

А.А. Исаков

Оптические и микрофизические характеристики дымов лесных пожаров в Подмоскowie в июле–сентябре 2002 г.

Институт физики атмосферы РАН, г. Москва

Поступила в редакцию 24.01.2003 г.

Приводятся результаты исследований дымовых аэрозолей лесных и торфяных пожаров в Подмоскowie летом и осенью 2002 г. Измерения выполнялись на Звенигородской научной станции ИФА с помощью спектрополяриметра и нефелометра. Спектрополяриметр регистрирует поляризационные компоненты индикатрисы рассеяния света приземным аэрозолем на трех углах рассеяния $\varphi = 45, 90, 135^\circ$ в диапазоне длин волн $\lambda = 0,4 \pm 0,76$ мкм со спектральным разрешением $\Delta\lambda \approx 10$ нм. Низкотемпературный нагреватель заборного воздуха и контроль его температуры позволяют оценивать конденсационную активность аэрозоля. Спектрополяриметр обеспечивает информацию, достаточную для постановки комплексной обратной задачи – восстановления функции распределения частиц по размерам и оценки комплексного показателя преломления вещества частиц. Автоматизированный нефелометр круглосуточно раз в час регистрирует величину коэффициента направленного светорассеяния $D_{11}(\varphi = 45^\circ, \lambda = 0,54$ мкм) влажного аэрозоля и его сухой основы. В июле – сентябре 2002 г. зарегистрировано более 10 дымовых выносов, когда массовая концентрация субмикронного аэрозоля в 10–50 раз превосходила средний фоновый уровень. Для этих эпизодов восстановлены распределения объемов частиц по размерам и оценены величины комплексного показателя преломления вещества частиц. Дымы пожаров оказались близкими к исследованным ранее в лабораторных условиях дымам пиролиза по характерным размерам частиц и ширине их распределения, действительная часть показателя преломления у природных дымов оказалась заметно ниже ($n \sim 1,4 \pm 1,5$). Мнимая часть показателя преломления во всех случаях получилась меньше предела разрешения, т.е. $< 0,005$. В отличие от лабораторных дымов конденсационная активность (параметр Хенела) природных дымов оказалась высокой, менялась в диапазоне 0,15–0,3, что, скорее, соответствует летнему натурному аэрозолю. В ряде мощных выносов 6 – 10.09 и 17.09 распределение объемов частиц по размерам получилось двухмодовым, характерный размер более крупной моды $r = 0,3 \pm 0,4$ мкм. Для ряда дымов кривая фактора конденсационного роста получилась двухвершинной с максимумами $r \sim 0,2$ и $0,6–0,8$ мкм.

Введение

Аномально сухое и жаркое лето 2002 г. в Центральном регионе России и связанные с ним интенсивные лесные пожары в очередной раз напомнили о важности исследований по проблемам экологической безопасности, в том числе и для того, чтобы ослабить негативное влияние на население страны спекуляций на подобные темы в средствах массовой информации. Во время уже изрядно подзабытых пожаров в Подмоскowie летом 1972 г. современные подходы к исследованию малых составляющих атмосферы только начинали формироваться и приборный парк по многим причинам не соответствовал нынешним воззрениям на организацию наблюдений, поэтому дымы 1972 г. оказались изучены лишь фрагментарно.

Серьезным толчком к исследованию дымовых аэрозолей как климатообразующего и экологического факторов стали комплексные дымовые эксперименты в ИОА СО РАН и в ИФА РАН. В последние годы в ИФА РАН в ряде лабораторий ведутся наблюдения малых составляющих атмосферы по принципу мониторинга, в результате дымы лета 2002 г. коллективными усилиями (в том числе с привлечением сотрудников других институтов [1]) удалось достаточно обстоятельно исследовать. Это-

му способствовали и благоприятные для исследований условия – многочисленность мощных дымовых выносов в районе Звенигородской научной станции (ЗНС), частые случаи антициклональной солнечной погоды, обеспечившей возможность наблюдений в толще атмосферы, и т.д. В результате удалось комплексно исследовать около десятка интенсивных дымовых выносов и в Звенигороде, и в Москве [1].

Предлагаемая статья посвящена конкретному аспекту этой работы – исследованию оптики и микрофизики аэрозоля дымовых выносов с помощью созданных в ИФА спектрополяриметра и нефелометров. Эксперименты ИФА 1985–1988 гг. были выполнены в рамках программы «ядерная зима», и характер дымов диктовался условиями задачи. Некоторые результаты были опубликованы в работах [2–7]. В [3] была предложена классификация исследовавшихся дымов, основанная в первую очередь на анализе их оптических характеристик. Все дымы были разбиты на три основные группы: слабопоглощающие, грубо- и мелкодисперсные и сильнопоглощающие. К первой группе относятся почти все дымы пиролиза (тления). Вторая группа – в основном дымы горения древесины, торфа и т.д., третья – нефтяные, резиновые дымы горения («черные или коптящие»).

