

М.В. Панченко, М.А. Свириденков*, С.А. Терпугова, В.С. Козлов

Активная спектрофелометрия в исследовании микрофизических характеристик субмикронного аэрозоля

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

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

Поступила в редакцию 26.04.2004 г.

Рассмотрен подход к исследованию свойств атмосферного субмикронного аэрозоля, который условно назван методом активной спектрофелометрии. Изложены методика и результаты спектрополяриметрических исследований субмикронного аэрозоля при искусственном контролируемом воздействии на его свойства. Измерения проводились на аппаратном комплексе, включающем нефелометр ФАН, системы увлажнения и нагрева аэрозоля и блок отсечки мелких частиц с использованием 4-ступенчатой диффузионной батареи. Решение обратной задачи обеспечило получение информации о спектре размеров и показателе преломления частиц аэрозоля. Получены оценки зависимости гигроскопичности и летучести аэрозоля от размера частиц. Измерения с диффузионным отсекаем позволили подтвердить его расчетную калибровку и определить нижнюю границу восстанавливаемого спектра размеров.

Введение

Атмосферный аэрозоль является одной из наиболее изменчивых составляющих земной атмосферы. Адекватность климатических и радиационных моделей в значительной мере определяется надежностью данных об оптических и микрофизических свойствах аэрозоля.

Огромное разнообразие источников и стоков, химического состава частиц атмосферного аэрозоля и высокая пространственно-временная изменчивость их свойств приводят к мысли, что наиболее достоверные сведения об оптических характеристиках аэрозоля и их трансформации под воздействием всего комплекса геофизических процессов на сегодняшний день могут быть получены только экспериментальным путем.

Развиваемый нами на протяжении многих лет подход к исследованию свойств атмосферного субмикронного аэрозоля в реальной атмосфере, условно названный *методом активной спектрофелометрии*, представлен в данной статье.

1. Основы метода

Прежде чем перейти к описанию конкретной методики, отметим следующие ключевые моменты развиваемого подхода.

Очевидно, что полнокроевое изучение свойств аэрозоля возможно только при комплексном, всестороннем использовании всех методов и средств измерения параметров микроструктуры, химического состава частиц, их формы и спектральной зависимости комплексного показателя преломления. Для того чтобы выявить связь всех этих характеристик с внешними атмосферными факторами, необходим длительный широкомасштабный эксперимент. Но даже в случае, когда эксперимент проводится в реальной атмосфере и регистрируются все необходимые параметры, корректно описать многие процессы вряд ли удастся, поскольку все процессы, протекающие в атмосфере, находятся в сложной взаимосвязи друг с другом.

В частности, рассмотрим хорошо известный пример, когда делается попытка параметризовать связь оптических или микрофизических характеристик с относительной влажностью воздуха на основе данных наблюдений *in situ*.

Подчеркнем, что это один из очень важных процессов, определяющих изменчивость оптических свойств аэрозоля, учет которого крайне необходим [1]. В приземном слое атмосферы в течение суток синхронно с изменением температуры воздуха меняется относительная влажность. Одновременно с этим хорошо выраженным процессом происходят перестройка микроструктуры аэрозоля и изменение его концентрации под воздействием генерации, переноса, выноса или оседания частиц. Понятно, что для корректного описания влияния относительной влажности необходим комплексный анализ всех этих процессов. В противном случае, когда для оценки используются только данные наблюдений какой-либо аэрозольной характеристики и величины относительной влажности воздуха, добиться корректного выявления этой связи практически невозможно.

Для того чтобы уйти от этих неизбежных проблем, в основу развиваемого нами метода «активной нефелометрии» был положен принцип *раздельного* исследования процессов изменчивости *сухой основы* аэрозольных частиц под воздействием внешних факторов и *конденсационной активности* аэрозоля.

Это достигается сочетанием наблюдений характеристик сухой основы аэрозольных частиц в мониторинговом режиме и регулярных измерений их зависимости от относительной влажности воздуха при искусственно контролируемом воздействии [2]. Дополнительным способом активного воздействия, который также введен в практику ежедневных измерений, является так называемый *термооптический* метод. Этот метод позволяет при контролируемом нагреве атмосферных частиц от температуры окружающего воздуха до $T \sim 250$ °С качественно оценить относительное содержание веществ с разной летучестью в составе аэрозольного вещества [3].

Таким образом, первым ключевым звеном подхода является сочетание мониторингового режима измерений характеристик атмосферного аэрозоля и контролируемого параллельного воздействия, позволяющего расширить информативность эксперимента. Продуктивность такого подхода даже при измерении только коэффициентов рассеяния на одной длине волны была подтверждена в течение многих лет (см., например, [2, 4, 5]).

Следующий этап развития метода связан с переходом к измерению коэффициентов направленного рассеяния под

углом 45° на трех длинах волн (0,41; 0,5 и 0,63 мкм) и его ортогональных поляризационных составляющих под углом 90° на двух длинах волн (0,44 и 0,51 мкм).

Принципиальным моментом здесь является то, что в этом случае уже возможно решение *обратной задачи*, что обеспечивает получение информации о спектре размеров и показателе преломления частиц аэрозоля.

Отметим следующее, на наш взгляд, важное обстоятельство, подчеркивающее перспективность такого подхода к оценке оптических характеристик. Очевидно, что для решения радиационных задач необходимо знание различных оптических параметров аэрозоля в разных участках спектра, а не только на тех длинах волн, на которых были проведены измерения и обеспечена достаточная статистика. В современной практике аэрозольных исследований в реальной атмосфере применяется очень большой набор методов и средств изучения свойств аэрозоля. Можно выделить два основных подхода к оценке оптических характеристик [6]. Один из них основывается на сведениях о микрофизическом и химическом составе частиц и на последующем расчете необходимых оптических характеристик, другой опирается на результаты оптических измерений.

