

УДК 551.501.793

Особенности восстановления микроструктурных параметров аэрозоля из измерений аэрозольной оптической толщины. Часть II. Результаты обращения

В.В. Веретенников, С.С. Меньщикова*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 11.09.2012 г.

Рассмотрены микроструктурные параметры атмосферного аэрозоля, восстановленные из спектральных измерений аэрозольной оптической толщины в летний период в г. Томске. Результаты получены с использованием двух алгоритмов решения обратной задачи, базового и его модификации, представленной в первой части статьи. В базовом алгоритме реализован метод интегральных распределений. Обладая достоинствами метода интегральных распределений, модифицированный алгоритм позволяет повысить точность оценки вклада микродисперсных частиц в микроструктуру аэрозоля. Приведены статистические данные о восстановленных параметрах, полученных для полного ансамбля частиц с разделением на субмикронную и грубодисперсную фракции. Установлено, что применение модифицированного алгоритма позволяет в среднем дополнительно учесть до 47% объема субмикронных частиц. При этом коррекция решения в микродисперсном интервале размеров частиц приводит к уменьшению их среднего радиуса с 0,16 до 0,1 мкм.

Ключевые слова: микроструктура аэрозоля, аэрозольная оптическая толщина, обратные задачи; aerosol microstructure, aerosol optical depth, inverse problem.

Введение

Определение функции распределения аэрозольных частиц по размерам из измерений спектральной прозрачности атмосферы уже давно стало классическим примером некорректных обратных задач атмосферной оптики [1–5]. Известно, что некорректные задачи являются недоопределенными и для их решения необходимо привлекать дополнительную информацию. Различные методы решения некорректных обратных задач отличаются формой и способом учета априорной информации об искомым решении. При решении обратных задач аэрозольного светорассеяния, особенно на первом этапе, широко применялся метод модельных оценок [5–7], который основан на поиске приближенного решения на заданном классе аналитических моделей функций распределения частиц по размерам с неизвестными параметрами.

Метод устойчивого восстановления микроструктурных параметров аэрозоля из характеристик светорассеяния, который базируется на использовании интегральных функций распределения аэрозольных частиц по размерам, предложен в [8, 9]. На его основе авторами [10, 11] разработаны алгоритмы обращения спектральных измерений аэрозольной оптической толщины (АОТ), в которых учитывается низкая информативность обратной зада-

чи относительно частиц из микродисперсного диапазона размеров. С этой целью для описания дисперсного состава аэрозоля предложена гибридная модель, в которой микродисперсные частицы выделены в отдельную фракцию, а за ее пределами применяется метод интегральных распределений. Функция распределения частиц по размерам в микродисперсной области задается в параметрическом виде. Как показали результаты численных экспериментов, это позволяет более точно оценивать вклад микродисперсных частиц в восстанавливаемые параметры аэрозоля.

Представляет интерес оценка эффекта, который достигается за счет использования гибридной модели аэрозоля, при интерпретации данных натуральных экспериментов. В настоящей статье, которая является продолжением работы [11], рассмотрены результаты применения алгоритма обращения [11] к обработке реальных измерений АОТ и на большом массиве экспериментального материала проведено сравнение восстановленных параметров микроструктуры аэрозоля с аналогичными данными, полученными без параметризации функции распределения по размерам микродисперсных частиц.

1. Результаты обращения данных натуральных экспериментов

Рассмотрим результаты обращения экспериментальных данных, полученные с помощью двух алгоритмов: базового, основанного на методе интегральных

* Виктор Васильевич Веретенников (vuv@iao.ru);
Светлана Сергеевна Меньщикова (mss@iao.ru).

распределений [9], и его модификации, в которой применялась гибридная модель микроструктуры аэрозоля [11]. В качестве исходных данных рассматривались среднечасовые зависимости АОТ в спектральном диапазоне 0,37–4 мкм, полученные в ИОА СО РАН С.М. Сакериным и Д.М. Кабановым с помощью солнечного спектрофотометра, расположенного в г. Томске, в летний сезон 2003 г. Общий массив данных содержал около 370 усредненных спектров. Характеризуя оптическое состояние атмосферы, отметим, что в период наблюдений атмосфера отличалась преимущественно высокой прозрачностью. Среднее значение АОТ $\tau(0,55)$ на длине волны $\lambda = 0,55$ мкм составляло 0,15, возрастая до 0,55–0,6 в отдельных случаях дымовых ситуаций.

В качестве параметров, которые характеризовали микроструктуру аэрозоля, рассматривались объемная концентрация, геометрическое сечение и средний радиус частиц, содержащихся в вертикальном столбе атмосферы единичной площади. Указанные параметры оценивались как для полного ансамбля частиц, так и для отдельных фракций аэрозоля — субмикронной (м) и грубодисперсной (г). Условная граница между фракциями считалась фиксированной и равной, согласно оценкам [12], 0,55 мкм.

Комплексный показатель преломления рассматривался одинаковым для обеих фракций и постоянным по спектру. Допустимость такого приближения была оценена в [11]. Априорно выбранное значение показателя преломления равно $1,5 - i \cdot 0$. При необходимости оценки параметров микроструктуры для других значений показателя преломления можно воспользоваться соотношениями подобия [11] для рассеивающих сред, эквивалентных по спектральному ослаблению.

2. Объемная концентрация аэрозоля

На рис. 1–3 представлены результаты восстановления объемной концентрации частиц, полученные за период наблюдений для субмикронной $V^{(м)}$ и грубодисперсной $V^{(г)}$ фракций, а также для их суммы $V = V^{(м)} + V^{(г)}$. Значения по оси абсцисс на рис. 1–3, а определяют порядковые номера реализаций в массиве данных. Кривые 1 восстановлены с помощью базового алгоритма [9] (алгоритм В). Эффект от применения представленного в [11] модифицированного алгоритма (алгоритм М) с использованием гибридной модели микроструктуры аэрозоля демонстрируют кривые 2.

