

Определение характеристик атмосферного аэрозоля по данным трехволнового интегрирующего нефелометра

М.А. Свириденков¹, К.С. Веричев¹, С.С. Власенко², А.С. Емиленко¹,
Е.Ф. Михайлов², Е.Ю. Небосько^{2*}

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
119017, г. Москва, Пыжевский пер., 3

²Физический факультет Санкт-Петербургского государственного университета
198904, г. Санкт-Петербург, Петродворец, ул. Ульяновская, 1

Поступила в редакцию 11.11.2013 г.

Анализируются возможности определения истинного значения коэффициента рассеяния и восстановления распределения частиц по размерам по данным трехволнового интегрирующего нефелометра. Предложены два подхода к оценке отношения истинного коэффициента рассеяния к измеренному. Приведены результаты сравнения микроструктуры аэрозоля по данным одновременных измерений на интегрирующем нефелометре и нефелометре-поляриметре ФАН, а также сопоставления данных ФАН с измерениями на дифференциальном анализаторе подвижности.

Ключевые слова: аэрозоль, рассеяние, интегрирующий нефелометр, обратная задача; aerosol, scattering, integrating nephelometer, inverse problem.

Введение

Интегрирующие нефелометры, разработанные в середине XX в. [1] и в дальнейшем усовершенствованные [2, 3], в настоящее время широко используются для контроля содержания аэрозоля в локальных объемах. Современные интегрирующие нефелометры измеряют на одной или нескольких (обычно трех) длинах волн не только коэффициент рассеяния, но и его составляющую, обусловленную рассеянием в заднюю полусферу. Таким образом, измеряются шесть оптических параметров. Обычно в исследованиях атмосферного аэрозоля используются только три величины, измеряемые непосредственно или рассчитываемые по экспериментальным данным, — коэффициент рассеяния, параметр Ангстрема и доля излучения, рассеиваемого в заднюю полусферу (эта характеристика связана со средним косинусом индикатрисы рассеяния [4, 5]). Оценка же возможности восстановления микроструктуры аэрозоля по данным интегрирующих нефелометров, насколько нам известно, не проводилась (если не считать формального соотнесения величины параметра Ангстрема A обратностепенному распределению с показателем α , равным $A - 2$).

Схема и конструкция нефелометров ограничивают область углов интегрирования (обычно 7–170°), что приводит к занижению измеряемых коэффициентов рассеяния, прежде всего вследствие исключения малоуглового рассеяния. Вторым источником ошибок является неидеальность косинусной характеристики диффузного рассеивателя. Эти проблемы анализировались в ряде работ [6–9]. Были измерены реальные характеристики угловой чувствительности, получены расчетные зависимости ошибок интегрирования от эффективного размера частиц. Для оценки корректирующего фактора было предложено использовать его эмпирическую связь с измеряемым параметром Ангстрема [7].

В 2012 г. интегрирующий нефелометр TSI-3563 введен в эксплуатацию в Ресурсном центре «Геомодель» Санкт-Петербургского государственного университета. В настоящей статье на основе модельных расчетов и данных натурных измерений в июне–июле 2013 г., проведенных параллельно с измерениями на нефелометре-поляриметре ФАН ИФА им. А.М. Обухова РАН, анализируются возможности восстановления микроструктуры аэрозоля и оценки факторов коррекции коэффициентов рассеяния с использованием всех шести измеряемых параметров.

Численные эксперименты

Регистрируемые интегрирующим нефелометром параметры связаны с распределением частиц по размерам интегральными уравнениями:

* Михаил Алексеевич Свириденков (misv@mail.ru); Константин Сергеевич Веричев (rockford66@mail.ru); Сергей Сергеевич Власенко (Sergey.Vlasenko@paloma.spbu.ru); Александр Сергеевич Емиленко (emilas@list.ru); Евгений Федорович Михайлов (eugene.mikhailov@spbu.ru); Евгений Юрьевич Небосько (zhenia84@gmail.com).

$$\sigma_{scm} = 2\pi \int_{\varphi_1}^{\varphi_3} K(r, \varphi, m, \lambda) S(r) dr F_1(\varphi) d\varphi, \quad (1)$$

$$\sigma_{bscm} = 2\pi \int_{\varphi_2}^{\varphi_3} K(r, \varphi, m, \lambda) S(r) dr F_2(\varphi) d\varphi, \quad (2)$$