Преимуществом «микрофизического» подхода является возможность получения расчетных данных практически обо всех необходимых оптических параметрах аэрозоля в любом заданном спектральном диапазоне. Но, на наш взгляд, это только кажущееся преимущество. Наиболее серьезным недостатком этого подхода является то обстоятельство, что любое ограничение или искажение сведений о микрофизических параметрах частиц или об их форме приводят к трудно контролируемым и оцениваемым погрешностям восстановления оптического образа. Особенно непредсказуемые ошибки оценки оптических параметров возникают при попытках расчета комплексного показателя преломления частиц на основе данных химического анализа аэрозольного вещества.

Подход к описанию оптических свойств атмосферного аэрозоля, основанный на результатах исследований оптических характеристик непосредственно в реальной атмосфере, в значительной мере свободен от недостатков, присущих микрофизическому моделированию. К недостаткам оптического подхода следует отнести то, что применение полученной информации в этом случае, как правило, ограничено тем диапазоном оптических характеристик и той спектральной областью, в которых были получены исходные наблюдательные данные, а выход за их рамки требует дополнительных исследований и обоснования.

Отчасти преодолеть эти трудности позволяет подход, названный Г.В. Розенбергом методом микрофизической экстраполяции [7–11]. В его основе лежит идея воспользоваться полученными из обращения данными о микроструктуре и комплексном показателе преломления частиц для последующего расчета необходимых оптических характеристик (которые непосредственно в эксперименте не измерялись).

Исходя из нашего опыта, необходимо подчеркнуть, что результаты восстановления микроструктуры и показателя преломления по данным измерений небольшого числа оптических параметров нужно использовать очень аккуратно. Вряд ли без специальных дополнительных экспериментов они применимы для детального исследования поведения функции распределения частиц по размерам. В то же время для последующего расчета оптических характеристик они наиболее пригодны. Если речь идет о восстановлении иных оптических характеристик для этих же длин волн или о близ-

ком спектральном диапазоне, то оптические свойства в значительной мере определяются тем же интервалом размеров частиц. Статистически это проявляется в высокой корреляции между оптическими параметрами. Тем не менее ограниченный спектральный диапазон и небольшой набор измеряемых характеристик (как в нашем случае), на основе которых решается обратная задача, требуют тщательного изучения и корректного определения как границ восстанавливаемого спектра размеров, так и погрешностей оценки показателя преломления.

Таким образом, основной сущностью метода *активной спектронефелометрии* является сочетание рутинных оптических наблюдений, контролируемого искусственного воздействия на реальный аэрозоль (по мере углубления понимания процессов изменчивости аэрозоля способы воздействия будут дополнены) и соответствующего аппарата решения обратных задач.

Очевидно, что такой подход может быть реализован на различных оптических приборах с локализованным измерительным объемом.

2. Реализация метода в исследованиях субмикронного аэрозоля

Учитывая то обстоятельство, что применяемая нами аппаратура, методы калибровки и проведения измерений достаточно полно представлены в предыдущих публикациях [2, 12], подчеркнем лишь основные моменты, необходимые для дальнейшего изложения.

Базовым оптическим инструментом, на котором проводятся все измерения, является нефелометр ФАН, дополненный устройствами для активных воздействий. Эта установка включена в состав аэрозольной станции ИОА СО РАН (<http://aerosol1.iao.ru>), которая проводит измерения ежечасно в автоматическом режиме. Таким образом, при осуществлении активного режима воздействий второй идентичный нефелометр, азталометр, фотоэлектрический счетчик частиц и метеоконкомплекс аэрозольной станции позволяют с временным разрешением 1 ч контролировать характер изменчивости реальной атмосферной ситуации.

Следующий весьма важный момент заключается в том, что все схемы организации непрерывной прокачки атмосферного аэрозоля через небольшие объемы нефелометров заведомо ограничивают возможности исследования частиц, радиус которых превышает 1 мкм. А то обстоятельство, что измерения проходят в интервале длин волн 0,41–0,63 мкм, еще более препятствует получению информации о больших частицах.

Именно поэтому и в названии работы, и при дальнейшем обсуждении результатов говорится только о субмикронных частицах.

2.1. Методика обращения данных оптических измерений

Обратная задача решалась итерационным методом [13], основанным на алгоритме Дж. Твитти [14]. Преимуществами итерационного метода являются простота его программной реализации и автоматическое обеспечение неотрицительности решения. Однако итерационный алгоритм не дает оценок ошибок восстановления. Оценки достоверности решения обратной задачи и диапазона восстанавливаемого спектра размеров проводились с использованием численных экспериментов (нижняя граница опре-

делалась также и в экспериментах по контролируемой отсечке, которые будут описаны ниже). Модельные и измеренные оптические характеристики зашумлялись случайными ошибками, соответствующими погрешностям измерения. При большом числе реализаций случайных возмущений полученные распределения, как показано на рис. 1, заполняют коридор между двумя огибающими, который дает оценку достоверности решения обратной задачи. Сопоставление различных модельных распределений с результатами обращения их оптических образов показало, что спектр размеров надежно восстанавливается в диапазоне от 0,07 до 0,6–0,8 мкм.

