

А.А. Исаков

## Некоторые статистические закономерности вариаций оптических и микрофизических характеристик приземного аэрозоля

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

Поступила в редакцию 21.11.2002 г.

Приводятся результаты исследований оптических и микрофизических характеристик приземного аэрозоля с помощью спектрополяриметра. Ежедневные измерения проводились в течение февраля 1999 г. и февраля–мая 2000 г. на Звенигородской научной станции Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН. Спектрополяриметр регистрировал поляризационные компоненты индикатрисы рассеяния света приземным аэрозолем на трех углах рассеяния  $\varphi = 45, 90, 135^\circ$  в диапазоне длин волн  $\lambda = 0,4–0,76$  мкм со спектральным разрешением  $\Delta\lambda \approx 10$  нм. Прибор оборудован низкотемпературным нагревателем заборного воздуха, что позволило, регистрируя характеристики влажного и подсушенного аэрозоля, оценивать конденсационную активность аэрозоля (параметр Хенела  $\chi$ ). Показано, что распределение параметра  $\chi$  близко к нормальному с дисперсией 0,3 и средним значением  $\chi = 0,4–0,5$ . Корреляция между  $\chi$  и коэффициентом рассеяния слабая, но с уменьшением коэффициента рассеяния заметно увеличивается разброс значений  $\chi$ . Для основной массы данных как для влажного, так и подсушенного аэрозоля была решена обратная задача — получены распределения объемов частиц по размерам и комплексный показатель вещества частиц, что позволило оценить конденсационный фактор роста частиц. На основе результатов выполненного методом главных компонент статистического анализа фактора роста получено регрессионное соотношение, связывающее величину фактора роста с относительной влажностью воздуха и являющееся микрофизическим обоснованием формулы Хенела.

### Введение

Построенные в середине 70-х гг. в ИФА РАН и ИОА Сибирского отделения РАН оптические и микрофизические модели приземного аэрозоля [1–4] базировались на данных, полученных с помощью первого поколения приборов с так называемым открытым рабочим объемом. Его величина колебалась примерно от  $10 \text{ дм}^3$  у стоксполяриметра ИФА,  $100 \text{ дм}^3$  у ореольных установок до  $1000 \text{ м}^3$  у измерителей прозрачности, и в формировании рабочих сигналов участвовал практически весь спектр аэрозольных частиц вплоть до десятков микрон по размеру. Необходимость проводить круглосуточные наблюдения привела к разработке следующего поколения приборов с закрытыми объемами. Платой за уменьшение габаритов поляриметров и нефелометров было существенное (до нескольких десятков  $\text{см}^3$ ) уменьшение рабочих объемов. Как следствие, в формировании рабочих сигналов таких приборов участвуют частицы размером менее  $1,5–2$  мкм, пролет больших частиц воспринимается прибором как шумовой всплеск. Это затрудняет непосредственное сравнение данных разных приборов.

Первой получившей распространение микрофизической моделью приземного аэрозоля была модель с обратнотепенным распределением частиц по размеру. Измерения, выполненные с помощью фотоэлектрических счетчиков частиц, с одной стороны, подтвердили, что в первом приближении модель от-

ражает основные черты спектра частиц, с другой — часто наблюдаются заметные отклонения от обратнотепенного закона. Особенно они становятся рельефными, когда распределение строится для объемов частиц. Именно в форме  $dV(r)/dr$  представляют обычно распределения частиц для иллюстрации появившейся в середине 70-х гг. более реалистичной трехфракционной модели атмосферного аэрозоля Виттби.

Исследования дымовых аэрозолей, выполненные в дымовых камерах в ИФА и ИОА [5–7, 12], показали, что в образовании как дымов, так и субмикронного атмосферного аэрозоля много общего, поскольку в обоих случаях доминируют два основных механизма роста частиц — конденсация паров аэрозолеобразующих соединений и коагуляция. В обоих процессах эффективность укрупнения частиц в процессе коагуляции резко падает в области размеров более  $r \sim 0,2$  мкм. В этой связи и для натурального аэрозоля, и для дымов функции распределения  $dV(r)/dr$  частиц по размерам для  $r > 0,2$  мкм спадают в первом приближении по обратнотепенному закону. Для натурального аэрозоля он весьма хорошо выполняется в диапазоне  $r = 0,2–0,8$  мкм [9]. По этой причине обе модели — обратнотепенного закона и логонормального Виттби — дают при расчетах оптики аэрозоля близкие результаты.