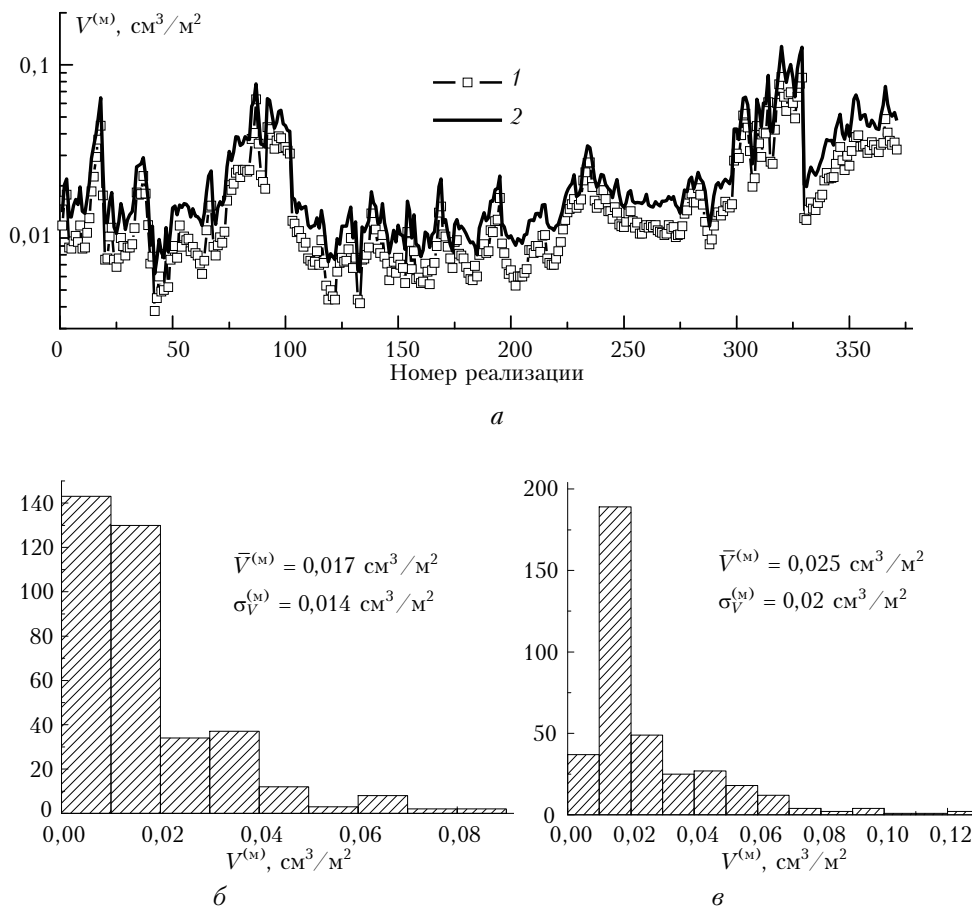


Рис. 1. Временные ряды объемной концентрации $V^{(м)}$ субмикронного аэрозоля (а) и их гистограммы (б, в), восстановленные по данным обращения среднечасовых измерений АОТ с использованием алгоритмов В (кривая 1, гистограмма (б)) и М (кривая 2, гистограмма (в))

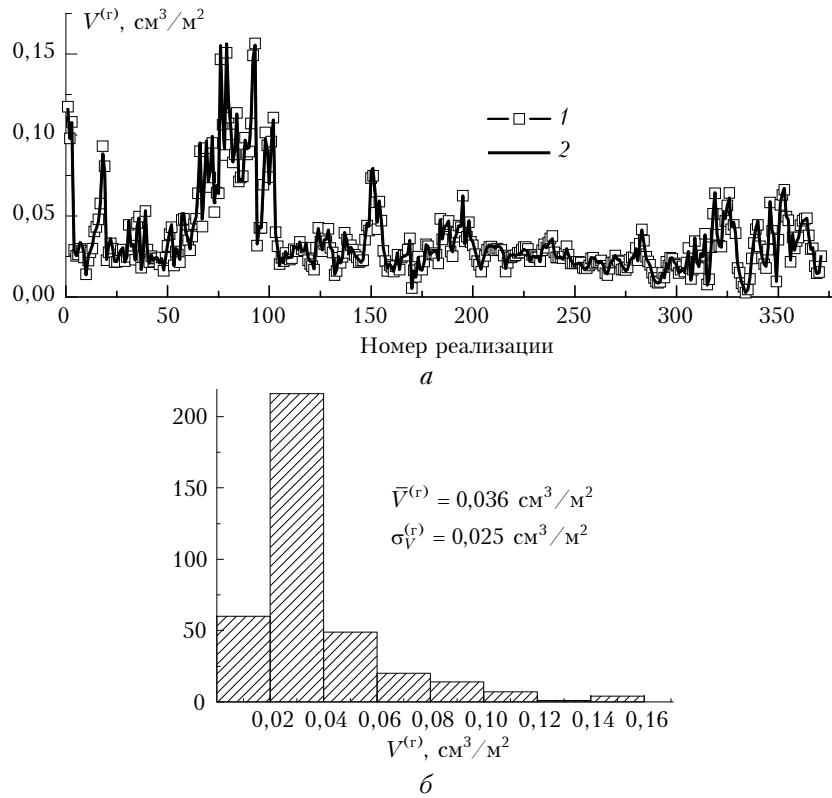


Рис. 2. Временные ряды объемной концентрации $V^{(r)}$ грубодисперсного аэрозоля (*a*), восстановленные по данным обращения среднечасовых измерений АОТ с использованием алгоритмов *B* (кривая 1) и *M* (кривая 2); гистограмма распределения $V^{(r)}$ для кривой 2 (*b*)