Наглядное представление о диапазоне чувствительности измеряемых нефелометром ФАН параметров к частицам разных размеров можно получить, рассчитав вклад частиц в наблюдаемые оптические характеристики в зависимости от их размера. На рис. 2 представлены такие зависимости, полученные для однопараметрической модели атмосферной дымки [10, 15, 16] при разных значениях дальности видимости.

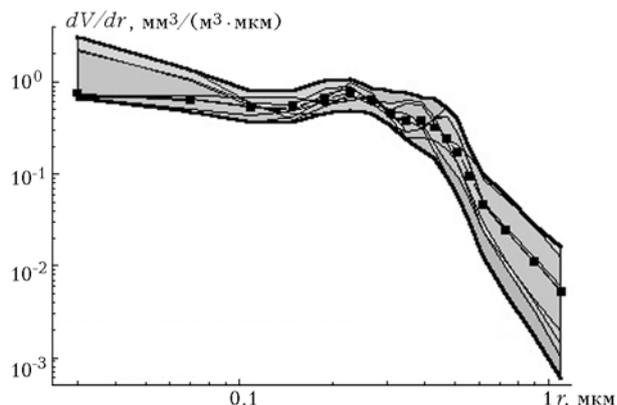


Рис. 1. Результаты обращения измеренных и «возмущенных» оптических параметров: квадраты – обращение измеренных оптических параметров; тонкие линии – обращение оптических параметров с ошибкой; жирные линии – огибающие

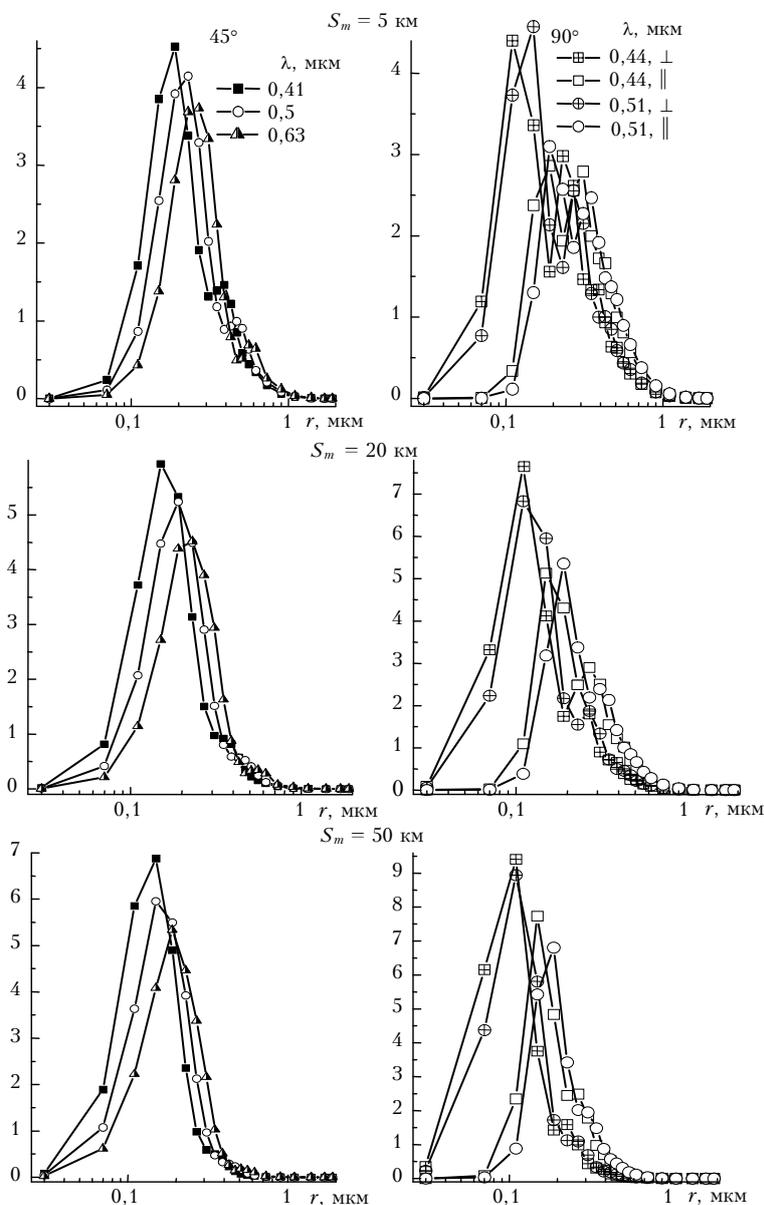


Рис. 2. Вклад частиц разных размеров в измеряемые оптические характеристики

При обращении спектрофелометрических данных показатель преломления, а следовательно, и ядро интегрального уравнения Фредгольма *a priori* неизвестны. Численные эксперименты на модельных распределениях частиц по размерам показали, что в качестве критерия выбора показателя преломления может служить норма второй производной от логарифма спектра размеров. Кроме того, выяснилось, что для набора оптических параметров, измеряемых нефелометром ФАН, и реализуемых в эксперименте точностях измерений невозможно разделить действительную n и мнимую k части показателя преломления. При таком согласованном изменении n и k , чтобы их разность оставалась постоянной, оптическая невязка и гладкость решения практически не меняются. Отметим, что такая неоднозначность не влияет существенно и на форму восстанавливаемого распределения частиц по размерам. При обращении данных измерений среднеквадратическое отклонение восстановленных оптических параметров от измеренных не превышает в большинстве случаев 5%.