Следует заметить, однако, что модель [1] не совсем адекватно передает средние закономерности укрупнения частиц с ростом коэффициента рассеяния — из [1] следует заметное увеличение модаль-

ного размера частиц. В нашей работе [9] аналогичная микрофизическая модель была построена на основе массива данных о распределениях частиц по размерам, полученных прямым решением соответствующего интегрального уравнения, и было показано, что с ростом коэффициента рассеяния положение максимума распределения  $dV(r)/dr$  меняется мало, а увеличение эффективного радиуса частиц происходит за счет уменьшения наклона участка распределения для  $r = 0,2 \div 0,8$  мкм, удовлетворительно аппроксимирующегося обратностепенным законом.

При анализе эффективности любой модели важно очертить класс ситуаций, в которых она перестает работать, и указать причины этого. Существуют как минимум два типа атмосферных ситуаций, существенно (до двух крат по величине коэффициента рассеяния  $\sigma$ ) отклоняющихся от модельных. Это плотные мелкодисперсные дымки, формирующиеся в условиях устойчивого антициклона, и аэрозоль в тыловой части холодного циклонического фронта. Для первых измеряемые поляризационные компоненты более или менее согласуются с модельными для примерно вдвое меньшей величины коэффициента рассеяния. Это, по сути, означает нарушение средней тенденции изменения одного из восстанавливаемых микрофизической моделью [1] параметров — концентрации частиц  $N$ . Вторая группа ситуаций отклоняется от модельной в основном из-за заниженных значений поляризационных компонент, сказывается несферичность грубодисперсных частиц, вклад которых в таких ситуациях резко возрастает.

Микрофизическая модель приземного аэрозоля ИФА [1] была получена путем обращения методом Г.В. Розенберга [10] угловых зависимостей четырех компонент матрицы рассеяния, измеренных на одной длине волны  $\lambda = 0,55$  мкм. Распределение частиц по размерам задавалось логонормальным распределением. Анализ связей оптических характеристик и восстановленных по такой методике микрофизических параметров показал, что восстанавливаемый показатель преломления  $n$  очень хорошо коррелирует с максимальным значением степени эллиптичности поляризации  $f_{43}$  [11], т.е. значение  $n$  определялось, в основном, по максимуму  $f_{43}$ .

В [8] показано, что для заведомо несферических частиц пылевой мглы  $f_{43}$  намного меньше модельной. С уменьшением входного параметра моделей  $\sigma$  в среднем уменьшается и относительная влажность воздуха  $R/h$  и частицы все более отклоняются по форме от сфер, а измеренная  $f_{43}$  — от расчетной для сфер. Следовательно, получаемые обращением величины показателя преломления занижаются. Еще в работе [13] предлагалось для оценки показателя преломления использовать компоненту  $f_{21}$  (степень линейной поляризации). В наших работах [5, 12] эта величина успешно применялась для определения  $n$  вещества дымовых аэрозолей. Преимущество  $f_{21}$  перед  $f_{43}$  состоит в том, что степень линейной поляризации менее чувствительна к форме частицы. Поэтому использование для решения обратной задачи лишь первых двух компонент матрицы рассеяния или поляризационных компонент индикатрисы рассеяния

дает более реалистичную оценку  $n$  и нам представляется более целесообразным.

В предлагаемой статье основное внимание будет уделено вопросу статистического моделирования такой важной характеристики атмосферного аэрозоля, как его конденсационная активность. Кроме того, будет проанализирована возможность параметризации спектральных зависимостей некоторых оптических характеристик аэрозоля приземного слоя.

## Методика и аппаратура

Напомним кратко основные характеристики прибора. Спектрополяриметр регистрирует поляризационные компоненты индикатрисы рассеяния света приземным аэрозолем на трех углах рассеяния  $\phi = 45, 90, 135^\circ$  в диапазоне длин волн  $\lambda = 0,4 \div 0,76$  мкм со спектральным разрешением  $\Delta\lambda \approx 10$  нм. Осветитель прибора создан на базе решеточного монохроматора и обеспечивает квазинепрерывную развертку по спектру с управляемым шагом. Рабочий объем прибора при скорости прососа заборного воздуха около 1 м/с и времени осреднения сигнала около 1 с составляет порядка 1 л.

Низкотемпературный нагреватель заборного воздуха и контроль его температуры позволяют оценивать конденсационную активность аэрозоля. Все управление прибором и сбор данных осуществляются компьютером. Спектрополяриметр обеспечивает инфомацию, достаточную для постановки комплексной обратной задачи — восстановления функции распределения частиц по размерам (выше упоминалось, что оптимальным представлением является распределение объемов частиц  $dV(r)/dr$ ) и оценки действительной и мнимой частей показателя преломления вещества частиц. Для решения обратной задачи была рассчитана сетка из 45 ядер (девять значений действительной части показателя преломления в диапазоне  $n = 1,35 \div 1,59$  с шагом 0,03 и пять значений мнимой части в диапазоне 0,0—0,02 с шагом 0,005). Диапазон радиусов  $r = 0,05 \div 1,5$  мкм. Обратная задача решалась методом итераций [9] для каждого из ядер сетки, и величина комплексного показателя преломления оценивалась методом минимальной невязки.