где σ_{scm} и σ_{bscm} — «измеряемые» коэффициент рассеяния и его составляющая, обусловленная рассеянием в заднюю полусферу (далее — коэффициент обратного рассеяния); $K(r, \varphi, m, \lambda)$ — фактор эффективности рассеяния, зависящий от длины волны λ , угла рассеяния φ , радиуса частицы r и комплексного показателя преломления $m = n - ik$; $S(r)$ — дифференциальное распределение площадей сечений частиц по размерам; $F_1(\varphi)$ и $F_2(\varphi)$ — функции угловой чувствительности нефелометра при измерении полного и обратного рассеяния; (φ_1, φ_3) и (φ_2, φ_3) — интервалы интегрирования. Для «идеального» нефелометра

$$\sigma_{sc} = 2\pi \int_0^{\pi} K(r, \varphi, m, \lambda) S(r) dr \sin \varphi d\varphi, \quad (3)$$

$$\sigma_{bsc} = 2\pi \int_{\pi/2}^{\pi} K(r, \varphi, m, \lambda) S(r) dr \sin \varphi d\varphi. \quad (4)$$

Здесь σ_{sc} и σ_{bsc} — коэффициенты рассеяния и обратного рассеяния. По структуре уравнения (1), (2) и (3), (4) аналогичны и могут быть приведены к единой форме:

$$\sigma_i = \int K_i(r, m, \lambda) S(r) dr, \quad (5)$$

где индекс i заменяет sc , scm , bsc $bscm$. Если известны функции $F_1(\varphi)$ и $F_2(\varphi)$, то можно рассчитать соответствующие ядра уравнения (5) и решать обратную задачу, используя измеряемые величины в качестве входных параметров.

При алгебраизации (5) монодисперсные ядра интегрируются между узлами сетки радиусов. Нормированные на ширину интервала и деленные на $4/3r_j$ (r_j — середины интервалов) проинтегрированные ядра приведены на рис. 1. Они имеют смысл сглаженных объемных факторов эффективности рассеяния. При расчетах мы использовали угловые чувствительности $F_1(\varphi)$ и $F_2(\varphi)$, приведенные в работе [6]. В [8] отмечается хорошее согласие между кривыми угловой чувствительности для двух экземпляров прибора TSI-3563, что дает основание надеяться на стабильность этой характеристики. Как следует из рис. 1, основной вклад в регистрируемые сигналы вносят частицы субмикронной фракции с радиусами в пределах примерно 0,1–0,7 мкм.

Возможности восстановления микроструктуры аэрозоля были проанализированы на моделях распределений частиц по размерам. Были выбраны модели, адекватные, на наш взгляд, реальным атмосферным аэрозолям. Аэрозоль предполагался бимодальным, состоящим из субмикронной и грубодисперсной фракций. Были сконструированы две группы моделей, отличающиеся медианным радиусом субмикронной фракции. Внутри каждой груп-

пы варьировалась счетная концентрация субмикронного аэрозоля. Параметры аналитических моделей приведены в таблице.

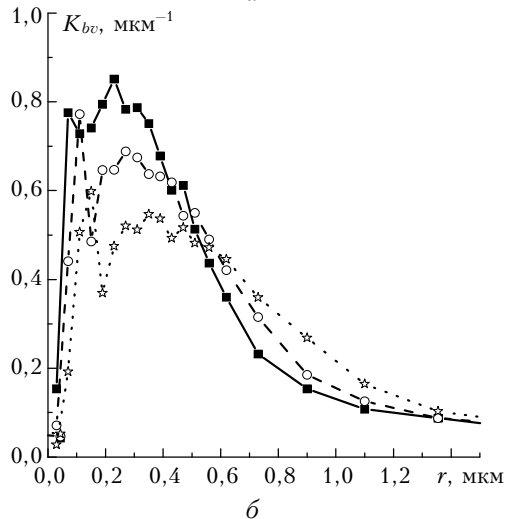
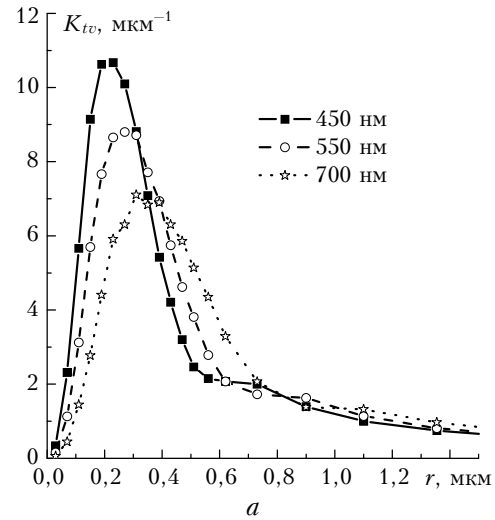


Рис. 1. Объемные факторы эффективности измеряемых рассеяния (а) и обратного рассеяния (б)

Модельные распределения, использованные в численных экспериментах

Фракция	ν	r_m , мкм	N
Грубодисперсная	0,65	1,0	0,03
Субмикронная I	0,6	0,05	1000, 800, 600, 400, 200, 100
Субмикронная II	0,6	0,08	600, 400, 200, 100, 50, 25