Интерпретация данных оптических измерений с целью оценки микрофизических параметров среды относится к классу так называемых некорректных задач. Наличие какой-либо априорной информации о свойствах среды (например, о виде функции распределения частиц по размерам или отдельных ее параметрах, о значении комплексного показателя преломления) или хотя бы знание разумных границ их изменчивости позволяют снизить трудности в поисках верного решения.

Как отмечалось ранее, информация о спектре размеров, полученная на основе решения обратной оптической задачи, как правило, не дает обоснованных возможностей для оценки всех особенностей функции распределения частиц по размерам. Для того чтобы преодолеть этот недостаток, нами отработывается метод искусственного ограничения диапазона измеряемых частиц с помощью разного рода отсеков. Такой подход, который является естественным развитием «активной нефелометрии», в идеале позволяет проводить измерения оптических характеристик квазимонодисперсных частиц. Последующее решение обратной задачи в этом случае дает основу для детального исследования функции распределения частиц по размерам и оценки значений показателя преломления как функции размера.

В настоящее время нам удалось реализовать и отработать методику регулируемого ограничения диапазона измеряемых частиц лишь со стороны их нижней границы (четыре последовательно включаемых каскада диффузионной батареи). Попытка воспользоваться отсеком со стороны верхней границы спектра размеров с применением устройства на основе коронного разряда пока не привела к желаемому результату. Но уже на данном этапе развития метода применение последовательной отсеки дает возможность, с одной стороны, оценить чувствительность метода решения обратной задачи для каждого из оптических экспериментов, а с другой – использовать эту информацию в качестве априорной и тем самым повысить качество обращения.

2.2. Метод отсеки

Аппаратурная реализация диффузионного отсека и подробная лабораторная калибровка были проведены сотрудниками Института химической кинетики и горения СО РАН [17]. Также совместно с ними это устройство было адаптировано в систему нефелометра и проведены первые измерения на реальном аэрозоле [18, 19].

На рис. 3 приведена блок-схема диффузионного отсека. Принцип его действия полностью аналогичен работе диффузионной батареи [20] и базируется на хорошо известной зависимости коэффициента диффузии частиц от их размера.

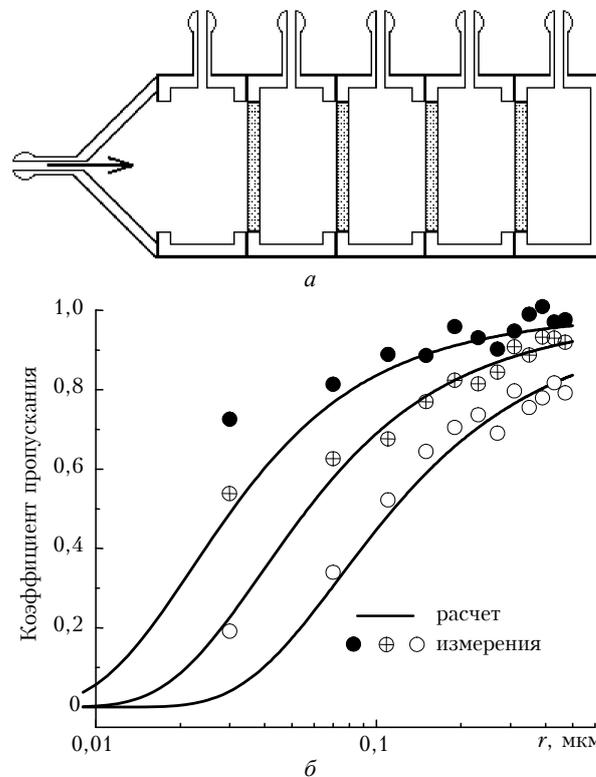


Рис. 3. Блок-схема диффузионного отсека (а) и коэффициенты пропускания его различных ступеней (б) (результаты расчетов по [16, 20] и восстановления по результатам измерений)

Диффузионный отсекающий удаляет наиболее мелкие частицы из проходящего потока. С увеличением числа соответствующих сеток граница отсеки смещается в сторону больших размеров. Варьирование числа каскадов в сочетании с выбором соответствующих сеток обеспечивает контролируемое изменение нижней границы функции распределения частиц по размерам в анализируемом потоке воздуха.

2.3. Апробация методики измерений с использованием отсеки и решения обратной задачи

Отработка методики измерений с помощью диффузионной отсеки проводилась в серии экспериментов на аэрозольной станции [18, 19] в течение 2002–2003 гг. С учетом специфики спектрофелометрического подхода в этих экспериментах одновременно изучались два вопроса. С одной стороны, измерения оптических характеристик и последующее решение обратной задачи обеспечивали восстановление спектра размеров и проведение на этой основе оценки эффективности воздействия отсеки. С другой стороны, сопоставление результатов обращения с данными непосредственных расчетов эффективности каскадов диффузионной батареи [16, 20] позволило провести дополни-

тельную проверку качества решения обратной задачи и оценить нижнюю границу восстанавливаемого спектра размеров.

На рис. 3 приведены также данные о коэффициенте пропускания различных ступеней отсекаателя (сплошные кривые – расчет по [16, 20], символами представлены результаты соответствующего решения обратной задачи по данным непосредственных оптических измерений).

Как видим, наблюдается хорошее согласие рассчитанных и восстановленных данных в диапазоне радиусов от 0,07 до 0,4 мкм.

Отсюда можно сделать следующие выводы:

1. Воздействие диффузионного отсекаателя действительно обеспечивает контролируемое задание нижней границы спектра размеров аэрозольных частиц в соответствии с расчетными характеристиками (что может быть использовано как априорное доопределение задачи).