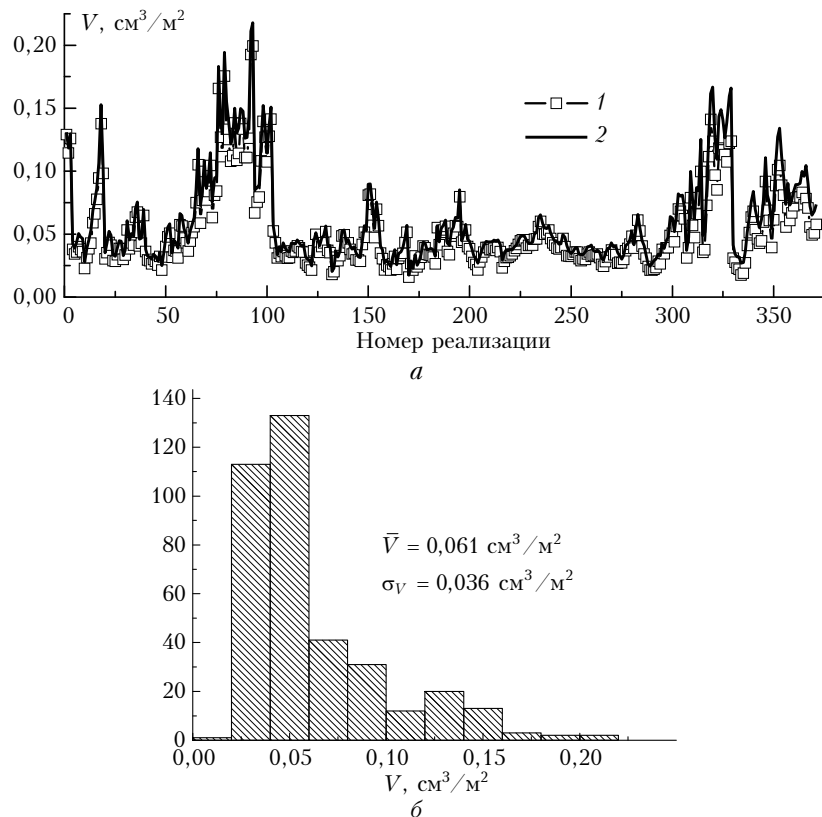


Рис. 3. Временные ряды суммарной объемной концентрации $V = V^{(s)} + V^{(r)}$ частиц (*a*), восстановленные по данным обращения среднечасовых измерений АОТ с использованием алгоритмов *B* (кривая 1) и *M* (кривая 2); гистограмма распределения V для кривой 2 (*b*)

Из представленных данных видно, что применение модифицированного алгоритма приводит, в первую очередь, к общему повышению уровня восстановленной концентрации частиц м-фракции (см. рис. 1, *a*) на протяжении всего периода наблюдений. При этом среднее значение объемной концентрации $\bar{V}^{(m)}$ возросло с 0,017 до 0,025 $\text{см}^3/\text{м}^2$, или на 47%. Стандартное отклонение $\sigma_V^{(m)}$ также увеличилось с 0,014 до 0,02 $\text{см}^3/\text{м}^2$ пропорционально росту среднего значения $\bar{V}^{(m)}$. Интересно отметить, что относительная изменчивость объемной концентрации м-фракции, характеризуемая отношением $\sigma_V^{(m)}/\bar{V}^{(m)}$, составляет 80% и близка к относительной вариации АОТ $\tau(0,55)$, равной 77%.

Более детальную информацию о структуре и изменчивости данных об объемной концентрации частиц м-фракции дает анализ гистограмм распределения ее значений за период наблюдений, восстановленных с помощью двух рассмотренных алгоритмов (см. рис. 1, *b*, *в*). Видно, что обе гистограммы имеют унимодальный асимметричный вид, причем в каждом случае наибольшее число реализаций попадает в первый и второй интервалы. Однако при переходе к модифицированному алгоритму происходит значительное уменьшение числа реализаций, принадлежащих первому интервалу, с 39 до 10% при одновременном их увеличении с 35 до 51% во втором интервале. В результате второй интервал становится определяющим для наиболее вероятных значений $V^{(m)}$.

Безотносительно к использованному алгоритму обращения на временной зависимости $V^{(m)}$ можно выделить характерные области. Например, с 20 июля по 1 августа ($N = 50 \div 100$) выделяется широкий пик, а после него наступает стабильный период, в течение которого $V^{(m)}$ претерпевает небольшие осцилляции в окрестности среднего значения. Затем начиная с 15 августа ($N = 200$) вновь наблюдается нарастание объемной концентрации частиц м-фракции, максимальное значение которой достигает 0,13 $\text{см}^3/\text{м}^2$. Примечательно, что в указанные периоды наблюдения высокого содержания частиц м-фракции в окрестности Томска отмечалось появление дымового аэрозоля лесных пожаров. Увеличение концентрации частиц м-фракции в условиях дымовых ситуаций было отмечено в ряде работ и ранее [13, 14].

На рис. 2, *a* изображен временной ход объемной концентрации грубодисперсной фракции $V^{(r)}$. Из приведенных данных следует, что результаты, полученные с использованием двух различных алгоритмов, являются близкими и различия между ними заключены в пределах погрешности вычислений. Поэтому дальнейший анализ будет относиться к зависимости, представленной кривой 2 на рис. 2, *a*, полученной с использованием модифицированного алгоритма. Как и в случае с зависимостью $V^{(m)}$, повышенное содержание частиц г-фракции наблюдалось в период с 20 июля по 1 августа ($N = 50 \div 100$), однако рост $V^{(r)}$ после 15 августа ($N = 200$), в отличие от зависимости $V^{(m)}$, не отмечен.

