% дисперсии (на три первых – порядка 99%). Следовательно,  $S(r)$  может быть представлено в виде

$$\ln S(r) = \ln S_0(r) + c_1 \pi_1(r) + c_2 \pi_2(r) + c_3 \pi_3(r) + \dots, (1)$$

где  $S_0(r)$  – среднегеометрическое распределение;  $\pi_i(r)$  – собственные векторы ковариационной матрицы  $\ln S(r)$ .

Собственные числа ковариационной матрицы, нормированные на ее след, приведены в таблице. Два первых собственных вектора ковариационной матрицы показаны на рис. 3.

### Нормированные собственные числа ковариационных матриц

Число	ЗНС, неосушенный	ЗНС, сухой	Одесса, неосушенный	Одесса, сухой
L1	0,91	0,91	0,87	0,89
L2	0,074	0,062	0,078	0,063
L3	0,015	0,025	0,039	0,036

Из рис. 3 следует, что форма распределения частиц по размерам наиболее изменчива в диапазоне  $r < 0,3$  мкм. Системы собственных векторов для

неосушенного аэрозоля и его сухой основы близки друг к другу.

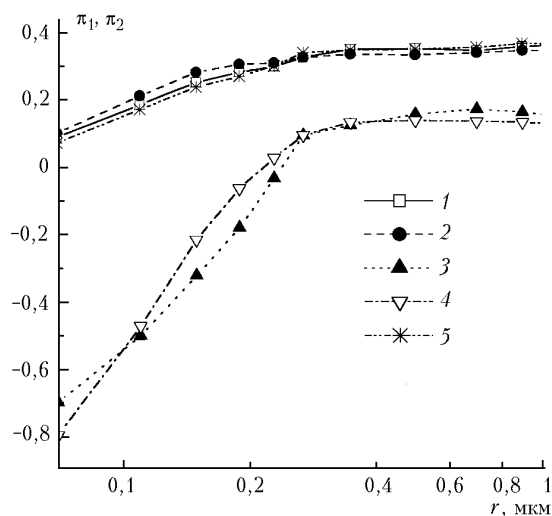


Рис. 3. Собственные векторы ковариационной матрицы  $\ln S(r)$ : 1, 2, 5 –  $\pi_1$ ; 3, 4 –  $\pi_2$ ; 1, 3, 5 – натуральный аэрозоль; 2, 4 – сухая основа; 1–4 – ЗНС; 5 – Одесса

Исходные спектральные зависимости  $D(\lambda)$  также можно считать однопараметрическими (на первую компоненту приходится около 97% дисперсии) [8]. С точностью до ошибок измерения  $\ln D$  можно представить в виде

$$\ln D(\lambda) = \ln D_0(\lambda) + f_1 p_1(\lambda) + f_2 p_2(\lambda) + \dots, \quad (2)$$

где  $D_0(\lambda)$  – среднегеометрическая спектральная зависимость  $D$ ;  $f_i$  – коэффициенты разложения;  $p_i(\lambda)$  – собственные векторы.

Так как логарифмы коэффициентов направленного светорассеяния и дифференциальной концентрации частиц могут быть восстановлены в первом приближении с использованием единственного параметра – первого коэффициента разложения по системе собственных векторов соответствующей ковариационной матрицы, можно ожидать, что эти коэффициенты скоррелированы между собой. Оказалось, что коррелируют не только первые, но и вторые и третьи коэффициенты. Коэффициенты корреляции превышают 0,9. При этом перекрестная корреляция между коэффициентами разложения с различными номерами, естественно, отсутствует.

Корреляционные графики для первых двух коэффициентов приведены на рис. 4, 5. Таким образом, оказывается возможным установить прямую связь между оптическими характеристиками и параметрами микроструктуры, полученными в результате решения обратной задачи. В дальнейшем предполагается проверка этого результата на других массивах данных, включающих и результаты измерений поляризационных составляющих коэффициента направленного светорассеяния.

