

А.А. Исаков, С.Л. Бегунов, С.А. Головятинский, А.В. Тихонов

СПЕКТРОПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАТУРНОГО АЭРОЗОЛЯ

Институт физики атмосферы РАН, Москва

Поступила в редакцию 3.03.99 г.

Принята к печати 31.03.99 г.

Описан автоматизированный спектрополяриметр для исследований природных и дымовых аэрозолей, позволяющий регистрировать индикатрису рассеяния и степень линейной поляризации рассеянного света на углах рассеяния $\varphi = 45, 90$ и 135° в диапазоне длин волн $\lambda = 0,4 \div 0,75$ мкм с квазинепрерывной разверткой по спектру. Приводятся примеры результатов, полученных в условиях высокой прозрачности атмосферы (метеорологическая дальность видимости $S_m = 30$ км) и туманной дымки ($S_m = 5$ км). По этим оптическим характеристикам решена обратная задача – восстановлены распределения объемов частиц по размерам и оценены величины комплексного показателя преломления вещества частиц и зависимость от радиуса конденсационной активности частиц.

Введение

Длительный опыт эксплуатации нефелометров и поляриметров для исследований атмосферных аэрозолей позволяет выделить несколько этапов, определивших формирование нынешних методик измерений и приборного парка. На рубеже 60–70 гг. шло интенсивное накопление экспериментального материала по закономерностям изменчивости рассеяния света атмосферным аэрозолем, при этом преобладало направление, когда приборы работали на одной длине световой волны (обычно $\lambda \approx 0,5$ мкм, которая фигурировала в первых моделях атмосферной оптики) и авторы стремились возможно подробнее регистрировать зависимости от угла φ компонент матрицы рассеяния света аэрозолями $D_{ik}(\varphi)$ [1]. Спектральные зависимости регистрировались лишь для коэффициентов ослабления света $\varepsilon(\lambda)$ на приземных и наклонных трассах, поскольку знание закономерностей его вариаций требовалось для решения многих прикладных задач. Громоздкость первых спектрополяриметров и трудоемкость измерений побуждали многих исследователей создавать более компактные и простые приборы, регистрирующие лишь индикатрису рассеяния D_{11} или ее поляризационные компоненты [2].

Статистический анализ больших массивов данных [1,12] показал, что с точностью до ошибок измерений угловые зависимости матриц могут быть представлены с помощью 2–5 ее значений, измеренных на характерных углах. Это позволило отказаться от громоздких сканеров и перейти к схеме приборов с несколькими синхронно работающими фотометрами [3], что, в свою очередь, заметно сократило время измерений.

Примерно в это же время появилась идея решения обратной задачи – восстановления микрофизических характеристик аэрозоля по его матрице рассеяния света, наиболее полно сформулированная Г.В. Розенбергом [4]. Им впервые была четко поставлена задача одновременного независимого определения как параметров распределения частиц аэрозоля по размерам, так и действительной и мнимой частей показателя преломления вещества частиц, показано, что для ее решения существенно необходимы сведения о спектральных

зависимостях компонент матрицы рассеяния, поскольку одноволновые измерения несут информацию о распределении частиц в узком диапазоне их размеров.

Параллельно с развитием вычислительной техники шло накопление модельных расчетов и достаточно удобных для анализа таблиц по светорассеянию [5]. Вместе с приближенными расчетами для так называемых «мягких» частиц, т.е. частиц с показателем преломления n , близким к единице, анализ таблиц указал на неустраиваемый с точки зрения решения обратной задачи дефект измерений лишь индикатрисы рассеяния D_{11} – ее зависимость от угла рассеяния φ определяется произведением относительного размера частицы $\rho = 2\pi a/\lambda$ (здесь a – радиус частицы) на величину $(n-1)^{\alpha(\varphi)}$. Зависимость показателя $\alpha(\varphi)$ от угла рассеяния достаточно слабая, для $\varphi = 45^\circ$ $\alpha \approx 0,5$. Иначе говоря, по угловой зависимости D_{11} определять независимо размер частицы и ее показатель преломления затруднительно. В меньшей степени это относится ко второй компоненте матрицы рассеяния – степени линейной поляризации рассеянного света f_{21} , поскольку поляризационные компоненты индикатрисы имеют разную чувствительность к изменениям ρ и n . Очень полезным было бы измерение компоненты f_{43} матрицы рассеяния, т.е. степени эллиптичности поляризации, но для таких измерений требуется существенное усложнение прибора и, что весьма немаловажно, сужается его спектральный диапазон, поскольку четвертьволновая пластинка, являющаяся неотъемлемым элементом методики, сохраняет свои свойства лишь в узком диапазоне спектра.