Сравнение кривых, представленных на рис. 1, *a* и 2, *a*, показывает, что в суммарном объеме частиц г-фракция играет доминирующую роль в подавляющем числе наблюдений, за исключением дымовых ситуаций. Отношение между средними значениями объемных концентраций $\bar{V}^{(r)}/\bar{V}^{(m)}$ равно 1,44. Относительная изменчивость объемной концентрации г-фракции $\sigma_V^{(r)}/\bar{V}^{(r)}$ составляет 69% и практически совпадает с вариацией АОТ $\tau(1,052)$. На рис. 2, *b* приведена гистограмма распределения восстановленных значений концентрации частиц грубодисперсной фракции $V^{(r)}$. Так же как и в случае субмикронной фракции, гистограмма имеет унимодальную асимметричную форму. Наиболее вероятные значения $V^{(r)}$ (58%) заключены в интервале 0,02–0,04 $\text{см}^3/\text{м}^2$.

На рис. 3 представлены временной ряд суммарной объемной концентрации аэрозоля $V = V^{(m)} + V^{(r)}$ и соответствующая ему гистограмма распределения. Дополнительный учет микродисперсных частиц в суммарном объеме проявился в увеличении среднего значения \bar{V} от 0,053 до 0,061 $\text{см}^3/\text{м}^2$, или на 15%. Кроме того, изменилась относительная доля частиц м-фракции в общем объеме аэрозоля от 33 до 41%. Из представленной на рис. 3, *b* гистограммы видно, что наиболее вероятной является объемная концентрация аэрозольных частиц V в интервале значений 0,04–0,06 $\text{см}^3/\text{м}^2$.

Рис. 4 позволяет более детально проанализировать совместное изменение параметров $V^{(m)}$, $V^{(r)}$ и V в течение одного дня в условиях чистой и задымленной атмосферы. Из представленных данных видно, что модификация алгоритма решения обратной задачи приводит к систематическому смещению временного хода параметра $V^{(m)}$ (кривые 1, 1') без влияния на содержание грубодисперсных частиц (кривые 2, 2'). Основные различия в результатах, полученных в разные дни, очевидно, заключаются, во-первых, в существенном увеличении объемной концентрации частиц обеих фракций при поступлении дыма в атмосферу. Во-вторых, изменяется баланс между вкладом фракций в суммарном объеме частиц, в котором субмикронный аэрозоль начинает превалировать в условиях задымления атмосферы.

Дополнительное представление о взаимном отношении объемных концентраций частиц м- и г-фракций в период наблюдений дает рис. 5, на котором изображены среднесуточные значения $V^{(m)}$, $V^{(r)}$ и V , полученные в течение августа 2003 г. Вертикальной отсечкой на кривых отмечено стандартное отклонение восстановленных параметров для соответствующего дня. Как видно из рис. 5, до середины августа концентрация субмикронного аэрозоля $V^{(m)}$ (кривая 1) изменяется слабо, принимая значения на уровне примерно вдвое ниже среднего (0,01 $\text{см}^3/\text{м}^2$). При этом в суммарном объеме аэрозоля преобладают грубодисперсные частицы. Затем начиная с 15 августа концентрация частиц м-фракции постепенно увеличивается при одновременном уменьшении объема частиц г-фракции и к 18 августа содержание частиц двух фракций выравнивается.

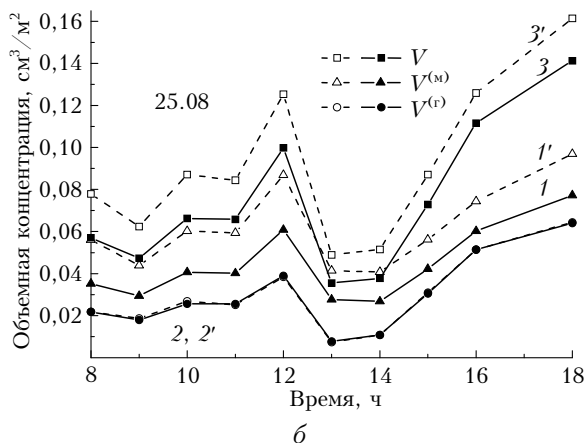
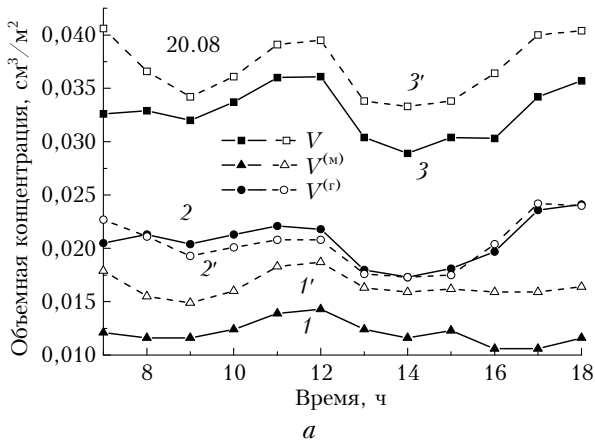


Рис. 4. Примеры дневного хода параметров $V^{(m)}$ (1, 1'), $V^{(r)}$ (2, 2') и V (3, 3'), восстановленных с использованием алгоритмов B (1–3) и M (1'–3'); a – чистая атмосфера; b – задымленная атмосфера