В таблице приведены следующие величины: среднее квадратическое отклонение логарифма радиуса ν , медианный радиус счетного распределения r_m и счетная концентрация N . Размерность N не указана, так как в модельных расчетах важно лишь соотношение между концентрациями фракций. Оптические характеристики рассчитывались по теории Ми в диапазоне радиусов 0,01–12 мкм. Излучение считалось монохроматическим (т.е. не учитывалась конечная ширина светофильтров нефелометра). Это допущение основано на слабой и квазимоноотонной спектральной зависимости оптических характери-

стик аэрозоля. Прямая задача считалась для частиц с показателем преломления $m = 1,5 - 0i$. Обратная задача решалась итерационным методом [10–12]. Показатель преломления решения выбирался по критерию минимальной оптической невязки. Для 12 вариантов моделей он варьировал от $1,51 - 0,01i$ до $1,53 - 0,015i$. Таким образом, даже при обращении точных расчетов показатель преломления не восстанавливается абсолютно достоверно. Это связано с тем, что в приближении оптически мягких частиц коэффициент рассеяния определяется произведением размера частиц на $n - 1$ [13] и распределения, восстановленные при разных значениях показателя преломления, получают одно из другого заменой переменных (корректирующий множитель примерно пропорционален $n - 1$ при обращении спектральной зависимости коэффициента рассеяния и $(n - 1)^{1/2}$ для рассеяния под углом 45°) [14, 15]. Кроме того, даже если наряду с энергетическими характеристиками рассеяния измеряется и степень линейной поляризации, удастся восстановить не показатель преломления, а только линейную комбинацию n и k [12]. Результаты решения обратной задачи представлены на рис. 2.

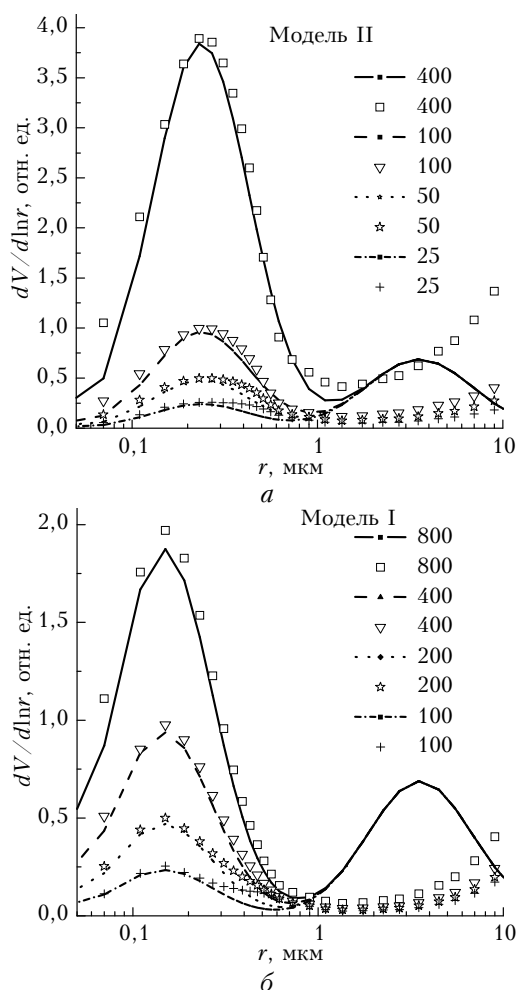


Рис. 2. Решение обратной задачи для бимодальных моделей. Кривые с символами — модели, только символы — решения обратной задачи. Числа в легенде означают концентрацию субмикронной фракции

Данные рис. 2 свидетельствуют о том, что изменение соотношения между субмикронной и грубодисперсной фракциями не влияет существенно на качество восстановления в субмикронном диапазоне. Как и предполагалось, исключение из интегрирования области ореола не дает возможности определить параметры грубодисперсной фракции.

Распространенным методом оценки такой климатически важной характеристики аэрозоля, как альbedo однократного рассеяния, является параллельное измерение коэффициентов рассеяния и поглощения. Поэтому одной из основных задач было исследование возможности восстановления значений коэффициента рассеяния по данным интегрирующего нефелометра, или, что то же самое, определения корректирующего коэффициента $R = \sigma_{sc}/\sigma_{scm}$. Эта проблема неоднократно анализировалась ранее [6–9]. Тем не менее, некоторые возможные подходы не использовались, а полученные оценки не всегда напрямую применимы в практике натурных измерений характеристик атмосферного аэрозоля.