Обширные исследования дымов в специальной камере были выполнены в ИОА СО РАН [8, 9, 20]. Были тщательно изучены оптические характеристики дымов, в том числе и средствами термооптики, различных режимов горения и по ним проведена классификация дымов, в основных чертах согласующаяся с выводами [3]. Оценка конденсационной активности (параметр Хенела χ) показала, что χ для дымов пиролиза весьма низкий, $< 0,05$. Иначе говоря, в лабораторных условиях реализовались практически гидрофобные дымы. В [20] приведены некоторые результаты недавних лабораторных исследований дымов с помощью спектрополяриметра нового поколения, идеологически и методически близкого к спектрополяриметру ИФА. Кроме того, сообщались результаты лабораторных исследований дымов пиролиза, в частности приведены распределения объемов частиц по размерам, по основным параметрам очень близкие к таковым в [15].

Методика и аппаратура

Напомним коротко основные характеристики приборов. Спектрополяриметр регистрирует поляризационные компоненты индикатрисы рассеяния света приземным аэрозолем на трех углах рассеяния $\varphi = 45, 90, 135^\circ$ 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 прокачки воздуха 0,5 м/с и цифровом осреднении порядка секунды около 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 информацию, достаточную для постановки комплексной обратной задачи: восстановления функции распределения частиц по размерам (наиболее наглядным представлением является распределение объемов частиц $dV(r)/dr$) и оценки действительной и мнимой частей показателя преломления вещества частиц. Длительность цикла измерений на спектрополяриметре около 15 мин, он работал обычно в светлое время суток. В зависимости от развития ситуации во время дымовых выносов за день получалось до 15 регистрограмм. Автоматизированный нефелометр один раз в час круглосуточно регистрировал величину коэффициента направленного светорассеяния на длине волны $\lambda = 0,54$ мкм и угле рассеяния $\varphi = 45^\circ$ для влажного и осушенного аэрозоля. Эта величина позволяет определить массовую концентрацию субмикронного аэрозоля M [12, 13]. С начала сентября были возобновлены измерения с помощью автоматизированного нефелометра, аналогичного звенигородскому, на метеообсерватории географического факультета МГУ на Воробьевых горах.

В связи с тем что уже несколько лет ИФА участвует в программах, имеющих характер мониторинга,

актуальным стал вопрос поверки приборов и методик, разрабатываемых в институте. Поскольку в большинстве своем эти приборы и методики уникальны (т.е. отсутствуют образцы, которые можно было бы рассматривать в качестве эталона), частичным решением проблемы может быть калибровка одной-двух базовых характеристик прибора сравнением их тем или иным способом с характеристиками сходного аттестованного прибора. Именно так по серийно выпускавшемуся прибору ФАН были откалиброваны показания нефелометров и спектрополяриметра на длине волны $\lambda = 0,52$ мкм и угле $\varphi = 45^\circ$. Длительность цикла совместных измерений была около 1 мес, диапазон вариаций измеряемых величин $D = 0,003-0,3$ км⁻¹·ср⁻¹, стандартное отклонение от рассчитанной по полученным данным регрессионной прямой составило 3%. В сущности, это предельная точность, которую можно ожидать при синхронных измерениях на двух нефелометрах. Более высокой точности не позволяет достичь пространственно-временная неоднородность аэрозоля. Спектральная калибровка спектрополяриметра выполнена по хорошо известному эталону — экрану со свежим напылением толстого слоя окиси магния.

Методика решения обратной задачи для оптических характеристик, применяемая в предлагаемой работе, формировалась постепенно, и ее различные аспекты описывались в работах [14, 15, 21]. В процессе измерений для каждой реализации получается набор 120 чисел (20 длин волн и 6 поляризационных компонент). Для удобства решения обратной задачи методом наименьших квадратов для каждой поляризационной компоненты строилась сглаженная кривая — 8 точек в диапазоне $\lambda = 0,4 \div 0,75$ мкм с шагом 0,05 мкм. Избыточное количество входных данных приводит лишь к «разбалтыванию» решения [19], и окончательно вектор входных данных был представлен только 24 информативными компонентами.