Таким образом сформировались направления оптимизации аппаратуры: в конструкции прибора должны быть реализованы 2–4 характерных угла рассеяния, 3–4 рабочие длины волны, измеряемые величины – индикатриса и степень линейной поляризации. В качестве примера приведем серийно выпускавшийся прибор ФАН, после надлежащей доработки успешно использовавшийся в Институте оптики атмосферы СО РАН для наземных измерений и в составе комплекса аппаратуры самолета-лаборатории [13].

Эти соображения легли в основу методики измерений четырехволнового спектрополяриметра, послужившего

прототипом описываемому ниже прибору. Опыт его эксплуатации, в особенности во время комплексного дымового эксперимента, проводившегося в рамках программы «ядерная зима» [6], отчетливо показал, что в ряде случаев наблюдался аномальный спектральный ход оптических характеристик аэрозоля. Для исследований подобных аномалий полезна более подробная спектральная развертка зависимостей D_{ik} . В 1988 г. был создан макет такого прибора с осветителем на базе призмного монохроматора [7], на котором была отработана методика измерений, реализованная в описываемом ниже приборе. В рамках предлагаемой статьи основное внимание сознательно сосредотачивается на методических вопросах и для анализа возможностей спектрополяриметрии в исследовании микрофизики аэрозоля из полученного в течение четырех месяцев (май – сентябрь 1993 г.) массива данных выбирается несколько примеров записей. Дальнейший, с применением намеченных алгоритмов, анализ ансамбля результатов, в том числе и статистический, станет основой последующей работы.

Описание прибора

Компоновка прибора аналогична [6]. Осветитель прибора собран на базе монохроматора МСД-1. В пользу такого выбора говорят его небольшие габариты и высокая светосила (его относительное отверстие 1:3,5). Источником света служит лампа накаливания типа КГМ, ее поток параболеским зеркалом фокусируется на входную щель монохроматора. Спектральное разрешение прибора при полностью открытых щелях около 15 нм. Гашение лишних порядков осуществляется с помощью обрезного желтого светофильтра ЖС10, включаемого с помощью соленоида в процессе сканирования по команде ЭВМ. Пучок осветителя имеет двойную модуляцию – по интенсивности на частоте около 1000 Гц и по положению плоскости поляризации – с частотой около 15 Гц. Модуляция по амплитуде с последующим синхронным детектированием повышает защищенность прибора от подсветок через воздухозаборник, поляризационная позволяет сравнительно просто регистрировать вторую компоненту матрицы рассеяния – степень линейной поляризации рассеянного света. Выходная линза, установленная так, что щель монохроматора находится в ее фокусе, формирует квазипараллельный пучок диаметром около 3 см. Поляризационный модулятор представляет собой вращаемый с частотой около 15 Гц поляризатор с датчиком положения. Схема регистрации поляризации аналогична описанной в [6]. Датчик формирует две последовательности коротких стробов, одна привязана к моментам времени, когда плоскость поляризации поляроида параллельна, вторая – перпендикулярна плоскости рассеяния в поляриметре. Управляемые стробами ключи фиксируют интенсивности рассеянного света при двух взаимно перпендикулярных положениях поляроида, как это требуется для классического определения степени линейной поляризации.

Вдоль вертикальной оси рабочей камеры проходит поток заборного воздуха, плоскость рассеяния горизонтальна. Три идентичных фотометра на основе фотомножителей ФЭУ-79 установлены на углы рассеяния $\varphi = 45, 90$ и 135° . Поляриметр оборудован низкотемпературным нагревателем заборного воздуха для исследования так называемой конденсационной активности атмосферного аэрозоля. Он подогревает аэрозоль на входе в камеру на $15\text{--}20^\circ\text{C}$, при этом относительная влажность воздуха в камере уменьшается вплоть до $Rh \approx 15\text{--}20\%$ и прибор регистриру-

ет рассеяние на сухой основе частиц. Датчики температуры контролируют ее на входе в воздухозаборник и на выходе нагревателя, так что, зная абсолютную влажность заборного воздуха, легко по перепаду температур ΔT вычислить и соответствующий перепад относительной влажности ΔRh .