Одним из путей оценки корректирующего фактора является использование так называемого метода микрофизической экстраполяции. Он состоит в последовательном решении обратной задачи и прямом расчете оптических параметров, которые нельзя измерить непосредственно. Очевидно, что применимость такого подхода ограничивается относительным вкладом восстанавливаемого диапазона размеров частиц в рассчитываемую оптическую характеристику. А последний определяется как зависимостью фактора эффективности от размера частиц, так и формой распределения частиц по размерам. В рассматриваемом случае адекватность микрофизической экстраполяции зависит от соотношения между объемными концентрациями субмикронной и грубодисперсной фракций. Для 12 модельных фракций доля грубодисперсного аэрозоля менялась примерно от 0,1 до 0,75. Непосредственно рассчитанные по теории Ми значения R изменялись (для всех трех длин волн) от 1,07 до 1,18, а восстановленные путем микрофизической экстраполяции — от 1,06 до 1,12. Ошибка микрофизической экстраполяции достигала 6,5% для длины волны 450 нм, 7% для 550 нм и 9,5% для 700 нм. Для моделей с относительным объемом грубодисперсного аэрозоля, не превосходящим одной трети, ошибка не превышала 1% в синей и зеленой областях и 2% в красной. Таким образом, в ситуациях, когда субмикронная фракция является преобладающей, например, в условиях, подобных задымлению от лесных и торфяных пожаров летом 2010 г. в Центральном регионе России [16], истинный коэффициент рассеяния можно рассчитать, используя аппарат решения обратных задач.

Рассмотрение только аналитических моделей, хотя и не противоречащих данным наблюдений, не позволяет получить статистически достоверные оценки для ансамбля ситуаций, реализующихся в атмосфере. Мы воспользовались следующим приемом. На Звенигородской научной станции ИФА им. А.М. Обухова РАН установлен солнечно-небесный

фотометр CIMEL CE-318, входящий в Международную сеть AERONET, созданную NASA США [17]. Данные фотометров этой сети обрабатываются по единому алгоритму [18]. Так как измерения яркости неба проводятся и вблизи Солнца (минимальный угол рассеяния около 3°), а максимальная длина волны находится в ИК-области (1,02 или 1,64 мкм), по данным спектральных измерений оптической толщи и яркости дневного безоблачного неба фотометрами CIMEL можно восстановить не только субмикронную, но и грубодисперсную фракции аэрозоля (в алгоритме [18] – до 15 мкм). В отсутствие стратосферного аэрозоля основной вклад в усредненные по толще атмосферы оптические и микрофизические характеристики аэрозоля дает нижняя тропосфера. Поэтому для целей нашей работы можно считать, что спектры размеров частиц аэрозоля у поверхности и осредненные по столбу атмосферы качественно подобны. Мы использовали данные ст. Звенигород за 2011–2012 гг. В сети AERONET существует ограничение на аэрозольную оптическую толщину (AOT), при которой восстанавливается и показатель преломления (AOT на длине волны 440 нм больше 0,4). В условиях Подмосковья такие ситуации реализуются, если не считать дымов от пожаров, довольно редко. Чтобы, с одной стороны, сформировать представительные ансамбли, а с другой – проследить влияние показателя преломления, всем реализациям были произвольно присвоены показатели преломления в диапазоне 1,5–1,65. Всего двухлетний ансамбль включал 462 реализации. Так же, как и для аналитических моделей, были промоделированы измеряемые интегрирующим нефелометром параметры и по ним восстановлена микроструктура. Средние ошибки восстановления коэффициентов рассеяния методом микрофизической экстраполяции составили $-0,7$; $-1,6$; $-0,6\%$, а среднеквадратические – 1,5; 1,8; 2,5% для длин волн 450, 550 и 700 нм соответственно. Коэффициенты корреляции между истинными и восстановленными значениями R равнялись 0,72, 0,64 и 0,61.

Еще одним возможным путем учета всей информации, содержащейся в измеряемых параметрах, является метод множественной регрессии. Мы применили его для логарифма R как функции логарифмов измеряемых параметров. В результате

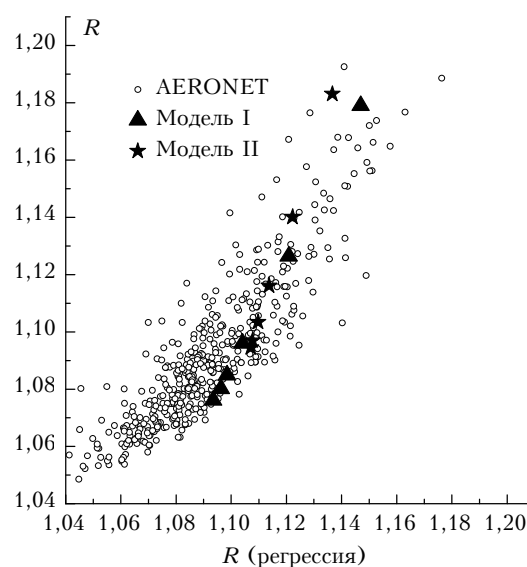
$$R = C \Pi \sigma_i^{a_i}, \quad (6)$$

где σ_i – измеренные коэффициенты рассеяния и обратного рассеяния; C и a_i – параметры регрессии.