Особой проблемой обратной задачи является вопрос об ошибках восстановления решения. *В большинстве случаев погрешности измерений всегда являются комбинацией шумовых отклонений и жестко коррелированных ошибок калибровки приборов, причем относительные их вклады (по крайней мере, для оптических исследований атмосферы) зависят от конкретной ситуации и практически неразделимы. Поэтому даже при оптимальной ситуации (точности измерений 5–10%) вряд ли можно рассчитывать на точность восстановления распределения даже в области размеров $r \sim 0,2-0,5$ мкм лучше чем 15–20%, и указать ошибку для конкретной реализации невозможно.*

Зависимость информативности входных данных от размера частиц определяется произведением медленно меняющейся чувствительности ядра уравнения на быстро спадающее искомое распределение, причем скорость спада может сильно меняться (от 3 до 5 порядков на декаду размера). Другими словами, область определения решения для одного и того же прибора может в зависимости от конкретной ситуации меняться в 2–3 раза.

В процессе отладки методики обращения автором был найден способ [13] автоматической

полуколичественной оценки границы r_{\max} для каждой ситуации, сводящийся к следующему. Необходимо так выбрать границы области определения, чтобы найденное решение на них стремилось к нулю. Разумеется, это означает отнюдь не то, что (применительно к аэрозолю) таких частиц нет, а то, что отсутствие во входных данных информации об этих частицах позволяет без ущерба для точности восстановления считать их концентрацию пренебрежимо малой. Для проверки этого условия на каждом шаге итерационная поправка домножается на функцию, равную единице почти во всем диапазоне определения за исключением областей, близких к его границам, где она плавно спадает до $\delta \sim 0,95$.

Таким образом, если в исходных данных нет заметного вклада частиц размерами, близкими к границе диапазона, полученное решение после 50 итераций будет демонстрировать явное стремление к нулю. Математическим экспериментом проверено, что в тех случаях, когда вклад больших частиц превышает шум, таким «силовым» способом устремить решение к нулю не удастся, иначе, если при использовании такой методики в распределении получаются заметные концентрации больших частиц, значит, они действительно присутствовали в рабочей камере прибора. Анализ большого числа полученных для разнообразных ситуаций конкретных восстановленных распределений показал, что в большинстве случаев вплоть до размера $r = 2$ мкм $dV(r)/dr$ решение не удается устремить к нулю, но его устойчивость при $r > 1,5$ мкм невелика, иначе такие частицы прибор видит, но информация о них сильно зашумлена. Попутно это подтверждает, что для обратной задачи важна не столько максимальная рабочая длина волны прибора, сколько статистическая обеспеченность числа больших частиц в рабочем объеме прибора за время осреднения (оцифровки).

В общих чертах схема решения задачи следующая. Сетка ядер интегрального уравнения рассчитывается для набора значений действительной и мнимой частей показателя преломления. Итерационным методом для каждого ядра решается обратная задача, и по минимальной невязке восстановленной оптики отыскиваются наиболее правдоподобные значения действительной и мнимой частей показателя преломления. Методика идеологически близка [16]. В процессе отработки схемы решения мы остановились на следующих параметрах: сетка состоит из $m \times k = 45$ ядер, m равно 9 значениям действительной части показателя преломления в диапазоне $n = 1,35 \div 1,59$ с шагом $\Delta n = 0,03$ на k , равном 5 значениям мнимой части в диапазоне $\kappa = 0 \div 0,02$ с шагом 0,005. Диапазон радиусов $r = 0,05 \div 2$ мкм (двадцать точек разбиения) с учетом вышеизложенного взят с небольшим запасом, на практике для основной массы данных восстановленные распределения ограничиваются размером $r = 1,5$ мкм.

Обсуждение результатов

Наблюдения за дымовыми выносами в Подмоскowie проводились на Звенигородской научной

станции ИФА РАН в период июль—сентябрь 2002 г. Расстояние от очагов до Звенигорода составляло ~ 100 – 200 км, и, учитывая малые скорости ветра в антициклоне, время жизни дымов на момент регистрации можно оценить примерно 24 ч и более. Это оказалось важным по двум причинам: во-первых, суток вполне хватило для достаточно хорошего перемешивания дымов, поэтому флуктуации сигналов при регистрации были вполне приемлемыми — 5–10%. Во-вторых, в результате конденсации паров аэрозолеобразующих соединений частицы дымов успели одеться «рубашкой» присущих обычному аэрозолю растворимых веществ, что отразилось на величинах показателя преломления вещества частиц и их конденсационной активности.