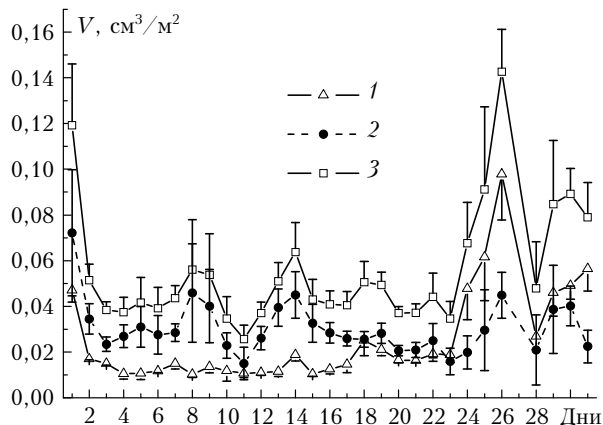


Рис. 5. Изменчивость в течение августа среднесуточных значений объемной концентрации аэрозоля V (3) с разделением на субмикронную $V^{(m)}$ (1) и грубодисперсную $V^{(r)}$ (2) фракции

Отмеченное состояние сохраняется в течение 5 дней, а с 23 августа концентрация субмикронного аэрозоля начинает резко увеличиваться и превосходит концентрацию грубодисперсного аэрозоля, которая также возрастает, хотя и с меньшей скоростью.

По данным наблюдений начиная с 24 августа в атмосфере региона отмечено появление дымового

аэрозоля, которое сопровождается процессом увеличения объема частиц м-фракции. Однако приведенные на рис. 5 результаты указывают, что этот процесс начался примерно на неделю раньше. Поэтому возможно, что мониторинг микроструктурных параметров аэрозоля, включая изменение его субмикронной фракции, будет полезен для более раннего предсказания задымления атмосферы в результате лесных пожаров.

Анализ данных, представленных на рис. 5, позволяет сделать заключение о роли временных факторов разного масштаба в изменчивости объемной концентрации аэрозоля. С этой целью воспользуемся разложением полной дисперсии σ_V^2 на составляющие в следующем виде [15]:

$$\sigma_V^2 = \langle \sigma_{V_i}^2 \rangle + \sigma_{\bar{V}}^2, \quad (1)$$

где $\sigma_{V_i}^2$ – дисперсия объемной концентрации аэрозоля, полученная для i -го дня наблюдений; первое слагаемое $\langle \sigma_{V_i}^2 \rangle$ – среднее арифметическое дисперсий $\sigma_{V_i}^2$, взвешенных по объемам дневных выборок, определяет внутрисуточную изменчивость объемной концентрации V ; второе слагаемое $\sigma_{\bar{V}}^2$ – дисперсия взвешенных дневных средних \bar{V}_i относительно общего среднего \bar{V} , определяет межсуточную изменчивость объемной концентрации V . Результаты расчета соответствующих средних квадратических отклонений для объемных концентраций V , $V^{(m)}$, $V^{(r)}$ приведены в табл. 1.

Таблица 1

Факторы внутрисуточной $[\langle \sigma_{V_i}^2 \rangle]^{1/2}$ и межсуточной изменчивости $\sigma_{\bar{V}}$ в разложении стандартного отклонения σ_V для V , $V^{(m)}$, $V^{(r)}$

Объемная концентрация	σ_V	$[\langle \sigma_{V_i}^2 \rangle]^{1/2}$	$\sigma_{\bar{V}}$
V	0,0303	0,0139	0,0269
$V^{(m)}$	0,0218	0,0068	0,0207
$V^{(r)}$	0,0152	0,0101	0,0113

Как видно из табл. 1, в изменчивости суммарной концентрации V и ее субмикронной составляющей $V^{(m)}$ ведущую роль играют факторы межсуточного масштаба. Возможно, на этот вывод повлияло поступление в атмосферу дымового аэрозоля в конце месяца. Более детальный анализ данного вопроса выходит за рамки настоящей статьи. Внутрисуточная и межсуточная изменчивость концентрации грубодисперсной фракции аэрозоля $V^{(r)}$ примерно одинакова.

3. Средний радиус частиц

Временные ряды значений среднего радиуса для полного ансамбля частиц и отдельных фракций аэрозоля, восстановленные с использованием двух алгоритмов, представлены на рис. 6–8.

Из приведенных данных следует, что изменение функции распределения частиц по размерам, обусловленное дополнительным учетом микродисперсных частиц, приводит в первую очередь к существенному уменьшению среднего радиуса $\bar{r}_s^{(m)}$