Оперативная калибровка прибора по эталонному рассеивателю также аналогична [6]. По команде ЭВМ этот рассеиватель (фторопластовый экран) вводится в поля зрения фотометров. Во время абсолютной калибровки прибора его сигнал привязывается к калибровочным константам и в дальнейшем служит оперативным вторичным эталоном. Одновременно этот эталонный рассеиватель позволил провести и поляризационную градуировку прибора. Дело в том, что решеточные монохроматоры частично поляризуют проходящее излучение, причем степень этой поляризации δ сильно (от ≈ 5 до 50%) меняется от экземпляра к экземпляру. Поэтому на выходе поляризационного модулятора в зависимости от угла поворота поляроида θ интенсивность пучка I_1 будет меняться по закону

$$I_1 = I_0 [1 + \delta(1 - \sin\theta)]. \quad (1)$$

Интенсивность пучка I_1 меняется синхронно с поворотом поляроида, причем амплитуда изменений зависит от степени собственной поляризации монохроматора δ , которая, в свою очередь, обусловлена длиной световой волны. Таким образом, для измерений степени поляризации рассеянного света необходимо, по крайней мере, знать I_1 в моменты времени, когда плоскость поляризации поляроида параллельна и перпендикулярна плоскости рассеяния, т.е. в моменты появления стробов поляризационного модулятора. Это обстоятельство позволило использовать для поляризационной градуировки прибора тот же эталонный рассеиватель, что и при калибровке чувствительности. Фторопластовый экран не чувствителен к состоянию поляризации облучающего пучка, и прошедший через него свет пропорционален I_1 . Прописав для экрана в обычном режиме регистрации спектральную зависимость интенсивностей перпендикулярной $I_1(\lambda, \varphi)$ и параллельной $I_2(\lambda, \varphi)$ плоскости рассеяния для всех трех фотометров, получаем средство для поляризационной градуировки.

Юстировка датчиков поляризационного модулятора выполняется по часто используемой методике – пучок осветителя при снятой светоловушке на выходе камеры отражается помещенной на специальном столике с угломером плоскопараллельной стеклянной пластинкой, установленной на угол Брюстера, генерация импульса датчика привязывается к полному гашению отраженного пучка осветителя.

Спектральная градуировка прибора выполняется с помощью эталонного отражающего экрана с напыленным слоем окиси магния. По аналогии с поляризационной градуировкой для эталонного экрана прописываются сигналы $F_1(\lambda, \varphi)$ и $F_2(\lambda, \varphi)$.

Абсолютная калибровка проводится по методу, описанному в [6]. В комплект прибора входит труба-насадка для исследования дымовых аэрозолей. Она монтируется на рабочей камере так, что ее продольная ось совпадает с осью светового пучка. При работе с дымовыми аэрозолями камера и труба заполняются исследуемым дымом. На глухом конце насадки смонтирован фотоприемник, регистрирующий интенсивность I_1 в чистой камере и интенсивность I_2 прошедшего через дым и соответственно ослабленного им пучка осветителя, по степени ослабления определяется коэффициент экстинкции дыма τ :

$$\tau = \ln(I_1/I_2). \quad (2)$$

В качестве образцового рассеивателя используются так же, как и в [6], пары канифоли, поскольку для них с помощью модельных расчетов легко определить через коэффициент рассеяния $\sigma = \tau/L$ (L – длина трассы в дыме) значение индикатрисы рассеяния D для калибровочного дыма. В результате получаются калибровочные функции $K(\lambda, \varphi)$. Окончательную формулу для определения индикатрисы рассеяния D_{11} и степени поляризации f_{21} исследуемого аэрозоля по измеренным сигналам $I_{1,2}^r$ запишем в виде

$$D_{1,2}^r(\lambda, \varphi) = I_{1,2}^r(\lambda, \varphi) K(\lambda, \varphi) / [I_{1,2}(\lambda, \varphi) F_{1,2}(\lambda, \varphi)],$$

$$D_{11}(\lambda, \varphi) = D_1^r + D_2^r, \quad (3)$$

$$f_{21}(\lambda, \varphi) = (D_1^r - D_2^r) / D_{11}.$$

На интерфейс ЭВМ поступают шесть аналоговых сигналов с трех фотометров и два с датчиков температуры (заборного воздуха и на входе в рабочую камеру прибора), с него на блок управления исполнительными механизмами подаются сигналы включения и выключения затвора, обрезного фильтра, фторопластового экрана, нейтрального ослабителя и низкотемпературного нагревателя.