Еще в работе [18] было показано, что спектральные зависимости $D_{11}(\varphi = 45^\circ)$ натурального аэрозоля в диапазоне длин волн $0,4$ – $0,65$ мкм хорошо аппроксимируются обратностепенным законом (формулой Ангстрема) с показателем, называемым параметром Ангстрема α . Применимой эта аппроксимация оказалась и почти для всех случаев дымовых выносов. Только в самых мощных заносах 8–10.09 и 17.09 спектральные зависимости $D_{11}(\varphi = 45^\circ)$ оказались выпуклыми, т.е. область пригодности аппроксимации несколько сузилась. Вариации α оказались тесно связаны с $D_{11}(\varphi = 45^\circ)$. Коэффициент корреляции этих величин для всего периода составил $R = 0,7$, при этом параметр α для дымов изменялся в пределах $0,5$ – $1,7$. Крутой в ряде случаев спектральный ход D в первую очередь связан с узостью распределений частиц дымов по размерам.

В работе [15] приведены результаты восстановления микрофизических характеристик ряда дымов, исследовавшихся в конце 80-х гг. на ЗНС ИФА в ходе комплексных дымовых экспериментов в специальной дымовой камере. Дымы должны были имитировать пожары торфяников, лесные и городские. Считается, что в лесных и торфяных пожарах основным (с точки зрения генерации аэрозольной массы) механизмом дымообразования является пиролиз. Основные характеристики дымов пиролиза были [15] следующие: основная часть распределения хорошо аппроксимируется узким одномодальным логонормальным распределением с максимумом в области размеров $r \sim 0,2 \div 0,25$ мкм и дисперсией около 0,1, действительная часть показателя преломления $n \sim 1,6 \div 1,73$, мнимая часть близка к нулю. Надо сказать, что лесные пожары в Центральной России не такая уж и редкость. Дальнейший анализ результатов 2002 г. мы предварим разбором одного эпизода. В августе 1999 г. горели леса в Тверской области и 6 августа в Звенигороде был зафиксирован занос дыма, по мощности не уступающий первому июльскому 2002 г. Из-за своей кратковременности он не мог претендовать на репрезентативность и рассматривался как эпизод. Распределение $dV(r)/dr$ получилось одномодальным. Параметры аппроксимирующего логонормального распределения — $r = 0,19$ мкм, дисперсия 0,2, поглощение ниже минимально различимого, показатель преломления $n = 1,53$ в целом хорошо вписываются в схему [15].

Лето 2002 г. дало возможность исследовать длительное время дымы лесных пожаров *in situ* и сопоставить лабораторные и натурные исследования на большом объеме данных. На временной зависимости массовой концентрации аэрозоля в приземном слое, построенной по данным автоматизированного нефелометра (рис. 1), между наиболее мощными выносами видна целая серия промежуточных пиков, по амплитуде уступающих основным. Заметим, что часовая выборка не всегда отслеживала максимальные значения коэффициента направленного светорассеяния.

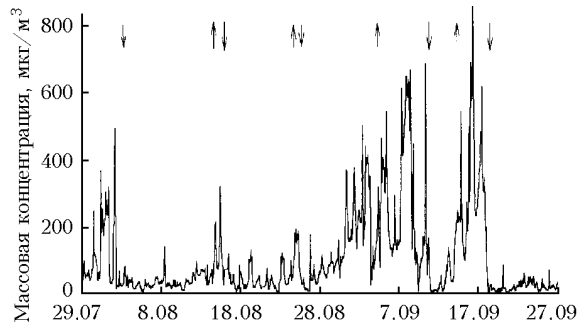


Рис. 1. Временная развертка величины массовой концентрации субмикронного аэрозоля 29.07–27.09 2002 г. Стрелки указывают моменты прохождения теплых (стрелка вверх) и холодных (стрелка вниз) циклонических фронтов

Изложенный в [21] первичный анализ данных был выполнен по горячим следам дымовых выносов, по этой причине анализировались наиболее мощные из них. Именно по эпизодам наиболее

сильных задымлений был сделан вывод о том, что вторая мода частиц появляется в наиболее интенсивных выносах, поскольку именно концентрация частиц наряду с размером определяет скорость броуновской коагуляции. Более подробный анализ всего периода 20.07–18.09.2002 побудил пересмотреть концепцию. Нет нужды доказывать, что вариации натурального аэрозоля в значительной степени управляются теплыми и холодными фронтами циклонов — прохождение фронта знаменует собой смену воздушной массы и соответственно аэрозоля. В значительной мере они определяли и режим задымления в Подмоскowie, причем не только направлением ветра от источника дыма. Моменты прохождения фронтов определялись по характеру изменения давления, направления ветра, типам облачности и т.д. Эпизоды сильных выносов обычно развивались по одной и той же схеме: теплый фронт циклона — пик задымления — холодный фронт — очищение воздуха. На рис. 1 моменты прохождения атмосферных фронтов показаны стрелками. В промежутке между наиболее мощными пиками уровень рассеяния в утренних максимумах D_{11} колебался в пределах $0,05 \div 0,12 \text{ км}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$; наблюдался отчетливый суточный ход массовой концентрации M , связанный с ночным накоплением дыма под приземной инверсией температуры и полуденным конвективным выносом, относительная влажность оставалась низкой.