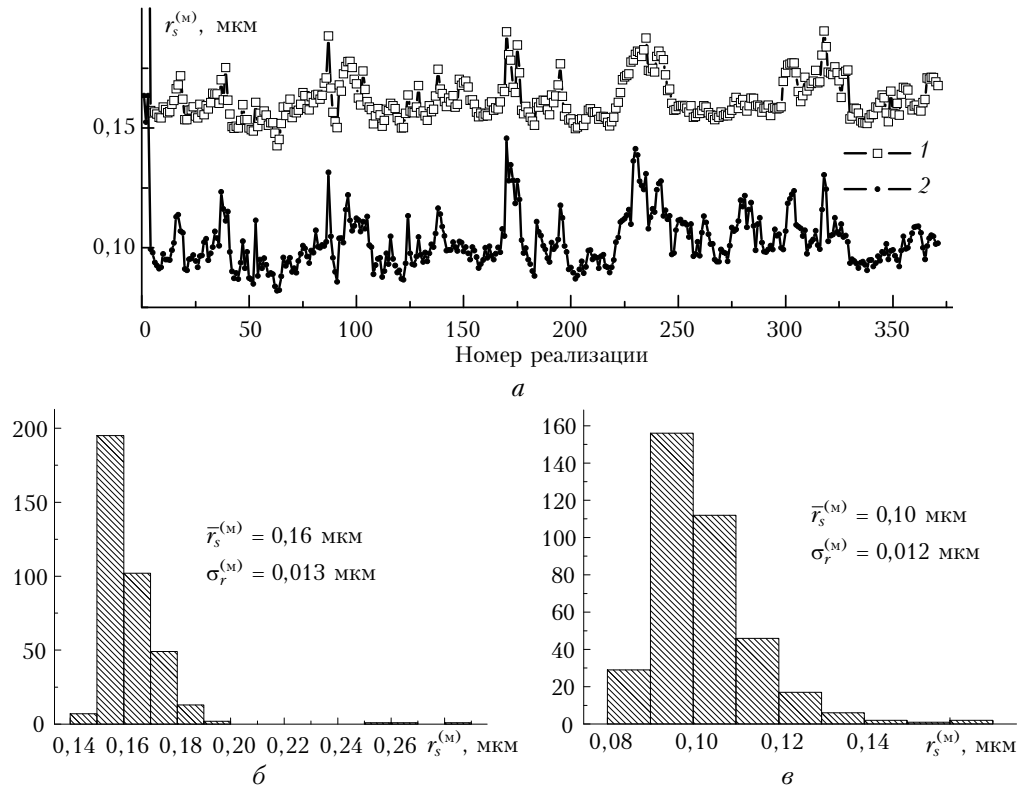


Рис. 6. Временные ряды среднего радиуса субмикронных частиц $r_s^{(m)}$ (а) и их гистограммы (б, е), восстановленные по данным обращения среднечасовых измерений АОТ с использованием алгоритмов В (кривая 1, гистограмма (б)) и М (кривая 2, гистограмма (е))

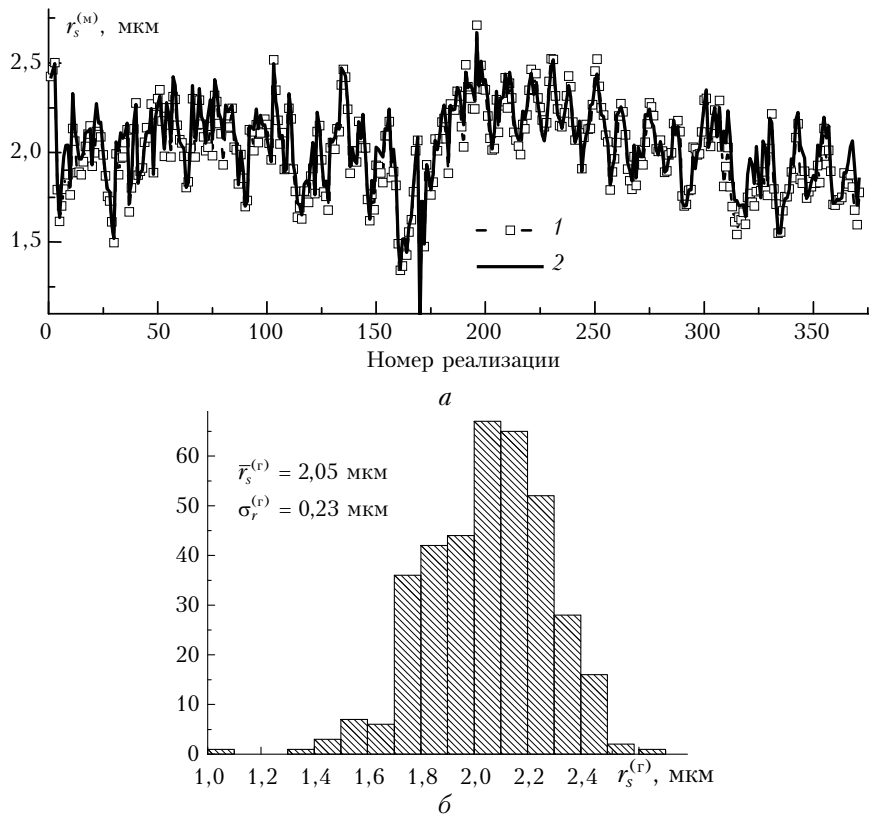


Рис. 7. Временные ряды среднего радиуса грубодисперсных частиц $r_s^{(r)}$, восстановленные по данным обращения среднечасовых измерений АОТ (а) с использованием алгоритмов В (кривая 1) и М (кривая 2); гистограмма распределения $r_s^{(r)}$ (б)