## Несколько предварительных замечаний

1. Хорошо известно, что основные характеристики приземного аэрозоля имеют выраженный сезонный ход. Именно он ограничивает примерно до 2 мес длительность цикла измерений, на базе которого формируется статистический ансамбль. Минимальная длительность цикла порядка 1 мес.

2. Спектрополяриметр установлен в лабораторном помещении, поэтому аэрозоль в заборнике может подогреваться даже при отключенном нагревателе. Величина этого нагрева в холодное время года составляет 2—5 °С. Поэтому зимой мы имеем дело с изрядно подсушенным аэрозолем.

3. В качестве входного параметра оптических моделей аэрозоля обычно используется величина коэффициента рассеяния  $\sigma$  на длине волны  $\lambda = 0,55$  мкм. В качестве входного параметра мы рассмотрим величину коэффициента направленного светорассеяния  $D(\varphi = 45^\circ, \lambda = 0,55$  мкм), воспользовавшись его тесной связью с  $\sigma$ .

4. Для наглядности величину  $D$  мы будем приводить в единицах рэлеевского (молекулярного) рассеяния:

$$D_{\text{Rel}}(\varphi = 45^\circ, \lambda = 0,55 \text{ мкм}) = 0,001 \text{ км}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}.$$

5. Рабочий объем прибора равен примерно 1 л. Для среднестатистических ситуаций при скорости прокачки воздуха через камеру около 0,5 м/с и времени цифрового осреднения порядка 1 с это ограничивает реальную чувствительность спектрополяриметра диапазоном размеров частиц  $r = 0,05 \div 1,5$  мкм.

6. В процессе измерений для каждой реализации получается набор из 120 чисел. Для удобства решения обратной задачи и статистического анализа методом наименьших квадратов для каждой поляризационной компоненты строилась сглаженная кривая — 8 точек в диапазоне  $\lambda = 0,4 \div 0,76$  мкм с шагом 0,05 мкм.

7. Сегодня, видимо, нет нужды доказывать, что основные ошибки измерений связаны с пространственно-временной нестабильностью приземного аэрозоля. Величина этих ошибок редко бывает ниже 5%, чаще всего это 5–10%. Спектральные зависимости и для подсушенного аэрозоля, и без подогрева записывались парами (прямая и обратная спектральные развертки), выбраковывались те записи, где различия в паре превышали 15%.

## Условия измерений

В 1999 г. ежедневные измерения начались в феврале и продолжались до середины марта. Обычное время измерений было 9–23 ч, в зависимости от ситуации (стабильные условия или смена воздушной массы) в день регистрировалось от 5 до 10 записей. Общее количество спектров превысило 200. Вторым экспериментом по программе ARM проводился с февраля по июнь 2000 г. Метеоусловия февраля–марта были нехарактерными для этого времени года. Московская область находилась на границе холодной и умеренной воздушных масс, и цепочка циклонов прошла так, что Москва оказалась вблизи их центров. Их атмосферные фронты были фронтами окклюзии с узким теплым сектором и лишь несколько часов разделяли теплый и холодный фронты. Часто днем относительная влажность воздуха опускалась до уровня 40–50%. Обычно интервал между циклонами составлял 2–3 сут.

Анализ, выполненный В.Н. Сидоровым, показал, что в феврале–марте характерные величины аэрозольного рассеяния были примерно вдвое ниже средних многолетних [14], в апреле они, напротив, оказались выше средних. Сход снежного покрова пришелся на середину апреля. Необычно холодная

сухая погода простояла почти весь май. Арктический воздух был очень сухой (относительная влажность воздуха часто опускалась ниже 30%), коэффициент рассеяния не превышал 2–5 ед. рэлеевского рассеяния. Для оценки конденсационной активности аэрозоля с использованием формулы Хенела необходимо, чтобы начальная относительная влажность воздуха была не ниже хотя бы 50%, при меньших  $Rh$  воздействие на аэрозоль нагрева часто маскируется пространственно-временной неоднородностью аэрозоля. В связи с этим на базе данных 2000 г. были сформированы два ансамбля: февраль–март (первый) и апрель (второй). Данные мая использовать для оценок конденсационной активности невозможно из-за низких величин относительной влажности воздуха.

## Обсуждение результатов

Для параметризации спектральных зависимостей коэффициента рассеяния  $\sigma$  и атмосферной толщи  $\tau$  часто используется формула Ангстрема:  $\sigma, \tau \sim \lambda^{-\alpha}$ . Мы проанализировали пригодность подобной аппроксимации  $D(\varphi = 45^\circ, \lambda)$  отдельно для данных февраля 1999 г., февраля–апреля и мая 2000 г.