Результаты восстановления микрофизических характеристик дымов лета 2002 г. приведены на рис. 2.

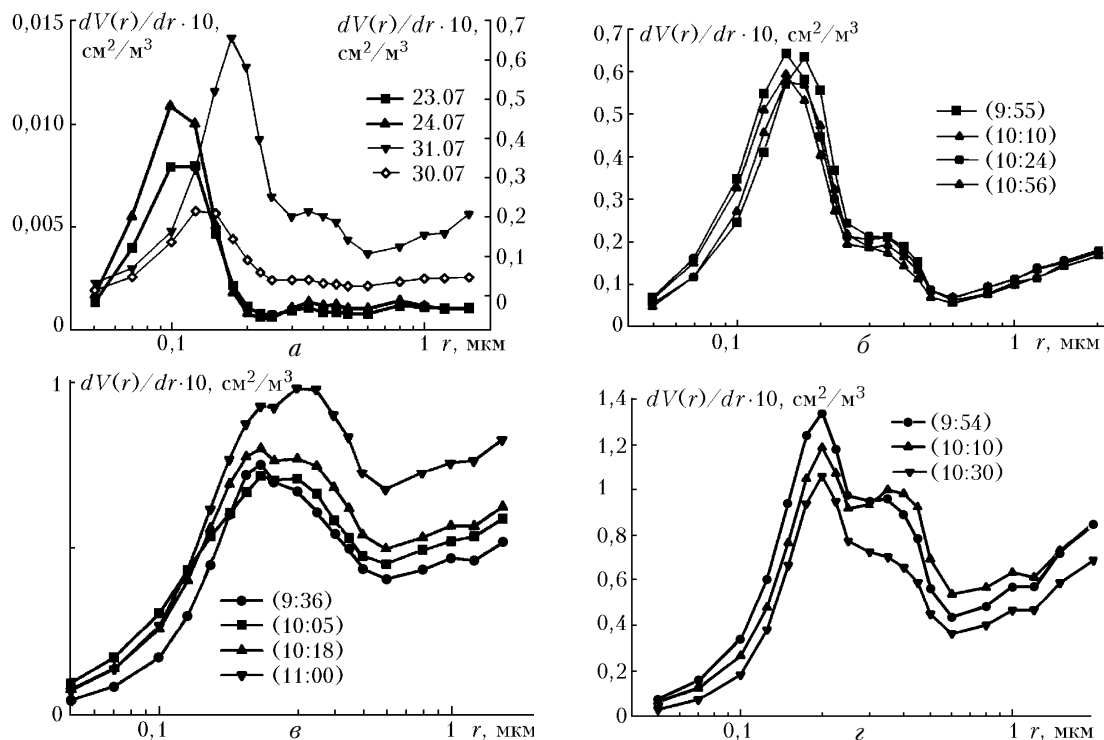


Рис. 2. Распределения объемов частиц по размерам $dV(r)/dr$, зарегистрированные в Звенигороде в июле — сентябре 2002 г. Одномодальные распределения: а — для ситуаций, близких к фоновым 23–24.07 (левая ось ординат), первого (30.07) и второго (31.07, правая ось ординат) выносов дымов лесных пожаров; б — распределения объемов частиц по размерам $dV(r)/dr$ для плотного дымового выноса 2.09. Бимодальные распределения: в — вынос 10.09; г — вынос 17.09. В скобках указано время регистрации соответствующей реализации, которое позволяет оценить характерные времена развития ситуаций

Если характеризовать картину сравнения в общих чертах (таблица), то необходимо отметить следующее.

Дата	$D_{\max}, \text{км}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$	$\langle \alpha \rangle$	Rh	$r_{\max}, \text{мкм}$	$\langle n \rangle$	П мода	$\langle \chi \rangle$
30.07	0,08	1,7	0,4	0,13	1,59	—	—
31.07	0,125	1,2	0,5	0,18	1,47	—	—
15.08	0,2	1,5	0,5	0,2	1,41	—	—
25.08	0,08	1,1	0,92	0,23	1,38	есть	0,2
30.08	0,1	1,2	0,6	0,18	1,47	—	—
01.09	0,05	1,5	0,4	0,18	1,47	—	—
02.09	0,16	1,3	0,7	0,2	1,47	—	—
03.09	0,11	1,35	0,8	0,15	1,47	—	0,17
04.09	0,09	1,5	0,6	0,15	1,53	—	0,2
05.09	0,17	1,15	0,55	0,18	1,47	—	—
06.09	0,12	0,7	0,84	0,18	1,41	есть	0,18
07.09	0,07	0,9	0,6	0,18	1,41	есть	0,1
08.09	0,24	0,9	0,8	0,18	1,41	есть	0,1
09.09	0,05	1,2	0,75	0,16	1,44	есть	0,32
10.09	0,45	0,6	0,8	0,22	1,41	есть	0,19
17.09	0,25	0,45	0,95	0,22	1,38	есть	0,17