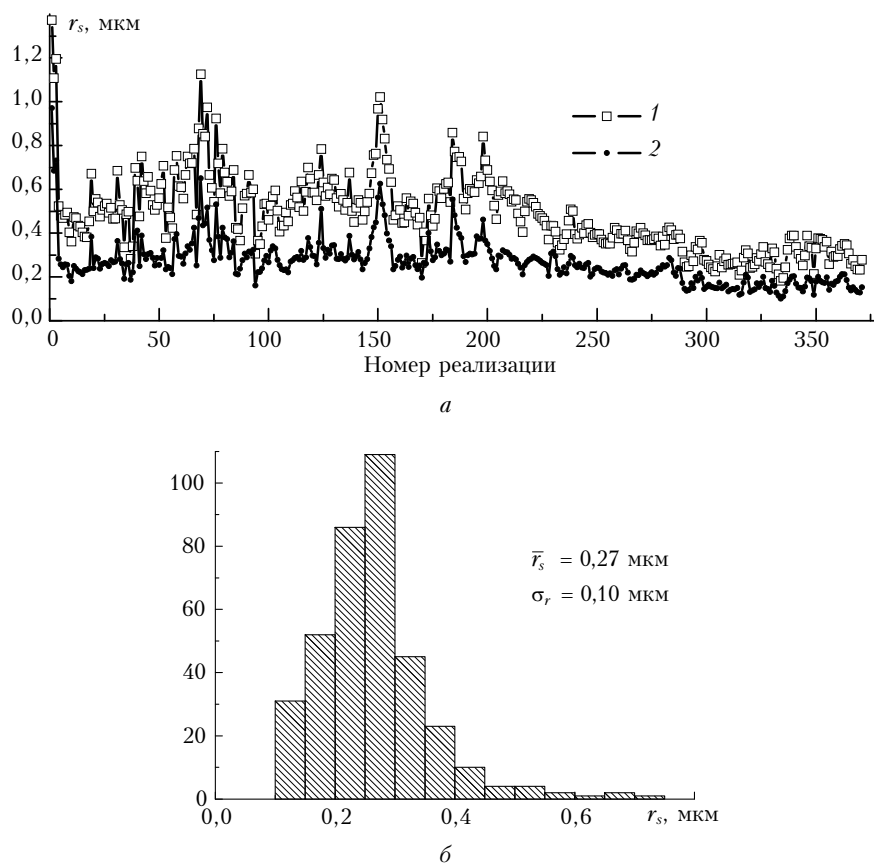


Рис. 8. Временные ряды среднего радиуса частиц r_s (а), восстановленные по данным обращения среднечасовых измерений АОТ с использованием алгоритмов В (кривая 1) и М (кривая 2); гистограмма распределения r_s для кривой 2 (б)

частиц м-фракции от 0,16 до 0,10 мкм. Наиболее вероятные значения $r_s^{(м)}$ (72%), восстановленные с помощью модифицированного алгоритма, заключены в интервале 0,09–0,11 мкм. При этом стандартное отклонение $\sigma_r^{(м)}$ практически не зависит от выбранного алгоритма и равно около 0,012 мкм.

Что же касается среднего радиуса г-фракции $r_s^{(г)}$, изменчивость которого в период наблюдений представлена на рис. 7, а, то в этом случае выбор алгоритма обращения слабо влияет на результаты восстановления. Это результат аналогичен выводу, полученному в отношении другого, ранее рассмотренного параметра $V^{(г)}$. Среднее значение $\bar{r}_s^{(г)}$ за период наблюдений и стандартное отклонение равны 2,05 и 0,23 мкм соответственно. Отметим также, что гистограмма распределения значений $r_s^{(г)}$ (рис. 7, б) имеет отрицательную асимметрию в отличие от гистограммы, построенной для среднего радиуса м-фракции $r_s^{(м)}$ (рис. 6, в).

Последний микроструктурный параметр, который предстоит рассмотреть, это средний радиус для полного ансамбля частиц r_s , временной ход которого показан на рис. 8, а. Видно, что модификация алгоритма обращения приводит к уменьшению восстановленных значений r_s . Такое уменьшение можно характеризовать значением среднего по всему периоду наблюдений \bar{r}_s , которое изменилось от 0,48 до 0,27 мкм. Как следует из гистограммы рас-

пределения r_s , приведенной на рис. 8, б, в интервал 0,2–0,3 мкм попадает более половины всех реализаций (53%).

Анализ временного хода r_s показывает, что после 15 августа ($N = 200$) наблюдается стабильное уменьшение среднего радиуса r_s в отличие от поведения зависимостей $r_s^{(м)}$ и $r_s^{(г)}$. Данный тренд обусловлен преимущественно повышением содержания частиц м-фракции в указанный период, что было отмечено ранее (см. рис. 1, а и рис. 5), и соответствующей трансформацией функции распределения частиц по размерам полного ансамбля частиц.

Зависимости, представленные на рис. 9, дополняют данные рис. 4, иллюстрируя поведение параметров $r_s^{(м)}$, $r_s^{(г)}$ и r_s в течение одного дня в отсутствие (а) и при наличии (б) дыма в атмосфере. Из сравнения рис. 4 и 9 видно, что независимо от использованного алгоритма обращения средний радиус частиц является более стабильным микроструктурным параметром по сравнению с объемной концентрацией аэрозоля. Это особенно заметно в отношении частиц м-фракции. Эффект коррекции решения обратной задачи, наблюдаемый на однодневном временном интервале, согласуется с результатами, установленными ранее для всего периода наблюдений.

Из сравнения результатов, полученных с помощью модифицированного алгоритма в разные дни, видно, что значения среднего радиуса субмикронных

частиц (~0,1 мкм) (кривые 1') близки к значению среднего радиуса $\bar{r}_s^{(m)}$ для всего временного ряда. Переход от чистой атмосферы к задымленной сопровождается уменьшением среднего радиуса частиц как для γ -фракции (кривые 2'), так и для полного ансамбля в целом (кривые 3'). В случае полного ансамбля соответствующие значения r_s уменьшаются в среднем от 0,22 до 0,15 мкм, что существенно ниже среднего \bar{r}_s по всему периоду наблюдений (0,27 мкм).

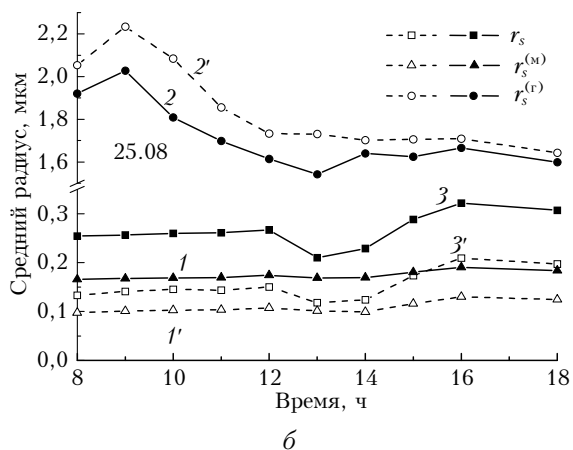
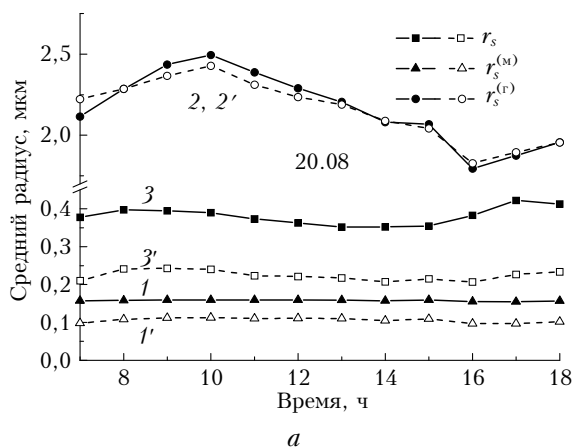