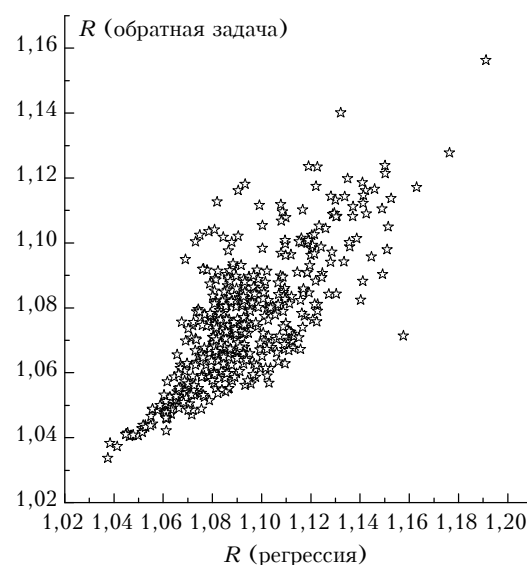
Коэффициенты корреляции между точными и восстановленными R оказались равными 0,9 на длине волны 450 нм, 0,88 на 550 нм и 0,87 на 700 нм. Среднеквадратическая ошибка восстановления на зеленой длине волны составила 1,1%. Корреляционная связь между точными и восстановленными по логарифмически-линейной регрессии коэффициентами R на зеленой длине волны показана на рис. 3, а.

Там же нанесены точки, соответствующие двум вариантам аналитических моделей. Как следует из рис. 3, а, коэффициенты коррекции для аналитиче-

ских моделей не выходят за пределы поля точек, полученных по данным AERONET, но по мере роста объемной доли грубодисперсной фракции перемещаются от его нижней границы к верхней. Коэффициенты коррекции R , рассчитанные двумя методами, достаточно хорошо коррелируют друг с другом. Корреляционная диаграмма для 550 нм приведена на рис. 3, б. Коэффициент корреляции равен 0,76.



а



б

Рис. 3. Оценка корректирующего коэффициента для коэффициента рассеяния

Таким образом, численные эксперименты показывают, что коэффициент рассеяния может быть восстановлен в типичных ситуациях с учетом всех шести измеряемых интегральным нефелометром параметров с ошибкой 1–2% (имеется в виду дополнительная ошибка за счет неточности коэффи-

циента коррекции) как методом микрофизической экстраполяции, так и с использованием множественной регрессии. Точность множественной регрессии несколько выше, но следует иметь в виду, что оценки получены на том же ансамбле, для которого считался коэффициент регрессии, а микрофизическая экстраполяция делается независимо для каждой реализации. Поэтому *a priori* нельзя утверждать, что первый подход (множественная регрессия) точнее. Отметим еще, что в анализируемых массивах 70% R450 попадает в интервал 1,07–1,11, а 67% R550 и 55% R700 в интервал 1,06–1,10. Следовательно, если не требуется высокая точность в каждом индивидуальном случае, можно воспользоваться постоянными средними значениями R .

Натурные наблюдения

Модельные численные эксперименты показали потенциальную возможность восстановления спектра размеров частиц атмосферного аэрозоля в субмикронной области. В июне – начале июля 2013 г. в Ресурсном центре «Геомодель» СПбГУ был проведен цикл измерений параллельно на двух приборах – интегрирующем нефелометре TSI-3563 и нефелометре-поляриметре отечественного производства ФАН-А, использующем в ИФА им. А.М. Обухова РАН. В отличие от интегрирующего нефелометра ФАН измеряет рассеяние под фиксированными углами 45 и 90°. Кроме того, под углом 90° регистрируются и две ортогонально поляризованные компоненты коэффициента направленного светорассеяния. Нефелометры ФАН используются как для мониторинга субмикронной фракции, так и для исследования трансформации оптических и микрофизических свойств аэрозоля при его контролируемом увлажнении и нагреве [12]. Основной целью параллельных измерений было сопоставление микроструктуры, полученной по данным двух приборов.

В 2009 г. для проверки возможностей нефелометра ФАН в СПбГУ был проведен эксперимент по сравнению данных ФАН с результатами измерений на сканирующем анализаторе подвижности аэроионов TSI SMPS-3080. Принципиально важно отметить, что сопоставлялись результаты, полученные с помощью приборов, работающих на разных физических принципах. Исследовались как натурные, так и искусственные аэрозоли. Искусственные аэрозоли разной степени дисперсности получали из водного раствора (0,1%) сульфата аммония путем его распыления в генераторе аэрозоля TSI-3076 с последующей осушкой капельного аэрозоля в диффузионном осушителе. На рис. 4 показаны спектры размеров трех реализаций искусственного аэрозоля, измеренные дифференциальным анализатором подвижности TSI SMPS-3080 и восстановленные по данным ФАН.