2. Тот набор оптических характеристик и спектральный диапазон, в котором мы проводим измерения, позволяет уверенно определять вид функции распределения для частиц радиусом больше 0,07 мкм, но вряд ли пригоден для изучения более мелких частиц.

3. Апробация метода для исследования фактора роста частиц

Как уже упоминалось, изменение относительной влажности воздуха в атмосфере, как правило, приводит к изменению спектра размеров и значений показателя преломления частиц [6, 21]. В нашем случае изучение конденсационной активности аэрозоля заключается в измерении оптических характеристик реального аэрозоля, забираемого из атмосферы, в процессе которого частицы подвергаются искусственному увлажнению в диапазоне изменения относительной влажности воздуха 20–95%.

Оптические характеристики субмикронной фракции аэрозоля как функции относительной влажности воздуха удовлетворительно описываются эмпирической формулой Кастена [21–24]:

$$\mu(RH) = \mu(RH = 0)(1 - RH)^{-\gamma}, \quad (1)$$

где μ – коэффициент рассеяния или коэффициент направленного светорассеяния под углом 45° ; RH – относительная влажность воздуха; γ – параметр конденсационной активности. Предположив, что конденсационная активность аэрозоля не зависит от его размера, по величине параметра γ можно оценить параметр χ , характеризующий рост размера частиц с увеличением относительной влажности. Такая оценка является достаточно грубой, так как требует априорного задания показателя преломления сухой основы аэрозоля и модели распределения частиц по размерам. Тем не менее ее точности достаточно для мониторинга конденсационной активности аэрозоля, анализа особенностей ее временной изменчивости и связей с метеорологическими параметрами атмосферы.

Для исследования же конденсационной трансформации спектра размеров аэрозоля и, в частности, зависимости фактора роста от размера частиц необходимо измерять максимальное число оптических характеристик и использовать аппарат решения обратных задач светорассеяния.

В наших экспериментах измерения проводились последовательно на трех длинах волн. Один цикл измерений длился около 40 мин. Стабильность ситуации контролировалась дополнительным нефелометром, непрерывно регистрировавшим коэффициент направленного светорассеяния под углом 45° на длине волны 0,51 мкм. Пример одной из реализаций измерения оптических характеристик в процессе увлажнения представлен на рис. 4.

Трансформация распределения объемов частиц по размерам показана на рис. 5,а. Здесь отчетливо прослеживается согласованное увеличение объемной концентрации частиц и модалного радиуса распределения частиц по размерам с ростом относительной влажности. На рис. 5,б показано, как при этом меняются показатель преломления и общий объем частиц.

Решение обратной задачи на нескольких последовательных стадиях искусственного конденсационного процесса позволяет оценить зависимость конденсационной активности от размера сухих частиц. Для частиц крупнее 0,1 мкм, когда эффекты, связанные с кривизной поверхности частицы, становятся несущественными, эта зависимость определяется химическим составом аэрозоля и прежде всего содержанием растворимых веществ. Для описания конденсационной активности частиц разных размеров используется такой параметр, как фактор роста:

$$GF = \frac{r(RH = 80\%)}{r(RH = 30\%)}. \quad (2)$$

Зависимость фактора конденсационного роста от размера частиц оценивалась из сопоставления интегральных счетных распределений:

$$N(r_j) = \int_{r_j}^{\infty} \frac{dN}{dr} dr. \quad (3)$$

Обозначим N_d и N_w распределения, соответствующие сухому и увлажненному аэрозолю. Если $N_d(r_1) = N_w(r_2)$, то фактор роста для частиц радиусом r_1 равняется r_2/r_1 . Этот метод был предложен А.Г. Лактионовым [25] для интерпретации измерений конденсационной активности с использованием фотоэлектрических счетчиков. Его применение возможно при двух допущениях:

1. Все частицы одного размера имеют близкую конденсационную активность (т.е. фактор роста действительно является функцией размера).

2. Если $r_{1d} < r_{2d}$, то $r_{1w} < r_{2w}$ (где индекс d относится к сухому, w – к увлажненному аэрозолю).

Практическая реализация метода Лактионова затрудняется тем, что распределение частиц по размерам восстанавливается для дискретного набора радиусов. Поэтому для определения фактора роста использовалась интерполяция обратной функции $r_w(N)$ кубическими сплайнами в точках $N_i = N_d(r_i)$. Пример полученной таким образом зависимости фактора роста от размера показан на рис. 6. Следует отметить, что вследствие преобладающего вклада в измеряемые характеристики частиц радиусами 0,1–0,3 мкм для частиц радиусами больше 0,4 мкм оценка фактора роста становится менее надежной.