Последовательность операций при работе прибора следующая. В подготовительный цикл входят запись нулевых отсчетов при закрытом затворе и запись сигнала от фторопластового экрана, рабочий включает запись рассеяния на заборном аэрозоле при выключенном и включенном нагревателях. Спектральный диапазон прибора $\Delta\lambda = 0,4 \div 0,75$ мкм, шаг по длине волны выбирается в зависимости от конкретной ситуации и может изменяться управляющей программой в пределах $\delta\lambda = 5 \div 50$ нм, время записи двух сканов в зависимости от шага меняется от 1 до 5 мин.

Обсуждение результатов

Выше отмечалось, что достаточно гибкая программа управления прибором позволяет регистрировать спектральные зависимости компонент матрицы рассеяния в различных режимах – от подробной развертки произвольного участка спектра до оперативной регистрации на нескольких выбранных длинах волн в пределах всего спектрального интервала. Последний вариант является оптимальным, когда исследуется временная изменчивость оптических и микрофизических характеристик аэрозоля и прибор работает в режиме экспедиционных наблюдений. Опыт эксплуатации прототипа спектрополяриметра показал [7], что для восстановления распределения частиц аэрозоля по размерам и оценки показателя преломления вещества частиц достаточно поляризационные компоненты индикатрисы рассеяния D_{11} для трех углов рассеяния измерить на 4–7 длинах волн. Алгоритм обратной задачи описан в [7]. Напомним, что для него рассчитывалось не одно ядро, а сетка ядер с разными значениями действительной и мнимой частей показателя преломления, искомым n и χ оценивались перебором всех полученных величин по минимальной невязке. Сетка из 45 ядер рассчитана в диапазоне изменения действительной части показателя преломления $n = 1,35 \div 1,59$ с шагом 0,03, мнимой $\chi = 0,0 \div 0,05$ с шагом 0,01.

Алгоритм обратной задачи был проверен с помощью замкнутого математического эксперимента, в ходе которого был оценен и диапазон размеров частиц, информацию о которых содержат матрицы рассеяния, полученные в диапазоне длин волн 0,4–0,75 мкм. Он составил $r \approx 0,05 \div 3,0$ мкм. Ошибки восстановления заметно зависели от степени обводненности частиц – от 3% для туманных дымок до 10% и более для сухой основы. Для унификации измерений в таком режиме весь диапазон длин волн был разбит на семь равных интервалов с шагом $\Delta\lambda = 50$ нм.

На рис. 1 приведены некоторые результаты, полученные с помощью спектрополяриметра для летнего (май – начало сентября) сезона 1993 г. Представлены спектральные зависимости индикатрисы рассеяния для угла $\varphi = 45^\circ$ и степени линейной поляризации для $\varphi = 45^\circ$ и 90° в условиях при плотной туманной дымке (рис. 1, б, $S_m \approx 5$ км, $Rh \approx 98\%$), и высокой (рис. 1, а, дальность видимости $S_m \approx 30$ км, относительная влажность воздуха $Rh = 70\%$) прозрачности (1), т.е. в ситуациях, близких к крайним.