Примечание. В таблице сведены основные характеристики аэрозоля дымовых выносов: величина коэффициента направленного светорассеяния $D(\varphi = 45^\circ, \lambda = 0,54 \text{ мкм})$ в пике задымления по измерениям на спектрополяриметре, среднее по нескольким реализациям значение параметра Ангстрема α , относительная влажность воздуха Rh на момент измерений, радиус максимума соответствующего распределения $dV(r)/dr$, показатель преломления подсушенного дыма n , наличие или отсутствие второго максимума на распределении и параметр Хенела для этой серии записей.

Для первого периода 30.07–5.09 близкими к лабораторным получились модальные радиусы и дисперсии аппроксимирующих логонормальных распределений и не отличимые от нуля значения мнимой части показателя преломления; действительная часть показателя преломления у натуральных дымов оказалась заметно меньше: $n = 1,4 \div 1,5$. На рис. 2,а приведены распределения объемов частиц по размерам $dV(r)/dr$ для двух дней, предшествующих первым выносам: 23–24.07 (левая ось ординат) – их можно рассматривать как фоновые, и первой серии выносов 30–31.07 (правая ось). При переходе от фона к дыму трансформация распределений происходит в первую очередь за счет увеличения медианного размера и сужения распределения. Для фоновой ситуации r_m равно 0,11, дисперсия 0,3. Для первого периода выносов дыма (за исключением 25.08), а это десять дней задымлений вплоть до 6.09, все распределения получились одномодальными, есть лишь намек на вторую моду (см. рис. 2,а,б).

Первый раз хорошо выраженная вторая мода распределения появляется 25.08 в теплом секторе циклона. Начиная с 6.09 она видна на всех распределениях $dV(r)/dr$ (рис. 2,в–з), иногда по амплитуде сравниваясь с первой. Положение ее максимума колеблется в диапазоне $r = 0,3 \div 0,4 \text{ мкм}$, иногда обе моды как бы сливаются в одну широкую. И наконец, последний эпизод 16–17.09 (см. рис. 2,з) и вновь в теплом секторе циклона с дождем. Напрашивается следующий вывод: факторами, по крайней мере сопутствующими появлению второй моды, были ситуации, когда Подмоскowie находилось в теплом

секторе циклона с дождями и высокой относительной влажностью воздуха.

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

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

где σ_0 – коэффициент рассеяния сухих частиц; χ интерпретируется как параметр конденсационной активности аэрозоля. При работе спектрополяриметра мы вынужденно используем для оценки χ «короткий» метод по двум значениям Rh . Если $D_{1,2}$ измерены при относительных влажностях $Rh_{1,2}$, то

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

Из-за засухи относительная влажность воздуха была обычно низкой, примерно 30–50%, поэтому χ получалась лишь для ситуаций, когда начальная влажность Rh превышала 60%. Нагреватель подогревал воздух примерно на 6–8 °С, поэтому в условиях летних высоких температур осушка аэрозоля была лишь частичной. По результатам комплексных исследований дымов в лабораторных условиях, выполненных в ИОА СО РАН [8, 9], был сделан вывод о низкой ($\chi < 0,05$) конденсационной активности дымов пиролиза. Напротив, думы лета 2002 г. (см. таблицу) получились достаточно гигроскопичными – величина параметра Хенела для них скорее соответствовала летнему натурному аэрозолю [17].