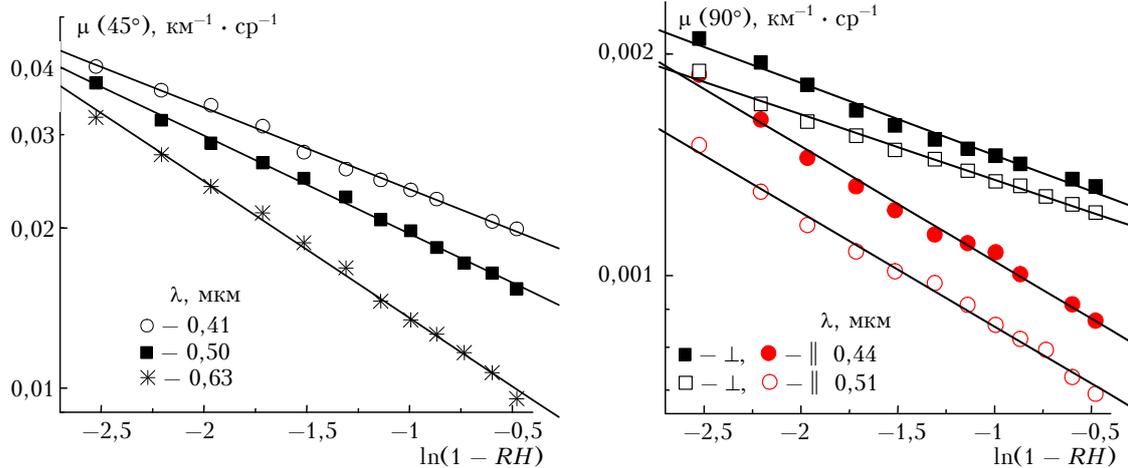


Рис. 4. Зависимость измеряемых оптических характеристик от относительной влажности воздуха

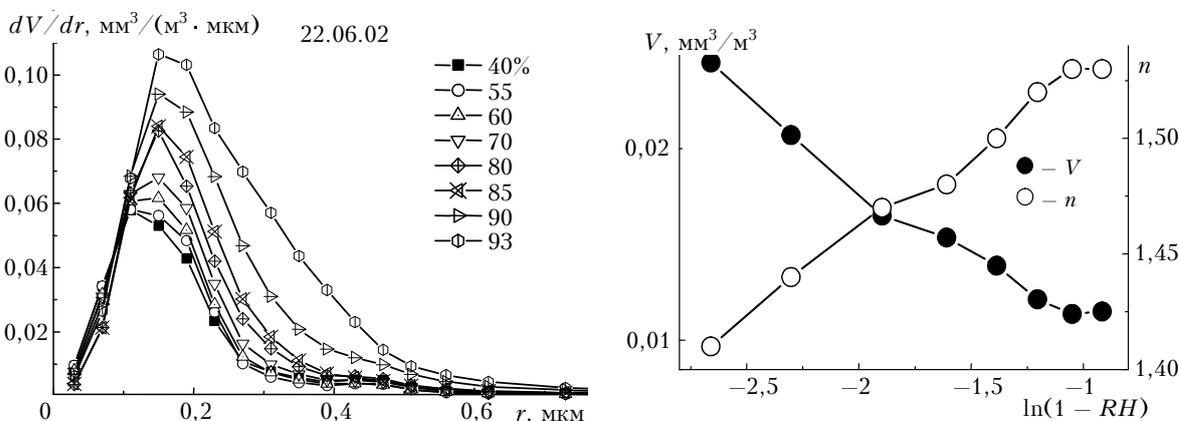


Рис. 5. Трансформация объемного распределения частиц по размерам (а), объемной концентрации и показателя преломления (б) с изменением относительной влажности воздуха

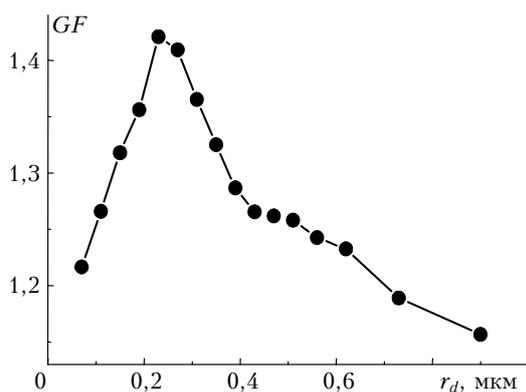


Рис. 6. Фактор роста аэрозольных частиц в зависимости от размера сухой частицы в диапазоне относительной влажности 30–80%

4. Термооптические исследования субмикронного аэрозоля

Идея применения термоанализа, широко используемого в аналитической химии, при исследованиях аэрозоля

появилась в 60-е гг. XX в. и была позже развита Н.И. Юдиным и Ю.С. Любовцевой [26] при оптических измерениях в натуральных условиях.

В то же время измерения только одного коэффициента рассеяния [3] или коэффициента направленного светорассеяния [2, 24] позволяют лишь качественно проследить изменение объема частиц при нагреве. Измерения семи параметров, включая степень линейной поляризации, позволяют выявить закономерности трансформации спектра размера аэрозоля при нагреве.

Пример изменения оптических характеристик при нагреве показан на рис. 7. На рис. 8, а представлены объемные распределения частиц по размерам на различных стадиях нагрева.

По аналогии с фактором роста можно ввести фактор летучести

$$VF = \frac{r(T = 20 \text{ }^\circ\text{C})}{r(T = 100 \text{ }^\circ\text{C})} \quad (4)$$

и использовать для его определения ту же методику, что и для фактора роста. Полученные на основе решения обратных задач зависимости фактора летучести от размера ненагретой частицы показаны на рис. 8, б.