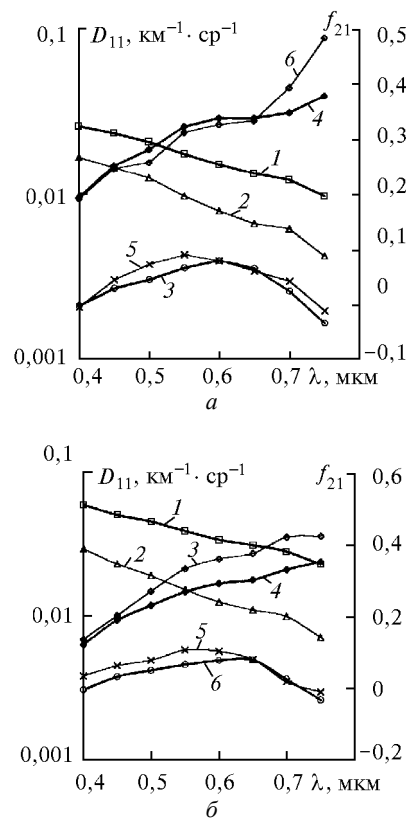


Рис. 1. Спектральные зависимости индикатрисы рассеяния $D_{11}(\varphi = 45^\circ)$ (кривые 1, 2) и степени линейной поляризации f_{21} для углов 45° (3, 5) и 90° (4, 6) для увлажненного (жирные кривые) и осушенного (тонкие линии) аэрозоля дымки: а – метеорологическая дальность видимости $S_m = 30$ км, относительная влажность воздуха $Rh = 70\%$; б – метеорологическая дальность видимости $S_m = 5$ км, относительная влажность воздуха $Rh = 98\%$

К числу недостатков приборов с закрытыми рабочими камерами и забором исследуемого аэрозоля следует отнести его небольшой подогрев в процессе забора. Степень этого подогрева зависит от скорости промоса воздуха и разности температур in situ и рабочей камеры и составляет

обычно $\Delta T = 0,5 \pm 1^\circ$. Эти искажения заметны лишь при очень высокой относительной влажности воздуха ($Rh \approx 100\%$) и практически не сказываются при $Rh < 70\%$. В процессе осушки аэрозоля нагревом изменения спектральных зависимостей его оптических характеристик определяются двумя часто конкурирующими процессами: увеличением эффективного показателя преломления вещества частиц и уменьшением их размеров. Оба эти процесса зависят от химического состава частиц и их результат несет информацию об этом составе.

Подбор регистрограмм призван был проиллюстрировать в том числе и неоднозначность влияния процесса осушки аэрозоля на его оптику. Кривые 1, 3, 4 соответствуют аэрозолю *in situ*, 2, 5, 6 – осушенному с помощью нагревателя. При анализе результатов естественно акцентировать внимание на особенностях оптических характеристик, выявляемых именно с помощью подробной записи по спектру. Оптику аэрозоля в видимой области спектра (вблизи $\lambda \approx 0,5$ мкм) в основном определяет средняя субмикронная фракция, хорошо описываемая логнормальным распределением частиц по размерам. С продвижением по спектру в красную область относительная роль ее уменьшается, поскольку все большее значение приобретает рассеяние на грубодисперсной фракции, на один–три порядка уступающей субмикронной по счетной концентрации, но примерно в таком же соотношении превосходящей ее по размерам, что неизбежно должно проявиться в характере спектрального хода оптических характеристик. С увеличением относительной влажности воздуха за счет конденсационного роста ее частиц роль субмикронной фракции заметно возрастает.

Для модельных кривых индикатриса монотонно спадает, а степень линейной поляризации монотонно растет для обоих углов рассеяния. Именно по отклонению от модельного хода можно говорить о том, что, начиная с этой области длин волн, определяющая роль переходит к грубодисперсной фракции. Характер кривых рис. 1,б качественно согласуется с поведением модельных: $D_{11}(45^\circ)$ и $f_{21}(90^\circ)$ как сухого, так и влажного аэрозоля изменяются монотонно, лишь степень линейной поляризации $f_{21}(45^\circ)$ при $\lambda > 0,7$ мкм отклоняется от модельного хода. Характер реакции поляризационных кривых на обезвоживание частиц говорит о превалировании уменьшения их размера над влиянием показателя преломления. На рис. 1,а отклонения от модельного хода проявляются даже на зависимостях D_{11} для $\lambda \approx 0,7$ мкм, а на поляризационных кривых еще раньше – при $\lambda \approx 0,55$ мкм. Реакция на осушение частиц у поляризационных кривых f_{21} почти отсутствует (в то время как для индикатрисы она достаточно велика), т.е. уменьшение размеров частиц компенсируется ростом показателя преломления.