Удовлетворительное согласие наблюдается во всем диапазоне, в котором проводилось сравнение (0,07–0,3 мкм). Показатель преломления чистого сульфата аммония равен 1,52. При решении обратной задачи были получены значения $n = 1,53; 1,55; 1,57$.

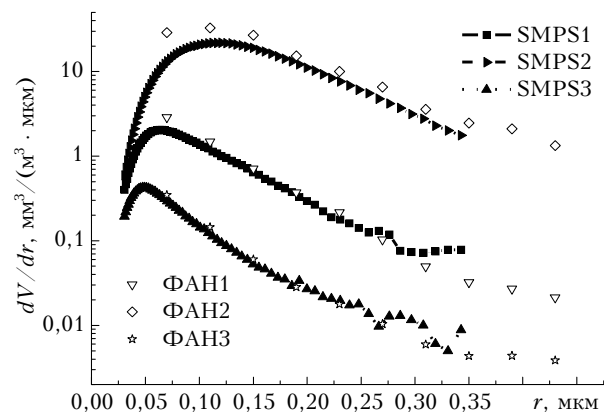


Рис. 4. Измеренные дифференциальным анализатором подвижностей и восстановленные по данным ФАН распределения объемов искусственных аэрозолей по размерам

На рис. 5 приведены результаты обработки натурных наблюдений.

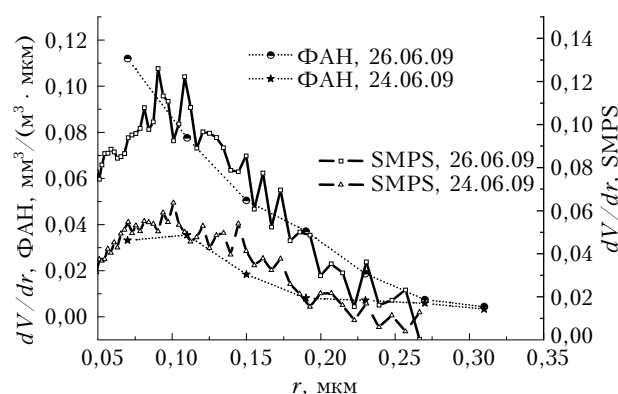


Рис. 5. Измеренные дифференциальным анализатором подвижностей и восстановленные по данным ФАН распределения объемов частиц натурального аэрозоля по размерам

Период измерений (23–26.06.2009) характеризовался очень низким уровнем замутнения. С этим связана негладкость кривых SMPS. Тем не менее данные ФАН хорошо ложатся на сглаженные спектры размеров SMPS. Что же касается оценок показателя преломления по данным ФАН, то их адекватность косвенно доказывается соответствием изменения показателя преломления фактору роста в ходе искусственного конденсационного процесса [19]. При этом надо иметь в виду, что информации, содержащейся в данных ФАН, недостаточно для отдельного определения действительной и мнимой частей показателя преломления. Восстанавливается только их линейная комбинация. На распределении частиц по размерам такая неопределенность не сказывается, поэтому обратная задача решается в предположении непоглощающих частиц.

Во время эксперимента 2013 г. также преобладали ситуации с очень низким содержанием аэрозоля. По данным интегрирующего нефелометра коэффициент рассеяния на длине волны 550 нм менялся в пределах 14–110 Mm^{-1} . При малых замутненностях сигнал аэрозольного рассеяния под углом 90°, особенно на длине волны 450 нм, становится в нефелометре

ФАН намного меньше суммарного вклада молекулярного рассеяния и фона камеры. Это приводит к большим ошибкам при решении обратной задачи. Поэтому из дальнейшего анализа были исключены реализации, для которых оптическая невязка превышала 7%. После такой селекции остался массив из 177 реализаций параллельных измерений в период с 19 июня по 1 июля 2013 г.

При обработке результатов совместных наблюдений сначала обращались данные нефелометра ФАН, а затем интегрирующего нефелометра. При этом обратная задача для коэффициентов рассеяния и обратного рассеяния решалась с показателями преломления, определенными по данным ФАН. Такой подход был выбран, чтобы исключить влияние ошибок, вызванных невозможностью определения показателя преломления, на различия распределений, восстановленных по измерениям на двух приборах. Примеры полученных распределений частиц по размерам показаны на рис. 6.

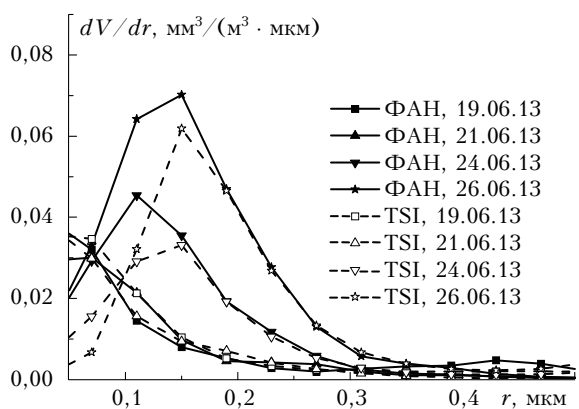


Рис. 6. Распределения объемов частиц натурального аэрозоля по размерам

В целом они подобны друг другу. При этом распределения, восстановленные по измерениям на интегрирующем нефелометре, обычно лежат несколько ниже в области радиусов $r < 0,2$ мкм, чем данные ФАН. Была рассчитана зависимость коэффициента корреляции между данными двух приборов от размера частиц. Она представлена на рис. 7.