Располагая распределениями частиц по размерам для влажного и подсушенного аэрозоля дымов, можно поставить вопрос об оценке конденсационного фактора роста частиц, воспользовавшись методикой, предложенной А.Г. Лактионовым [22]. Вариации плотности распределения частиц по размерам $\zeta(r)$ при изменении 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 переходят из диапазона размеров $[a, b]$ в диапазон $[h(a), h(b)]$. Рассматривая η и η' как функцию верхнего предела интегрирования, можно из условия $\eta = \eta'$ отыскать зависимость $h(r)$, определенную в [22] как фактор роста частиц. Задача сводится к отысканию верхнего предела интеграла $r' = h(r)$ по его значению из условия $\eta = \eta'$. 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. Такие оценки фактора роста для натурального аэрозоля приведены в [10], где показано, что зависимость фактора роста от ра-

диуса частиц обычно имеет вид колокола с максимумом $r \sim 0,3-0,5$ мкм. Поскольку не было оснований предполагать разный химический состав частиц дыма разного размера, то можно было бы ожидать, что фактор роста частиц дымов будет иметь вид, близкий к П-образному. Для двух случаев 25.08 и 6.09 он таким и получился — широкий максимум в области $r = 0,2 \div 0,8$ мкм. Однако в дымах 17.09 кривая фактора роста получилась двугорбой (рис. 3). Может быть, это каким-то образом связано с двухмодальностью кривой распределения частиц по размерам (см. рис. 2,з).

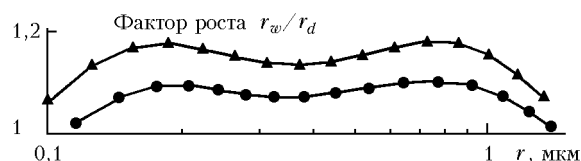


Рис. 3. Зависимости от радиуса частиц конденсационного фактора роста частиц дыма для первых двух распределений рис. 2,з

Выводы

1. В течение примерно 2 мес на Звенигородской научной станции исследованы дымы лесных и торфяных пожаров в Подмосковье, получены временные развертки параметра Ангстрема для величины коэффициента направленного светорассеяния D_{11} и массовой концентрации сухой основы субмикронного аэрозоля. Установлено существование высокой корреляции между двумя этими величинами (коэффициент корреляции $R = 0,7$). В пиках задымления массовая концентрация M в Звенигороде в 10–50 раз превышала летний фоновый уровень, в Москве 10.10.2002 в районе Воробьевых гор — примерно в 100 раз.

2. Реальные дымы лесных и торфяных пожаров лета 2002 г. по своим оптическим и микрофизическим характеристикам оказались близкими к исследованным в лабораторных условиях, различия, скорее всего, связаны с возрастом дымов и сводятся к следующему:

а) медианные радиусы аппроксимирующих распределений несколько меньше, варьируют в диапазоне $r_m = 0,16 \div 0,21$; с ростом задымленности обычно рос и радиус r_{max} ;

б) величины действительной части показателя преломления вещества частиц у природных дымов заметно меньше — $n = 1,41 \div 1,51$, видимо, за счет конденсации паров аэрозолеобразующих соединений. По этой же причине конденсационная активность частиц природных дымов существенно выше, $\chi \approx 0,15 \div 0,3$, чем у лабораторных.

В последних по времени эпизодах дымовых выносов в распределениях $dV(r)/dr$ в области размеров $r \sim 0,4$ мкм проявлялась вторая мода.

Для нескольких эпизодов дымов получены оценки конденсационного фактора роста частиц дыма, для некоторых дымов соответствующие кривые имели двугорбый вид.

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

1. Горчаков Г.И., Аникин П.П., Волох А.А., Емиленко А.С., Исаков А.А., Копейкин В.М., Пономарева Т.Я., Семутникова Е.Г., Свириденков М.А., Шукуров К.А. Исследование состава задымленной атмосферы г. Москвы во время пожаров торфяников летом—осенью 2002 г. // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. (в печати).
2. Лукин В.В., Исаков А.А. Оптические характеристики дымовых аэрозолей // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 1988. Т. 24. № 3. С. 250–257.
3. Исаков А.А., Лукин В.В., Свириденков М.А. Спектрофелометрические исследования дымовых аэрозолей // Там же. С. 258–262.
4. Голицын Г.С., Шукуров А.Х., Гинзбург А.С., Сутугин А.Г., Андропова А.В. Комплексное исследование микрофизических и оптических свойств дымового аэрозоля // Там же. С. 227–234.
5. Андропова А.В., Костина Е.М., Кутов А.С., Мишакин В.М., Пирогов С.М., Обвинцев Ю.И., Сутугин А.Г. Оптические и микрофизические свойства аэрозолей, получаемых при горении различных материалов // Там же. С. 235–243.
6. Аникин П.П., Шукуров А.Х. Спектральное ослабление излучения дымовым аэрозолем // Там же. С. 244–249.
7. Капустин В.Н., Корнеев А.А. Исследование процессов агрегатобразования и оптических проявлений несферичности частиц различных дымов // Там же. С. 280–289.
8. Козлов В.С., Панченко М.В., Тумаков А.Г. О влиянии режима сжигания углеводородных топлив на оптические свойства дымовых аэрозолей // Оптика атмосф. и океана. 1993. Т. 6. № 10. С. 1278–1286.
9. 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.
10. Isakov A.A. Some statistical regularities in variations of optical and microphysical characteristics of surface aerosol // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2001. V. 37. Suppl. 1. P. S157–S164.
11. 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. атмосф. и океана. 1985. Т. 21. № 1. С. 22–31.
12. Горчаков Г.И., Емиленко А.С., Свириденков М.А. Однопараметрическая модель приземного аэрозоля // Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана. 1981. Т. 17. № 1. С. 39–49.
13. Исаков А.А., Емиленко А.С. О корреляционных связях оптических и микрофизических характеристик фонового аэрозоля // Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана. 1986. Т. 22. № 7. С. 743–750.
14. Исаков А.А. О возможности исследования полупрозрачных облаков методами солнечного ореола // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 1994. Т. 30.
15. Исаков А.А. Некоторые результаты исследований оптических и микрофизических характеристик дымов // Оптика атмосф. и океана. 1999. Т. 12. № 1. С. 23–30.
16. Веретенников В.В., Наац И.Э., Панченко М.В., Фадеев В.В. К определению микроструктуры и показателя преломления атмосферных дымов из поляриза-