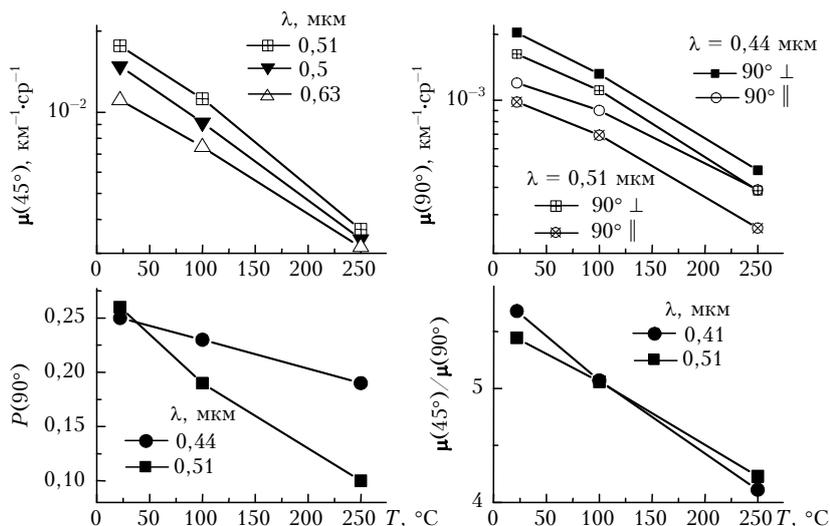


Рис. 7. Измеряемые оптические параметры в зависимости от температуры: μ – коэффициент направленного рассеяния; P – степень поляризации

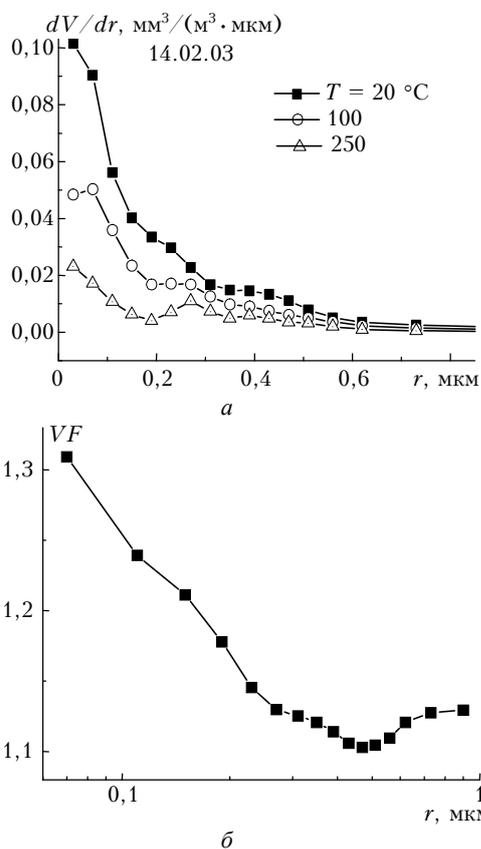


Рис. 8. Трансформация объемного распределения частиц по размерам при нагреве от 20 до 250 °C (а) и фактор летучести аэрозольных частиц в диапазоне температур 20–100 °C (б)

В среднем с ростом размера в диапазоне 0,07–0,4 мкм наблюдается тенденция к уменьшению фактора летучести.

Заключение

Таким образом, метод активной спектрофелометрии, сочетающий измерение характеристик аэрозольного светорассеяния при искусственном контролируемом воз-

действии на его свойства с последующим решением обратных задач, позволяет существенно расширить возможности экспериментального исследования аэрозоля.

Подчеркнем, что применительно к атмосферному аэрозолю важной составляющей развиваемого подхода является принцип *раздельного* изучения процессов изменчивости *сухой основы* аэрозольных частиц под влиянием внешних геофизических факторов, дополненный углубленным исследованием физико-химических свойств частиц с помощью активных воздействий.

Перспективы развития этого подхода видятся в расширении возможностей нефелометрических установок для исследования большего диапазона размеров частиц. Это потребует кардинального изменения характеристик воздухозаборных трактов, увеличения рассеивающих объемов, расширения спектрального диапазона и набора измеряемых оптических параметров. Дополнительные перспективы углубленного изучения свойств аэрозоля могут быть реализованы при внедрении в эксперимент иных способов контролируемого воздействия на частицы, например при исследовании конденсационной активности аэрозоля под воздействием паров разных веществ, электрических полей и т.д.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 03-05-64787 и 04-05-65061), программы ARM DOE USA (контракт № 5012) и Программы ОФН РАН 2.12 «Физика атмосферы: электрические процессы, радиофизические методы исследований», проект «Акустические и оптические технологии изучения атмосферных процессов».

1. Георгиевский Ю.С., Розенберг Г.В. Влажность как фактор изменчивости аэрозоля // Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана. 1973. Т. 9. № 2. С. 126–138.
2. Panchenko M.V., Terpugova S.A., Tumakov A.G. Annual variations of submicron aerosol fraction as assessed from the data of airborne nephelometric measurements // Atmos. Res. 1996. V. 41. P. 203–215.
3. Любовцева Ю.С., Юдин Н.И., Моисеенко Г.С. Исследование процессов физико-химической трансформации субмикронной фракции природного аэрозоля термо- и гигрооптическими методами // Защита атмосферы от загрязнений. Вильнюс. 1979. № 5. С. 40–59.
4. Panchenko M.V., Terpugova S.A., Tumakov A.G., Yausheva E.P. Experimental study of the parameter of aerosol condensation activ-