На основе натуральных измерений матриц рассеяния света в ИФА была построена [8] оптическая модель атмосферного аэрозоля, а в [9] с помощью ее обращения – микрофизическая. Матрицы регистрировались на одной длине волны $\lambda = 0,55$ мкм, применимость ее для других областей спектра в свете только что сказанного требует проверки и уточнения. Для ультрафиолетовой области модель уточнялась в [10], где было показано, что микрофизическую модель [9] необходимо дополнить грубодисперсной фракцией частиц. Эту задачу для красной и ближайшей ИК-областей спектра позволяет решить описанный спектрополяриметр.

Для данных рис. 1 была решена обратная задача – оценены показатель преломления вещества частиц и восстановлены распределения частиц по размерам. В форме

зависимостей объема частиц от размера (такое представление позволяет нагляднее проиллюстрировать фракционную структуру аэрозоля) эти распределения показаны на рис. 2. В условиях высокой дальности видимости распределение (кривая 3) отчетливо разделяется на субмикронную и грубодисперсную, их разделяет глубокий минимум в области радиусов $r \approx 0,8$ мкм, но в целом в диапазоне $r = 0,2 \div 0,8$ работает обратнотепенной закон распределения. С ростом частиц под влиянием увеличения относительной влажности воздуха (кривая 1) происходит смещение субмикронной фракции в сторону больших размеров, при этом разделяющий фракции минимум замывается и в диапазоне $r = 0,2 - 1$ мкм распределение хорошо описывается обратнотепенным законом (более пологим, т.е. с меньшим показателем степени) при доминировании во всем этом диапазоне размеров более гигроскопичных субмикронных частиц. Значение действительной части показателя преломления для кривых 3, 1 составляют $n = 1,44$ и $1,35$, что вполне соответствует физике конденсационного процесса. Кривые 4, 2 относятся к сухой основе аэрозоля (показатели преломления $n = 1,5$ и $1,47$ соответственно). Отчетливо видно, что с уменьшением относительной влажности воздуха как *in situ*, так и при осушке наблюдается одна и та же тенденция – растет крутизна спада распределения и грубодисперсная мода прорисовывается более отчетливо, величина показателя преломления заметно возрастает. Мнимая часть показателя преломления в обоих случаях оказалась близкой к нулю (менее 0,01).

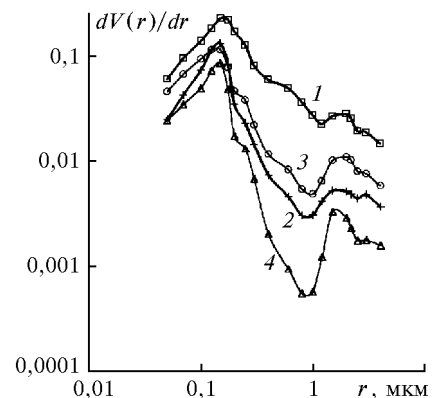


Рис. 2. Примеры восстановленных по кривым рис. 1 распределений объемов частиц по размерам: кривые 1, 3 – увлажненный аэрозоль, показатели преломления $n = 1,35$ и $1,44$ соответственно; 2, 4 – осушенный аэрозоль, $n = 1,47$ и $1,5$ соответственно

Наличие одновременно полученных распределений $V_{Rh}(r)$ для увлажненного аэрозоля и $V_d(r)$ сухой его основы позволяет рассмотреть вопрос о зависимости конденсационной активности частиц от их размера. Для этого использовалась методика, аналогичная предложенной А.Г. Лактионовым [11]. Вариации плотности распределения частиц по размерам $n(r)$ при изменениях относительной влажности воздуха эквивалентны изменениям масштаба оси радиусов по закону $r' = H(r)$ при сохранении интегральной счетной концентрации

$$N = \int_a^b n(r) dr = N' = \int_{h(a)}^{h(b)} n(h) dh. \quad (4)$$

В ходе конденсационной трансформации частицы переходят из диапазона размеров $[a, b]$ в диапазон

$[h(a), h(b)]$. Рассматривая N и N' как функцию верхнего предела интегрирования, можно из условия $N = N'$ отыскать зависимость $h(r)$, определенную в [11] как конденсационную активность частиц. Ошибку, связанную с неопределенностью нижнего предела интегрирования, можно обойти, интегрируя $n(r)$ от больших радиусов к меньшим, при этом круто растущие N и N' (рис. 3,а) очень быстро «забудут» начальные условия. Задача сводится к отысканию верхнего предела интеграла $r' = h(r)$ по его значению из условия $N = N'$. Для экспериментальных зависимостей $n(r)$ 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), то нахождение $h(r)$ не составляет труда.