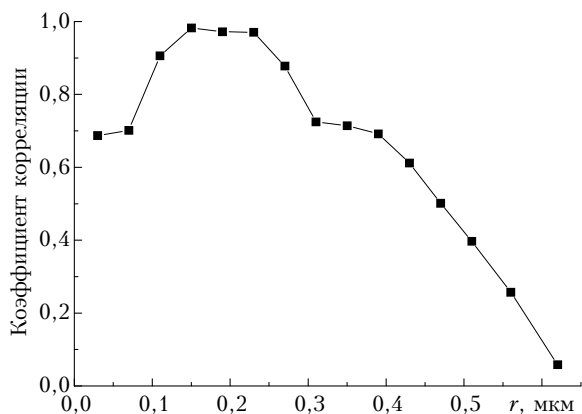


Рис. 7. Зависимость от размера коэффициента корреляции между концентрациями частиц по данным TSI-3563 и ФАН

Обращает на себя внимание очень высокая корреляция (более 0,9) в области 0,1–0,3 мкм. На этот же интервал размеров приходится и максимум объемного фактора эффективности рассеяния. Там же или несколько левее находится и максимум распределения объемов частиц по размерам. Высокая корреляция между дифференциальными концентрациями обуславливает и тесную корреляционную связь между объемными концентрациями субмикронного аэрозоля, восстановленными двумя методами. Она показана на рис. 8.

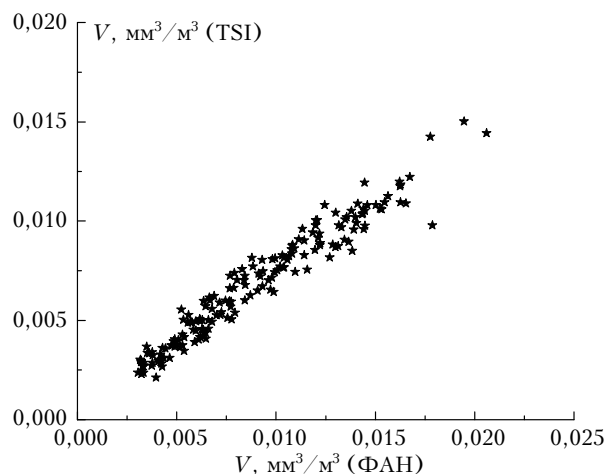


Рис. 8. Корреляционная связь между объемными концентрациями субмикронной фракции аэрозоля по данным двух приборов

Коэффициент корреляции равен 0,97. В то же время объемная концентрация по данным TSI-3563 примерно на 25% меньше, чем по данным ФАН. Причины такого расхождения будут предметом дальнейших исследований.

Заключение

Результаты анализа численных экспериментов с аналитическими и эмпирическими моделями атмосферного аэрозоля, а также данные натуральных измерений свидетельствуют о том, что решение обратной задачи с использованием непосредственно измеряемых интегрирующим нефелометром величин позволяет восстановить распределение по размерам частиц субмикронной фракции аэрозоля при различных соотношениях между объемными концентрациями субмикронного и грубодисперсного аэрозоля. Уточнение истинного значения коэффициента рассеяния с использованием всей информации, содержащейся в результатах наблюдений, возможно как методом микрофизической экстраполяции, так и с использованием регрессионного анализа. При этом надо иметь в виду, что в случаях, когда основной вклад в объемную концентрацию аэрозоля вносит грубодисперсная фракция, получить точные значения коэффициентов рассеяния невозможно. В дальнейшем предполагается исследовать, насколько точно можно восстановить по данным интегрирующих нефелометров такой важный параметр, как средний косинус индикатрисы рассеяния света.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проекты № 13-05-00956 и 13-05-10067) с использованием оборудования Ресурсного центра «Геомодель» СПбГУ.