Было установлено, что в диапазоне длин волн  $\lambda = 0,4 \div 0,65$  мкм основная масса реализаций (более 90%) первых двух массивов аппроксимируется формулой Ангстрема со среднеквадратической ошибкой 2–5%. Для майских данных эти ошибки заметно больше — около 10%. Для  $\lambda > 0,65$  мкм измеряемые величины  $D(\varphi = 45^\circ, \lambda)$  превышают рассчитанные и расхождение растет с ростом длины волны и коэффициента рассеяния. Параметр  $\alpha$  (рассчитывался как угловой коэффициент регрессионной прямой) варьирует от 0,5 в плотных влажных дымках до 2,5 для условий высокой прозрачности.

Несколько неожиданной оказалась высокая корреляция между  $\alpha$  и  $\ln[D(\varphi = 45^\circ, \lambda = 0,55 \text{ мкм})]$  — коэффициент корреляции  $R$  для первых двух ансамблей составил 0,71 и 0,75 соответственно. Столь высокая корреляция описывает половину общей дисперсии  $\alpha$  и может быть использована для восстановления  $\alpha$  по величине  $D$ :  $\alpha = \text{const} - \beta \ln(D)$ . Величины  $\beta$  для обоих массивов оказались близкими 0,45 и 0,43, величины стандартных отклонений  $\Delta\alpha = \pm 0,3$ .

Для мая 2000 г. корреляция  $\alpha$  и  $D(\varphi = 45^\circ, \lambda = 0,55 \text{ мкм})$  оказалась хуже  $R = 0,5$ , причем «разрушителями» ее оказались именно точки, соответствующие аномальным дням первых двух недель мая (сильный, до 10 м/с, северный ветер, температура около 0 °С,  $Rh < 40\%$ , иссушенный верхний слой почвы, коэффициент рассеяния 2–3 ед. рэлеевского рассеяния). Они образовали отдельную область со значениями  $\alpha$  от 1 до 1,5 при том, что значения  $D(\varphi = 45^\circ, \lambda = 0,55 \text{ мкм})$  были от 2 до 5 ед. рэлеевского рассеяния. По всей видимости, уменьшение  $\alpha$  связано с повышенным содержанием (ветровой подъем) почвенных грубодисперсных частиц.

Уже около 30 лет известна эмпирическая формула Хенела, связывающая величину коэффициента рассеяния атмосферного аэрозоля  $\sigma$  и относительную влажность воздуха  $Rh$ :

$$\sigma = \sigma_0(1 - Rh)^{-\chi}, \quad (1)$$

где  $\sigma_0$  — коэффициент рассеяния сухих частиц;  $\chi$  — параметр Хенела, интерпретируемый как параметр конденсационной активности аэрозоля. В [15, 16] было показано, что формула пригодна и для описания изменчивости коэффициента направленного светорассеяния  $D$ . Если  $D_{1,2}$  измерены при относительных влажностях  $Rh_{1,2}$ , то

$$\chi = \ln(D_1/D_2)/\ln[(1 - Rh_2)/(1 - Rh_1)]. \quad (2)$$

По сути, это «короткий» метод определения  $\chi$ . Основные ошибки оценок  $\chi$  связаны с неточностью определения числителя формулы. При низких начальных значениях  $Rh \sim 50\%$  отношение  $D_1/D_2 \sim 1,1$ , а пространственно-временная неоднородность аэрозольных характеристик даже при благоприятных стабильных условиях редко бывает ниже 2–3%. Поэтому при анализе конденсационной активности аэрозоля из рассмотрения были исключены все реализации, для которых начальное значение влажности в камере прибора было ниже 50%.

Что касается точности измерений величин  $Rh$ , заметим следующее. Начальное значение  $Rh$  (для влажного аэрозоля) получалось при плюсовых температурах по психрометру, при минусовых по гигрометру, тарированному по этому психрометру. Относительная влажность воздуха в камере прибора определялась по схеме: (температура воздуха  $T$  + относительная влажность) *in situ* → абсолютная влажность воздуха + температура в камере прибора  $T_{1,2}$  → относительная влажность в камере  $Rh_{1,2}$ . Поскольку базовым звеном для обоих значений  $Rh_{1,2}$  здесь является одно и то же значение абсолютной влажности, а температура измеряется достаточно хорошо ( $\Delta T = \pm 0,2$  °C), погрешность определения знаменателя формулы оказывается заметно скорректированной, во всяком случае она много меньше той, которая получалась бы при независимом определении  $Rh_{1,2}$ .