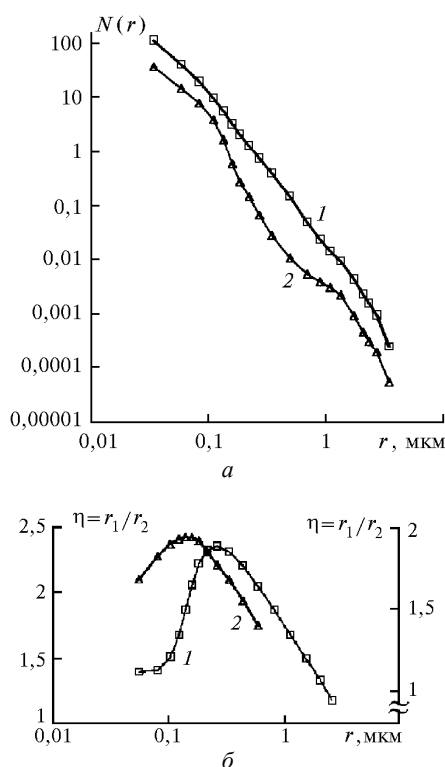


Рис. 3. Интегральная счетная концентрация частиц $N(r)$ для туманной дымки (рис. 1,б) для увлажненного (1) аэрозоля и его сухой основы (2) – а; зависимости от радиуса частиц r конденсационной активности η золя туманной дымки (рис. 1,б) кривая (1), левая ось ординат, и рассчитанной в работе [11] для модели континентального аэрозоля при относительной влажности воздуха $Rh = 95\%$, кривая (2), правая ось – б

На рис. 3,а представлены счетные концентрации N увлажненного аэрозоля и N' его сухой основы, полученные (без сглаживания) по распределениям 1, 2 рис. 2 (для туманной дымки при относительной влажности $Rh = 98\%$). Переход от $V(r)$ к $n(r)$ проведен делением $V(r)$ на r^3 . Полином четвертой степени аппроксимировал обе кривые в логарифмическом представлении со среднеквадратической ошибкой около 1%, заметно сглаживались лишь отдельные выбросы. Восстановленная конденсационная активность η в форме отношения радиусов увлажненной частицы r_1 к радиусу r_2 сухой $\eta = r_1/r_2$ приведена на рис. 3,б (кривая 1).

Кривая 2, заимствованная из монографии А.Г. Лактионова [11], иллюстрирует аналогичную величину η , рассчитанную им для модели III континентального аэрозоля и относительной влажности воздуха $Rh = 95\%$. Модель III характеризуется тем, что аэрозоль представляет собой смесь полностью растворимых и полностью нерастворимых частиц. По характеру зависимости кривые сходны, абсолютные величины в максимумах кривых с учетом того, что кривая 1 получена при $Rh \approx 97-98\%$, хорошо согласуются. Заметная разница наблюдается лишь в положении максимума на оси радиусов. Не вдаваясь в детали, отметим, что для других реализаций максимум наблюдался и для больших, вплоть до $r = 0,4 \div 0,5$ мкм, радиусов. Разумеется, не следовало рассчитывать на то, что столь разные методы оценки конденсационной активности дадут полностью совпадающие результаты.

Выводы

Создан спектрополяриметр для исследования натурных и дымовых аэрозолей, регистрирующий индикатрису рассеяния и степень линейной поляризации рассеянного света с квазинепрерывной разверткой по спектру в диапазоне длин волн $\lambda = 0,4 \div 0,75$ мкм, на котором выполнен цикл измерений.

Спектральные зависимости оптических характеристик натурального аэрозоля в красной области спектра во многих ситуациях не могут быть описаны с помощью модели одновершинного распределения, поэтому для распространения оптической и микрофизической моделей аэрозоля ИФА в красную область спектра необходимо ее серьезное дополнение.