1. *Beuttell R.G., Brewer A.W.* Instruments for the Measurement of the Visual Range // *J. Sci. Instrum.* 1949. V. 26, N 11. P. 357–359.
2. *Waggoner A.P., Ahlquist N.C., Charlson R.J.* Measurement of the aerosol total scatter-backscatter ratio // *Appl. Opt.* 1972. V. 11, N 12. P. 2886–2889.
3. *Bodhaine B.A., Ahlquist N.C., Schnell R.C.* Three-wavelength nephelometer suitable for aircraft measurements of background aerosol scattering extinction coefficient // *Atmos. Environ.* 1991. V. 25A, N 10. P. 2267–2276.
4. *Свириденков М.А.* О статистической параметризации индикатрисы рассеяния // *Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана.* 1980. Т. 16, № 7. С. 751–754.
5. *Ricchiazzi P.J., Gautier C.* Sensitivity of clear-sky diffuse radiation to in situ aerosol scattering parameters // *Proc. 13th Atmospheric Radiation Measurements (ARM) Science Team Meeting.* Broomfield, Colorado. 2003. URL: http://www.arm.gov/publications/proceedings/conf13/extended_abs/ricchiazzi-pj.pdf
6. *Anderson T.L., Covert D.S., Marshall S.F., Laucks M.L., Charlson R.J., Waggoner A.P., Ogren J.A., Caldow R., Holm R.L., Quant F.R., Sem G.J., Wiedensohler A., Ahlquist N.A., Bates T.S.* Performance characteristics of a high-sensitivity, three-wavelength, total scatter/backscatter nephelometer // *J. Atmos. Ocean. Technol.* 1996. V. 13, N 5. P. 967–986.
7. *Anderson T.L., Ogren J.A.* Determining aerosol radiative properties using the TSI 3563 integrating nephelometer // *Aerosol Sci. Technol.* 1998. V. 29, N 1. P. 57–69.
8. *Muller T., Nowak A., Wiedensohler A., Sheridan P., Laborde M., Covert D.S., Marinoni A., Imre K., Henzing B., Roger J.-C., Dos Santos S.M., Wilhelm R., Wang Y.-Q., de Leeuw G.* Angular Illumination and Truncation of Three Different Integrating Nephelometers: Implications for Empirical, Size-Based Corrections // *Aerosol Sci. Technol.* 2009. V. 43, N 6. P. 581–586.
9. *Moosmuller H., Arnott W.P.* Angular truncation errors in integrating nephelometry // *Rev. Sci. Instrum.* 2003. V. 74, N 7. P. 3492–3501.
10. *Twitty J.T.* The inversion of aureole measurements to derive aerosol size distributions // *J. Atmos. Sci.* 1975. V. 32, N 4. P. 584–591.
11. *Аникин П.П., Свириденков М.А.* Оптические характеристики и микроструктура аэрозоля по данным измерений индикатрисы рассеяния в области солнечного ореола // *Сб. трудов Междунар. конф. «Физика атмосферного аэрозоля».* М.: Диалог-МГУ, 1999. С. 20–28.
12. *Панченко М.В., Свириденков М.А., Терпугова С.А., Козлов В.С.* Активная спектрофелометрия в исследовании микрофизических характеристик субмикронного аэрозоля // *Оптика атмосф. и океана.* 2004. Т. 17, № 5–6. С. 428–436.
13. *Van de Hulst G.* Рассеяние света малыми частицами. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1961. 356 с.
14. *Свириденков М.А.* Определение характеристик атмосферного аэрозоля по спектральным измерениям прозрачности и малоуглового рассеяния // *Оптика атмосф. и океана.* 2001. Т. 14, № 12. С. 1115–1118.
15. *Веретенников В.В.* Совместное определение микроструктуры и показателя преломления аэрозоля по данным солнечной фотометрии // *Оптика атмосф. и океана.* 2007. Т. 20, № 3. С. 214–221.
16. *Chubarova N., Nezval' Ye., Sviridenkov M., Smirnov A., Slutsker I.* Smoke aerosol and its radiative effects during extreme fire event over Central Russia in summer 2010 // *Atmos. Measur. Techn.* 2012. V. 5, N 3. P. 557–568.
17. URL: <http://aeronet.gsfs.nasa.gov>
18. *Dubovik O., King M.D.* A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements // *J. Geophys. Res.* D. 2000. V. 105, N 16. P. 20673–20696.
19. *Терпугова С.А., Панченко М.В., Свириденков М.А., Докукина Т.А.* Соотношения между оптическими и микрофизическими параметрами конденсационной изменчивости приземного аэрозоля // *Оптика атмосф. и океана.* 2009. Т. 22, № 7. С. 629–634.

M.A. Sviridenkov, K.S. Verichev, S.S. Vlasenko, A.S. Emilenko, E.F. Mikhailov, E.Yu. Nebos'ko.
Retrieving of atmospheric aerosol characteristics from data of a three-wavelength integrating nephelometer.

Possibilities of retrieving a true value of the volume scattering coefficient and particle size distribution from data of a three-wavelength integrating nephelometer are analyzed. Two approaches to evaluation of the ratio of the true scattering coefficient to the measured one are suggested. The results of comparison of the aerosol microstructure from data of simultaneous measurements by means of integrating nephelometer and nephelometer-polarimeter PhAN are presented. The PhAN data were compared with measurements by a differential mobility analyzer.