Рассматриваемые в данной статье ансамбли распределений частиц по размерам получены из решения обратной задачи. В силу ее некорректно-

сти нельзя быть абсолютно уверенным в их адекватности действительно реализующимся в атмосфере ситуациям. Поэтому для подтверждения полученных результатов необходимо также проведение одновременных измерений оптических характеристик и микроструктуры аэрозоля в субмикронном диапазоне, что, как указывалось выше, представляет довольно сложную задачу.

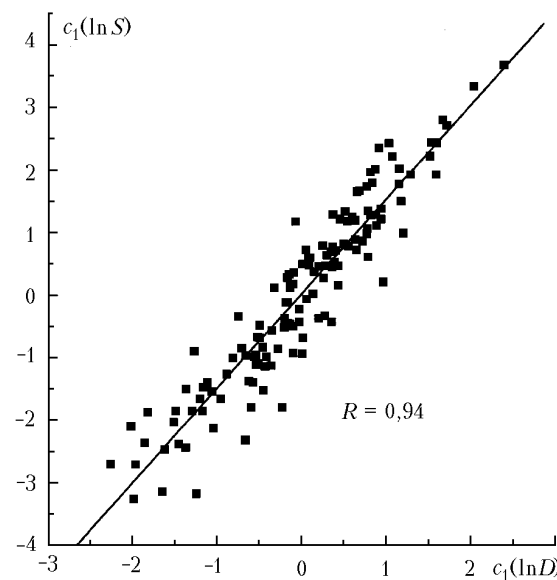


Рис. 4. Корреляционная связь между первыми коэффициентами разложения  $\ln D$  и  $\ln S$ . Одесса, 1987 г.

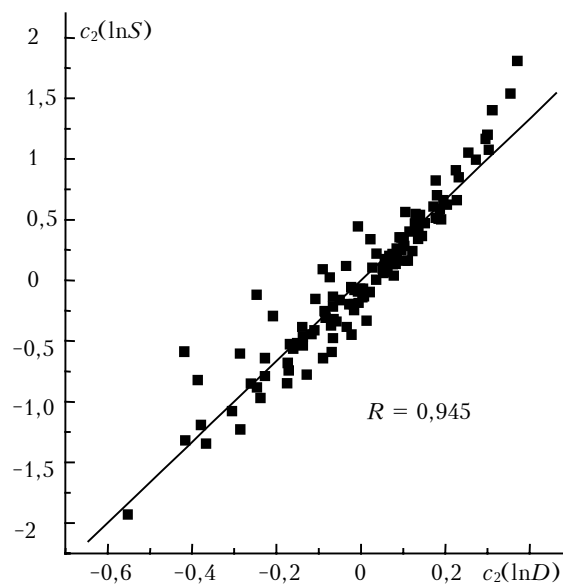


Рис. 5. Корреляционная связь между вторыми коэффициентами разложения  $\ln D$  и  $\ln S$ . ЗНС, 1986 г.

Возможен и другой подход к интерпретации выявленных корреляционных связей. Предположим, что мы имеем массивы реальных распределений частиц по размерам, изменчивость которых описывается небольшим числом статистических параметров по формуле (1). По теории Ми рассчитаем спектральные зависимости  $D(\lambda)$  и проведем их

статистический анализ. При таком подходе мы имеем дело с прямой задачей, и полученные результаты свидетельствуют о том, что статистические характеристики  $D(\lambda)$  напрямую связаны со статистическими характеристиками  $S(r)$ . Это касается не только коэффициентов разложения, но и собственных векторов. Оптические и микрофизические характеристики связаны интегральным уравнением