Итак, из данных зимне-весенних измерений 2000 г. были сформированы два статистических ансамбля: первый — февраль–март и второй — апрель. Такое разбиение учитывает вышеупомянутые существенные различия в условиях измерений. Эти различия нашли свое отражение и в статистических характеристиках ансамблей. При предварительной обработке данных формировался отдельный массив для величин  $\chi(\varphi = 45^\circ, \lambda = 0,54 \text{ мкм})$ . Ввиду важности этого параметра некоторые статистические характеристики для него проанализируем особо. Для сглаженных спектральных зависимостей  $D(\varphi = 45^\circ, \lambda)$  были построены соответствующие зависимости  $\chi(\varphi = 45^\circ, \lambda)$  и статистический анализ их ансамблей выполнен методом главных компонент.

Распределения  $\chi(\varphi = 45^\circ, \lambda = 0,54 \text{ мкм})$  для обоих ансамблей являются нормальными (рис. 1)

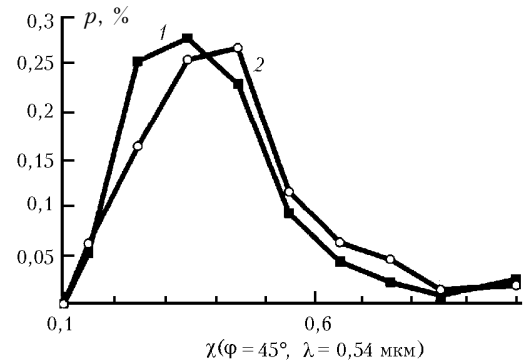


Рис. 1. Гистограммы параметра Хенела  $\chi(\varphi = 45^\circ, \lambda = 0,54 \text{ мкм})$  для ансамблей: февраль–март (2) и апрель (1)

с одинаковыми дисперсиями 0,3 и заметно разными средними:  $\chi = 0,45$  для первого и  $\chi = 0,35$  для второго. Правое крыло распределений спадает медленнее модельного, и за счет этого модельные средние меньше средних по ансамблю  $\langle \chi \rangle = 0,5$  и 0,4. Наличие сезонного хода и весеннего максимума установлено в [19], однако для рассматриваемого массива данных это не единственная причина различий средних по ансамблям.

Мы проанализировали связь параметра конденсационной активности с величиной коэффициента рассеяния. Было установлено, что существует значимая корреляция между этими величинами ( $R > 0,3$ ). Поле точек на двумерной диаграмме  $D(\varphi = 45^\circ, \lambda = 0,54 \text{ мкм}) - \chi(\varphi = 45^\circ, \lambda = 0,54 \text{ мкм})$  имеет характерный вид прямоугольного треугольника с катетами, параллельными осям координат. Разброс точек относительно невелик при высоких значениях коэффициента рассеяния  $D > 20$  (нет значений  $\chi > 0,5$  и  $\chi < 0,3$ ) и быстро растет с уменьшением  $D$  — размах вариаций при  $D < 5$  составляет  $\chi = 0,1-0,8$ . Ясно, что граничные значения, особенно верхнее, получены с заметной ошибкой и действительный размах меньше, но с уменьшением величины коэффициента рассеяния наблюдается тенденция роста значения  $\chi$ , осредненного по узкому интервалу изменения  $D$ .

На рис. 2 приведены средние по ансамблям спектральные зависимости  $\chi(\varphi = 45^\circ, \lambda)$  и первые два собственных вектора ковариационных матриц ансамблей. В обоих случаях первый вектор описывает около 75% полной дисперсии, второй — около 15%. Сравнение средних  $\chi(\varphi = 45^\circ, \lambda)$  позволяет выделить как общие их черты, так и характерные расхождения. Спектральный ход их близок для  $\lambda < 0,6 \text{ мкм}$ , при больших длинах волн среднее апрельского сезона падает. Такое поведение  $\chi(\varphi = 45^\circ, \lambda)$  дает основание предположить, что конденсационная активность быстро уменьшается с ростом размера частиц либо в области больших размеров существует вторая фракция. Располагая результатами решения обратной задачи — восстановленными распределениями частиц по размерам для влажного и подсушенного аэрозоля, мы можем рассмотреть эту проблему подробнее. Следуя А.Г. Лактионову [17], будем искать фактор роста аэрозольных частиц как отношение

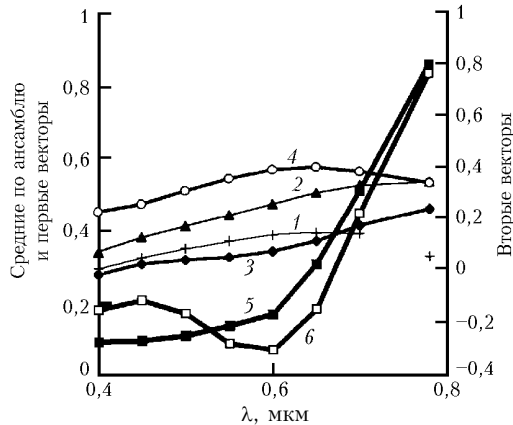


Рис. 2. Основные статистические характеристики спектральных зависимостей параметра Хенела  $\chi(\varphi = 45^\circ, \lambda)$  для ансамблей февраль–март и апрель. Среднее по ансамблю (2), первый (1) и второй (5) собственные векторы для февраль–марта, 4, 3, 6 – для апреля соответственно