- ity in the lower troposphere // Proc. of the Eighth ARM Science Team Meeting, Tucson, Arizona, March 23–27, 1998. P. 555–557.
5. *Panchenko M.V., Terpugova S.A., Yausheva E.P.* Season variations of the condensation activity of atmospheric aerosol // *J. Aerosol Sci.* 1990. V. 30. Suppl. 1. P. 269–270.
 6. *Кабанов М.В., Панченко М.В.* Рассеяние оптических волн дисперсными средами. Ч. III. Атмосферный аэрозоль // Томск: Изд. ТФ СО АН СССР, 1984. 189 с.
 7. *Розенберг Г.В.* Оптические исследования атмосферного аэрозоля // *Успехи физ. наук.* 1968. Т. 95. Вып. 1. С. 159–208.
 8. *Розенберг Г.В.* Свойства атмосферного аэрозоля по данным оптического исследования // *Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана.* 1967. Т. 3. № 9. С. 936–949.
 9. *Розенберг Г.В.* Определение микрофизических параметров аэрозоля по данным комплексных оптических измерений // *Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана.* 1976. Т. 12. № 11. С. 1159–1167.
 10. *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.
 11. *Веретенников В.В., Кабанов М.В., Панченко М.В.* Микрофизическая интерпретация однопараметрической модели поляризационных индикатрис (дымка прибрежного района) // *Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана.* 1986. Т. 22. № 10. С. 1042–1049.
 12. *Зув В.Е., Белан Б.Д., Кабанов Д.М., Ковалевский В.К., Лукьянов О.Ю., Мележкин В.Е., Микушев М.К., Панченко М.В., Пеннер И.Э., Покровский Е.В., Сакерин С.М., Терпугова С.А., Толмачев Г.Н., Тумаков А.Г., Шаманаев В.С., Щербатов А.И.* Самолет-лаборатория АН-30 «Оптик-Э» для экологических исследований // *Оптика атмосфер. и океана.* 1992. Т. 5. № 10. С. 1012–1021.
 13. *Аникин П.П., Свириденков М.А.* Оптические характеристики и микроструктура аэрозоля по данным измерений индикатрис рассеяния в области солнечного ореола // *Сб. трудов Междунар. конф. «Физ. атмосферного аэрозоля».* Москва, апрель 1999. М.: Диалог-МГУ, 1999. С. 20–28.
 14. *Twitty J.T.* The inversion of aureole measurements to derive aerosol size distributions // *J. Atmos. Sci.* 1975. V. 32. P. 584–591.
 15. *Розенберг Г.В., Горчаков Г.И., Георгиевский Ю.С., Любовцева Ю.С.* Оптические параметры атмосферного аэрозоля. Физика атмосферы и проблема климата. М.: Наука, 1980. 260 с.
 16. *Panchenko M.V., Kabanov M.V., Fadeev V.Ya.* Statistical Model of Directed Light Scattering Coefficients of Coastal Haze // *J. Opt. Soc. Amer.* 1985. N 10. P. 1735.
 17. *Reischl G.P., Majerovicz A., Ankilov A., Baklanov A., Eremenko S.I. and Mavliev R.A.* Comparison of the Novosibirsk automated diffusion battery with Vienna electromobility spectrometer // *J. Aerosol Sci.* 1991. V. 22. P. 325–331.
 18. *Kozlov V.S., Kozlov A.S., Ankilov A.N., Baklanov A.M., Panchenko M.V., Sviridenkov M.A., Terpugova S.A.* The Use of a Stage Diffusion Cut-Off in Aerosol Optical Investigations // *Proc. SPIE.* 2003. V. 5397. P. 80–84.
 19. *Panchenko M.V., Terpugova S.A., Kozlov V.S., Sviridenkov M.A., Kozlov A.S.* Active spectral nephelometry in studies of the condensational activity of submicron aerosol // *Proc. of the Thirteenth ARM Science Team Meeting, Broomfield, Colorado.* March 31–April 4, 2003. http://www.arm.gov/docs/documents/technical/conf_0304/panchenko2-mv.pdf
 20. *Cheng Y.S., Keating J.A., Kanapilly G.M.* Theory and calibration of a screen-type diffusion battery // *J. Aerosol Sci.* 1980. V. 11. P. 549–556.
 21. *Hanel G.* The properties of atmospheric aerosol particles as function of relative humidity at the thermodynamic equilibrium with surrounding moist air // *Adv. Geophys.* 1976. V. 19. P. 73–188.
 22. *Kasten F.* Visibility forecast in the phase of precondensation // *Tellus.* 1969. V. 21. № 3. P. 631–635.
 23. *Исаков А.А., Свириденков М.А., Сидоров В.Н.* О конденсационной трансформации индикатрисы рассеяния // *Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана.* 1983. Т. 19. № 12. С. 1321–1324.
 24. *Panchenko M.V., Terpugova S.A., Yausheva E.P., Kozlov V.S., Pol'kin V.V.* Spring variability of the parameter of aerosol condensation activity // *Proc. SPIE.* 1999. V. 3983. P. 42–48.
 25. *Лактионов А.Г.* Равновесная гетерогенная конденсация. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 160 с.
 26. *Любовцева Ю.С., Юдин Н.И., Мельников Н.В.* Исследование характеристик и процессов трансформации природного аэрозоля // *Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана.* 1981. Т. 17. № 7. С. 716–724.

M.V. Panchenko, M.A. Sviridenkov, S.A. Terpugova, V.S. Kozlov. **Active spectral nephelometry in the study of microphysical characteristics of submicron aerosol.**

The approach to investigation of the properties of submicron atmospheric aerosol called «the method of active spectral nephelometry» is described in this paper. The technique and results of spectral polarimetric investigation of submicron aerosol with controlled influence on its properties are expounded. Measurements were carried out by means of the instrumentation complex including the FAN nephelometer, the devices for humidification and heating of aerosol, and the block for cut-off of fine particles using the 4-stage diffusion battery. Solution of the inverse problem provided for obtaining the data on the size spectrum and the refractive index of aerosol particles. The estimates of the size dependence of hygroscopicity and volatility of aerosol particles are obtained. Measurements with the use of the diffusion cutter confirmed its calculated calibration function and the lower boundary of the retrieved size spectrum.