$$D(\lambda) = \int S(r)K(r, n, \lambda)dr. \quad (3)$$

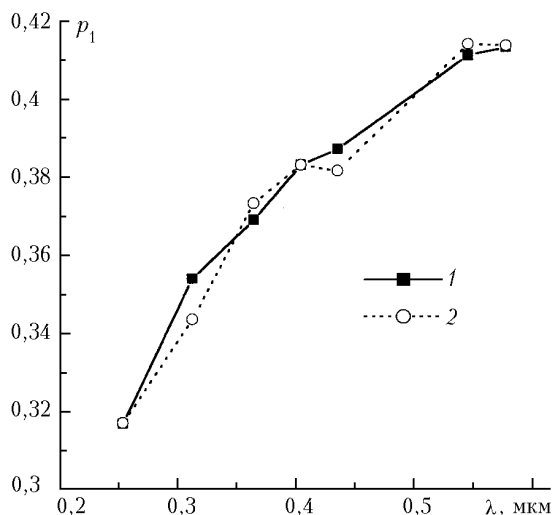


Рис. 6. Первый собственный вектор ковариационной матрицы  $\ln D(1)$  и его расчет по формуле (4). ЗНС, 1986 г.

Предположив, что  $\ln D(\lambda)$  и  $\ln S(r)$  являются дифференцируемыми функциями коэффициентов разложения, а между  $s_1$  и  $f_1$  существует линейная связь, и ограничившись в (1) и (2) первыми членами, можно получить соотношение между первыми собственными векторами ковариационных матриц:

*M.A. Sviridenkov. Correlation between optical characteristics and microstructure of near-surface aerosol.*

The inverse problem was solved for the data of spectronephelometer measurements of the directed scattering coefficients  $D$  for the scattering angle of  $45^\circ$ , obtained during two measurement campaigns in the Moscow Region and at the Black Sea coast near Odessa. Observations were made both for natural aerosol and its dry fraction. The principal component method was applied for the statistical analysis of the retrieved cross-sectional size distributions  $S$ . Correlation between statistical characteristics of  $\ln D$  and  $\ln S$  is considered. A relation between first eigenvectors of their covariation matrices is suggested.

$$p_1(\lambda) \propto \left[ \int \pi_1(r)S_0(r)K(r, \lambda)dr \right] [D_0(\lambda)]^{-1}, \quad (4)$$

где  $K(r, \lambda)$  — усредненное ядро  $K(r, n, \lambda)$ . Результат восстановления первого собственного вектора по (4) показан на рис. 6.

Работа выполнена по проекту РФФИ № 01-05-64405.

1. Горчаков Г.И., Исаков А.А., Свириденков М.А. Статистические связи между коэффициентом рассеяния и коэффициентом направленного светорассеяния в области углов  $0,5-165^\circ$  // Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана. 1976. Т. 12. № 12. С. 1261–1268.
2. Кабанов М.В., Панченко М.В., Пхалагов Ю.А., Веретеников В.В., Ужegov В.Н., Фадеев В.Я. Оптические свойства прибрежных атмосферных дымок. Новосибирск: Наука, 1988. 201 с.
3. Горчаков Г.И., Свириденков М.А. Статистическая модель оптических характеристик атмосферной дымки // Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана. 1979. Т. 15. № 1. С. 53–59.
4. Горчаков Г.И., Емиленко А.С., Свириденков М.А. Однопараметрическая модель приземного аэрозоля // Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана. 1981. Т. 17. № 1. С. 39–49.
5. Twitty J.T. The inversion of aureole measurements to derive aerosol size distributions // J. Atm. Sci. 1975. V. 32. P. 584–591.
6. Аникин П.П., Свириденков М.А. Оптические характеристики и микроструктура аэрозоля по данным измерений индикатрис рассеяния в области солнечного ореола // Сб. трудов. Междунар. конф. «Физика атмосферного аэрозоля». Москва, апрель, 1999. М.: Диалог-МГУ, 1999. С. 20–28.
7. Обухов А.М. О статистически ортогональных разложениях эмпирических функций // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1960. № 3. С. 432–439.
8. Свириденков М.А. Спектральные зависимости коэффициентов направленного светорассеяния // Результаты комплексного эксперимента ОДАЭКС-87. Томск: Изд-е ТНЦ СО АН СССР, 1989. С. 77–85.