радиусов частиц, соответствующих одной и той же величине интегрального распределения частиц «влажного» и «сухого» аэрозоля. Вариации плотности распределения частиц по размерам  $\zeta(r)$  при изменениях относительной влажности воздуха эквивалентны изменениям масштаба оси радиусов по закону  $r' = h(r)$  при сохранении интегральной счетной концентрации

$$\eta = \int_a^b \zeta(r) dr = \eta' = \int_{h(a)}^{h(b)} \zeta(h) dh. \quad (3)$$

В ходе конденсационной трансформации частицы из диапазона размеров  $[a, b]$  переходят в диапазон  $[h(a), h(b)]$ . Рассматривая  $\eta$  и  $\eta'$  как функцию верхнего предела интегрирования, можно из условия  $\eta = \eta'$  отыскать зависимость  $h(r)$ , определенную в [17] как фактор роста частиц. Ошибку, связанную с неопределенностью нижнего предела интегрирования, можно обойти, интегрируя  $\zeta(r)$  от больших радиусов к меньшим, при этом резко растущие  $\eta$  и  $\eta'$  очень быстро «забудут» начальные условия. Задача сводится к отысканию верхнего предела интеграла  $r' = h(r)$  по его значению из условия  $\eta = \eta'$ . Для экспериментальных зависимостей  $\eta(r)$  она неизбежно приведет к той или иной форме дифференцирования экспериментальной кривой. Разумнее, на наш взгляд, искать  $h(r)$  по сглаженным кривым с использованием, например, полиномиальной интерполяции методом наименьших квадратов (МНК). Поскольку в МНК аргумент и функция легко меняются местами (построение обратной функции), нахождение  $h(r)$  не составляет труда.

Анализ полученных кривых  $h(r)$  показал, что они имеют максимум, расположенный в области  $r = 0,2-0,5$  мкм. Сформированные для статанализа ансамбли зависимостей  $h(r)$  по исходным данным  $D(\varphi, \lambda)$  адекватны ранее рассмотренным двум ансамблям. Средние величины  $h(r)$  и первые два собственных вектора приведены на рис. 3. Первые векторы обоих ансамблей описывают около 90%

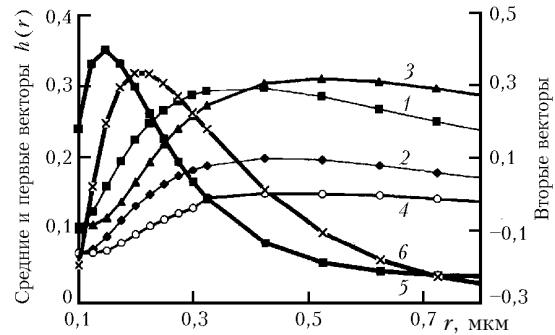


Рис. 3. Основные статистические характеристики фактора роста частиц  $h(r) = r(Rh)/r_0$  для двух ансамблей. Среднее (2), первый (1) и второй (5) собственные векторы ансамбля февраля–марта, 4, 3, 6 – для апреля соответственно

полной дисперсии, вторые – около 5%. Для однопараметрических ансамблей первый собственный вектор повторяет ход полной дисперсии. Вторые векторы ансамблей описывают то относительно небольшое число ситуаций, когда кривая роста имеет максимум в области радиусов  $r = 0,2-0,3$  мкм. Тот факт, что полученное среднестатистическое положение максимума кривой роста несколько расходится с данными [17, 18], может иметь несколько причин – различие в процессах ассимиляции и диссимиляции влаги, различие методик и т.д. Оптический метод оценки  $\chi$  использует оптические проявления осушки частиц, которые состоят не только в уменьшении размера частицы, но и в изменении ее структуры.

Конечной целью анализа методом главных компонент является поиск связей коэффициентов разложения векторов с какими-нибудь легко изменяемыми метеорологическими параметрами – это обычный путь построения статистической модели.