- ционных характеристик светорассеяния // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. 1978. Т. 14. № 12. С. 1313–1317.
17. Панченко М.В., Терпугова С.А., Яушева Е.П., Тумаков А.Г. Внутригодовая изменчивость конденсационной активности атмосферного аэрозоля // Тезисы тр. Междунар. конф. «Физика атмосферного аэрозоля». М., 1999. С. 254–255.
 18. 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 Sci. Team Meeting. San Antonio, 2000.
 19. Турчин В.Ф., Козлов В.П., Малкевич М.С. Использование методов математической статистики для решения некорректных задач // Успехи физ. наук. 1970. Т. 102. № 3. С. 302–361.
 20. Рахимов Р.Ф., Козлов В.С., Макиенко Э.В., Шмаргунов В.П. Оптико-микрофизические свойства промышленных дымов по данным поляризационной спектрополяриметрии // Оптика атмосфер. и океана. 2002. Т. 15. № 4. С. 328–336.
 21. Исаков А.А. Спектрополяриметрические и нефелометрические исследования дымов лесных пожаров в Подмосковье в июле–сентябре 2002 г. // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. (в печати).
 22. Лактионов А.Г. Равновесная гетерогенная конденсация. Л.: Гидрометеониздат, 1988. 160 с.

A.A. Isakov. Optical and microphysical characteristics of smokes from forest fires in the Moscow Region in July – September 2002.

The daily spectropolarimeter and round-the-clock nephelometer measurements of smoke aerosols from smoke and peat fires were conducted in 2002 at the Zvenigorod Scientific Station of the A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics. Strong forest fires in the Moscow Region began in July and continued until late September of 2002. A spectropolarimeter measured the spectral dependences of polarized components of the scattering phase function in the spectral region $\lambda = 0.4\text{--}0.75\ \mu\text{m}$ with the spectral resolution $\Delta\lambda \approx 10\ \text{nm}$ at the scattering angles $\varphi = 45, 90, 135^\circ$. An automated nephelometer measured round-the-clock the directed scattering coefficient D_{11} at the scattering angle $\varphi = 45^\circ$ and the wavelength $\lambda = 0.54\ \mu\text{m}$ for wet aerosol and its soling part. Both the instruments are equipped with air flow heaters allowing estimation of the condensation activity of aerosol particles. The experimental information obtained is sufficient for formulation of the combined inverse problem, namely, retrieval of the particle size distribution and estimation of the complex refractive index of the particulate matter. In July – September 2002 ten smoke episodes were observed when the mass concentration of the submicron aerosol 10–50 times exceeded the background level. For these episodes the particle size distribution and the refractive index were determined. The optical and microphysical characteristics of the natural smokes were compared with those of laboratory pyrolysis smoke, and the following results were obtained: the imaginary part of the refractive index was found to be less a 0.005; the real part of the refractive index $n = 1.4\text{--}1.5$ is much less than that for laboratory smokes. The Hanel parameter for laboratory smokes was found to be very small, but for forest fire smokes it was much greater (from 0.15 to 0.3), as for natural summer aerosol. For a few last episodes, the particle size distributions had a bimodal shape with the second-mode size $r = 0.3\text{--}0.4\ \mu\text{m}$. For some episodes, the particle growth factor also had a bimodal shape with peaks at $r \sim 0.2$ and $0.6\text{--}0.8\ \mu\text{m}$.