Показано, что информационные возможности прибора позволяют сделать комплексную постановку обратной задачи – восстановления распределения частиц по размерам и их показателя преломления. Приведены примеры такого решения для обводненного аэрозоля и его сухой основы в двух различных (высокая прозрачность и плотная туманная дымка) атмосферных ситуациях.

В интервале радиусов $R = 0,2 \div 0,8$ мкм восстановленные распределения хорошо описываются обратностепенными законом, показатель степени с ростом относительной влажности воздуха уменьшается. В области размеров $r > 0,8$ мкм даже при $Rh \approx 100\%$ наблюдается вторая мода, при уменьшении относительной влажности ее вклад в суммарном объеме частиц заметно возрастает и в среднем превышает 50%.

По полученным распределениям частиц по размерам оценена величина конденсационной активности частиц. Зависимость ее от радиуса частицы имеет колоколообразный характер с максимумом в области $r = 0,3 \div 0,4$ мкм, этот результат хорошо согласуется с данными, полученными с помощью фотоэлектрических счетчиков.

В заключение авторы благодарят М.А. Свириденкова за полезные обсуждения.

1. Горчаков Г.И. Матрицы рассеяния света и типы оптической погоды // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1973. Т. 9. N 2. С. 204–210.
2. Ирсов А.Л., Панченко М.В. и др. Аппаратура и методика исследования угловых характеристик атмосферного воздуха // Рассеяние и рефракция оптических волн в атмосфере. Томск: ИОА СО АН СССР, 1976. С. 129–141.
3. Сидоров В.Н. Проточный поляризационный нефелометр // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1979. Т. 15. N 7. С. 763–768.
4. Розенберг Г.В. Определение микрофизических параметров аэрозоля по данным комплексных оптических измерений // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1976. Т. 12. N 11. С. 1159–1167.

5. Козлов В.С., Фадеев В.Я. Таблицы оптических характеристик светорассеяния мелкодисперсного аэрозоля с логнормальным распределением по размерам. Томск, 1981. 64 с. (Препринт / ИОА СОАН СССР, № 31).
6. Лукин В.В., Исаков А.А. Оптические характеристики дымовых аэрозолей // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1988. Т. 24. N 3. С. 250–257.
7. Исаков А.А. Некоторые результаты исследований оптических и микрофизических характеристик дымов // Оптика атмосферы и океана. 1999. Т. 12. № 1. С. 23–29.
8. Горчаков Г.И., Свириденков М.А. Статистическая модель оптических характеристик атмосферной дымки // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1979. Т. 15. N 1. С. 53–59.
9. Горчаков Г.И., Емиленко А.С., Свириденков М.А. Однопараметрическая модель приземного аэрозоля // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1981. Т. 17. N 1. С. 39–49.
10. Sviridenkov M.A. Aerosol size distributions retrieved from the spectral phase function measurements // Proceeding of the 3rd international congress on optical particle sizing 93-Yokohama, 1993. P. 243.
11. Лактионов А.Г. Равновесная гетерогенная конденсация. Л.: Гидрометеониздат, 1988. 160 с.
12. 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.
13. Панченко М.В., Тумаков А.Г., Терпугова С.А. Бортовая установка для исследования атмосферного аэрозоля с использованием термо- и гидрооптического метода // Аппаратура дистанционного зондирования параметров атмосферы. Томск: изд-е ТФ СО АН СССР. 1987. С. 40–46.

A.A. Isakov, S.L. Begunov, S.A. Golovyatinskii, A.V. Tikhonov. **Spectropolarimeter Investigations of the Atmospheric Aerosol.**

A spectropolarimeter for investigation of the natural and smoke aerosols is described. The instrument allows one to measure the phase function and linear polarization of scattered light at three angles 45°, 90°, 135° in spectral range of 0.4–0.75 μm. The instrument is supplied by low-temperature heater, which allows obtaining the scattering characteristics of dry aerosol fraction. Some results of measurements are presented. It is shown that the spectral dependence of the scattering matrix components in the red spectral range of ($\lambda > 0.65 \mu\text{m}$) can not be described by single modal particle size distribution. For some examples the inverse problem is solved and the complex refractive index and volume distributions for natural aerosol and dry particles are obtained. By means of these data, the condensation activity of the aerosol is investigated.