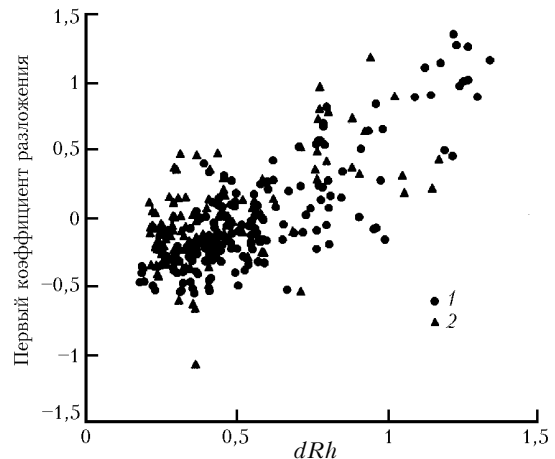


Рис. 4. Корреляционная диаграмма первого коэффициента разложения фактора роста частиц  $h(r) = r(Rh)/r_0$  и параметра  $dRh = \ln[(1 - Rh_2)/(1 - Rh_1)]$  для двух ансамблей: февраль–март (2) и апрель (1)

Мы проанализировали связь первого коэффициента разложения фактора роста  $h(r)$  с величиной  $dRh = \ln[(1 - Rh_2)/(1 - Rh_1)]$ , фигурирующей в формуле определения конденсационной активности  $\chi$ . Эту связь иллюстрирует корреляционная диаграмма (рис. 4). Точки, принадлежащие разным ансамблям,

отмечены разными символами. Коэффициент корреляции  $R$  для первого ансамбля равен 0,75, второго 0,85 и сводного ансамбля 0,8.

Итак, несмотря на различия в условиях измерений ансамблей и их статистик, между рассмотренными величинами обоих ансамблей и параметром  $dRh$  есть устойчивая связь, описывающая  $2/3$  полной дисперсии первых коэффициентов разложения кривых роста частиц. Поля точек разных ансамблей перекрываются почти полностью, что говорит об универсальности связи. По сути, регрессионная связь на рис. 4 есть микрофизическое обоснование формулы Хенела.

## Выводы

1. Спектральные зависимости коэффициента направленного светорассеяния приземного аэрозоля  $D(\varphi = 45^\circ, \lambda)$  в области длин волн  $\lambda = 0,4 \div 0,65$  мкм хорошо аппроксимируются формулой Ангстрема. В обычных условиях (исключая повышенное содержание пылевых частиц при прохождении холодного атмосферного фронта) существует хорошая корреляция между параметром Ангстрема  $\alpha$  и коэффициентом рассеяния  $\sigma$  (коэффициент корреляции  $R \approx 0,7$ ), это соотношение может быть записано как  $\alpha = \text{const} - 0,45 \ln \sigma$ . Стандартное отклонение  $\alpha$  равно примерно 0,3.

2. Распределение величины параметра Хенела  $\chi(\varphi = 45^\circ, \lambda = 0,54$  мкм) близко к нормальному со средним значением 0,4–0,5 и дисперсией 0,3, причем среднее значение для февраля–марта больше, чем для апреля. Обнаружена тенденция увеличения размаха вариаций величин  $\chi$  с уменьшением величины коэффициента рассеяния  $\sigma$ .

3. Фактор роста аэрозольных частиц  $r(Rh)/r_0$  в диапазоне радиусов  $r = 0,1 \div 1,0$  мкм имеет максимум в области  $r = 0,3 \div 0,4$  мкм. Статистические ансамбли  $h(r)$  тоже однопараметрические, первый вектор описывает около 90% общей дисперсии, второй вектор описывает ситуации, когда максимум  $h(r)$  находится при  $r < 0,3$ .

4. Для оценки фактора роста частиц  $h(r)$  может быть использована его статистическая связь с относительной влажностью воздуха. Формула, выражающая эту связь, является микрофизическим обоснованием формулы Хенела и описывает более  $2/3$  полной дисперсии  $h(r)$ , остаточная дисперсия связана с вариациями химического состава частиц.

В заключение автор выражает благодарность Г.С. Голицыну за постоянное внимание к работе и полезные обсуждения.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 01-05-64405).

1. Горчаков Г.И., Емиленко А.С., Свириденков М.А. Однопараметрическая модель приземного аэрозоля // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. 1981. Т. 17. № 1. С. 39–49.
2. Горчаков Г.И., Свириденков М.А. Статистическая модель оптических характеристик атмосферной дымки

// Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. 1979. Т. 15. № 1. С. 53–59.

3. Панченко М.В., Фадеев В.Я. Однопараметрическое представление индикатрисы рассеяния и относительная влажность воздуха // Исследование атмосферного аэрозоля методами лазерного зондирования. Новосибирск: Наука, 1980. С. 202–210.
4. Кабанов М.В., Панченко М.В., Пхалагов Ю.А., Веретенников В.В., Ужegov В.Н., Фадеев В.Я. Оптические свойства прибрежных дымок. Новосибирск: Наука, 1988. 200 с.
5. Лукшин В.В., Исаков А.А. Оптические характеристики дымовых аэрозолей // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. 1988. Т. 24. № 3. С. 250–257.
6. Козлов В.С., Панченко М.В., Тумаков А.Г. О влиянии режима сжигания углеводородных топлив на оптические свойства дымовых аэрозолей // Оптика атмосфер. и океана. 1993. Т. 6. № 10. С. 1278–1286.
7. Козлов В.С., Панченко М.В. Исследование оптических свойств и дисперсного состава древесных дымовых аэрозолей // Физ. горения и взрыва. 1996. Т. 32. № 5. С. 122–133.
8. Свириденков М.А., Горчаков Г.И., Исаков А.А., Сидоров В.Н. Сопоставление однопараметрической статистической модели с результатами круглосуточных измерений матриц рассеяния света // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. 1985. Т. 21. № 1. С. 22–31.
9. Исаков А.А., Бегунов С.Л., Головятинский С.А., Тихонов А.В. Статистическое моделирование оптических и микрофизических характеристик приземного аэрозоля // Тр. Междунар. конф. «Физика атмосферного аэрозоля». Россия, М.: Диалог-МГУ, 1999. С. 191–199.
10. Розенберг Г.В. Определение микрофизических параметров золь по данным комплексных оптических измерений // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. 1976. Т. 12. № 11. С. 1159–1167.
11. Исаков А.А., Емиленко А.С. О корреляционных связях оптических и микрофизических характеристик фонового аэрозоля // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. 1986. Т. 22. № 7. С. 743–750.
12. Isakov A.A. Some results of investigations of optical and microphysical characteristics of smoke aerosol // Proc. SPIE. 1998. V. 3583. P. 234–241.
13. Веретенников В.В., Наац И.Э., Панченко М.В., Фадеев В.Я. К определению микроструктуры и показателя преломления атмосферных дымок из поляризационных характеристик светорассеяния // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. 1978. Т. 14. № 12. С. 1313–1317.
14. Isakov A.A., Sidorov V.N., Tikhonov A.V. and Golitsyn G.S. Study of characteristics of near-surface aerosol by means of spectropolarimeter and nephelometer in the winter complex experiment // Proc. of the Tenth ARM Science Team Meeting. 2001.
15. Исаков А.А., Свириденков М.А., Сидоров В.Н. О конденсационной изменчивости индикатрисы рассеяния // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. 1983. Т. 19. № 12. С. 1321–1324.
16. Горчаков Г.И., Сидоров В.Н., Свириденков М.А. О конденсационной активности фонового аэрозоля // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. 1982. Т. 18. № 9. С. 997–999.
17. Лактионов А.Г. Равновесная гетерогенная конденсация. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 160 с.
18. Meszaros A. On the variation of the size distribution of large and giant atmospheric particles as a function of the relative humidity // Tellus. 1971. V. 23. № 4–5. P. 436–440.

19. Панченко М.В., Терпугова С.А., Яшueva Е.П., Ту-  
маков А.Г. Внутригодовая изменчивость конденса-  
ционной активности атмосферного аэрозоля // Тез. тру-

дов Международной конференции «Физика атмо-  
сферного аэрозоля». Россия, М.: Диалог-МГУ, 1999.  
С. 254–255.

***A.A. Isakov. Some statistical regularities in variations of optical and microphysical characteristics of surface aerosol.***

Optical and microphysical characteristics of surface aerosol measured with a spectropolarimeter are studied. Day-to-day measurements were carried out at Zvenigorod Scientific Station, Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, during February 1999 and February–May 2000. The spectropolarimeter recorded polarization components of light scattered by surface aerosol at three scattering angles  $\varphi = 45, 90, 135^\circ$  for wavelength in range  $\lambda = 0.4\text{--}0.76 \mu\text{m}$  with spectral resolution  $\Delta\lambda \approx 10 \text{ nm}$ . The instrument was supplied by a low-temperature heater of incoming air, which made it possible to estimate the aerosol condensation activity (the Hanel parameter  $\chi$ ) from characteristics measured for wet and dry aerosol. The distribution of parameter  $\chi$  is shown to be close to the Gaussian distribution with a variance of 0.3 and the mean value  $\chi = 0.4\text{--}0.5$ . The correlation between the parameter  $\chi$  and the scattering coefficient is low; however, the scatter in values of  $\chi$  increases markedly with a decrease in the scattering coefficient. An inversion to the volume distribution of particles and the complex refractive index of particle material was obtained for the main body of data measured for both wet and dry aerosol, which made it possible to estimate the condensation factor of particle growth. On the basis of principal-component statistical analysis of the growth factor, a regression relationship was obtained between the growth factor and the relative air humidity, which is a microphysical justification of the Hanel formula.