Рис. 9. Примеры дневного хода параметров $r_s^{(m)}$ (1, 1'), $r_s^{(r)}$ (2, 2') и r_s (3, 3'), восстановленных с использованием алгоритмов В (1–3) и М (1'–3'); а – чистая атмосфера, б – задымленная

Далее рассмотрим временной ход среднесуточных значений параметров $r_s^{(m)}$, $r_s^{(r)}$ и r_s в течение августа 2003 г., представленный на рис. 10. Зависимости, изображенные на рис. 10, получены с использованием модифицированного алгоритма и служат дополнением к усредненным зависимостям объемных концентраций $V^{(m)}$, $V^{(r)}$ и V , показанным на рис. 5.

Из рис. 10 следует, что усредненная временная зависимость $r_s^{(m)}$ (кривая 1) не обнаруживает заметной межсуточной изменчивости в отличие от кривой 2, отображающей поведение среднего радиуса грубодисперсных частиц $r_s^{(r)}$. На кривой 2 можно выделить два участка с отрицательным трендом. Первый участок располагается с начала

месяца до 11 августа, а второй – с 14 августа до конца месяца. На втором участке параметр $r_s^{(r)}$ изменяется в пределах от 2,37 до 1,83 мкм. Примечательно, что согласно данным рис. 5 второй участок примерно соответствует области, в которой происходит рост объемной концентрации частиц субмикронной фракции $V^{(m)}$. Результатом взаимодействия всех рассмотренных факторов является уменьшение в период с 13 по 31 августа среднего радиуса r_s всех частиц с 0,4 до 0,14 мкм.

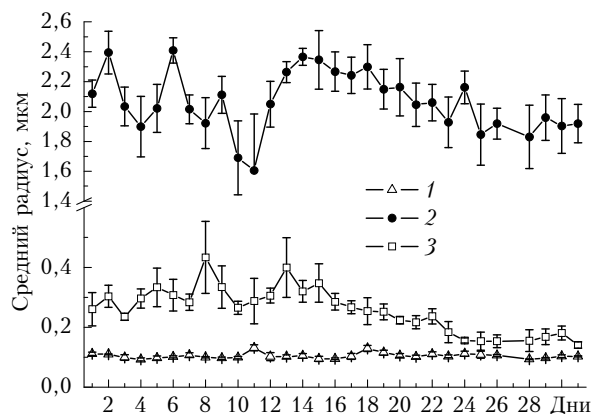


Рис. 10. Изменчивость в течение августа среднесуточных значений микроструктурных параметров $r_s^{(m)}$ (1), $r_s^{(r)}$ (2) и r_s (3)

Чтобы оценить роль внутри- и межсуточных масштабов в изменчивости параметров r_s , $r_s^{(m)}$ и $r_s^{(r)}$, для каждого из них были определены: полная дисперсия σ_r^2 ; среднее арифметическое $\langle \sigma_r^2 \rangle$ взвешенных дисперсий σ_{ri}^2 , рассчитанных для i -го дня наблюдений; дисперсия $\sigma_{\bar{r}}^2$ взвешенных дневных средних \bar{r}_{si} относительно общего среднего \bar{r}_s . Указанные дисперсии связаны между собой соотношением, аналогичным формуле (1), и имеют следующий смысл: слагаемые $\langle \sigma_r^2 \rangle$ и $\sigma_{\bar{r}}^2$ определяют в суммарной дисперсии вклад, обусловленный внутрисуточной и межсуточной изменчивостью среднего радиуса аэрозольных частиц.

В табл. 2 приведены значения средних квадратических отклонений σ_r , $[\langle \sigma_r^2 \rangle]^{1/2}$ и $\sigma_{\bar{r}}$, рассчитанных по данным рис. 10 для каждого из микроструктурных параметров r_s , $r_s^{(m)}$ и $r_s^{(r)}$.

Таблица 2
Факторы внутрисуточной $[\langle \sigma_r^2 \rangle]^{1/2}$ и межсуточной изменчивости $\sigma_{\bar{r}}$ в разложении стандартного отклонения σ_r для r_s , $r_s^{(m)}$ и $r_s^{(r)}$

Средний радиус	σ_r	$[\langle \sigma_r^2 \rangle]^{1/2}$	$\sigma_{\bar{r}}$
r_s	0,084	0,041	0,073
$r_s^{(m)}$	0,0106	0,0065	0,0083
$r_s^{(r)}$	0,239	0,156	0,181

Анализируя данные, представленные в табл. 2, можно отметить, что стандартные отклонения, обусловленные межсуточной и внутрисуточной измен-

чивостью, являются близкими для каждого из рассмотренных параметров при некотором преобладании межсуточной изменчивости.

Указанное преобладание факторов межсуточно-го масштаба в большей степени отразилось на изменчивости среднего радиуса r_s для полного ансамбля частиц и в минимальной степени — на изменчивости среднего радиуса $r_s^{(r)}$ частиц грубодисперсной фракции. Для сравнения напомним, что для объемной концентрации грубодисперсной фракции аэрозоля $V^{(r)}$ внутрисуточная и межсуточная изменчивость играет примерно одинаковую роль.

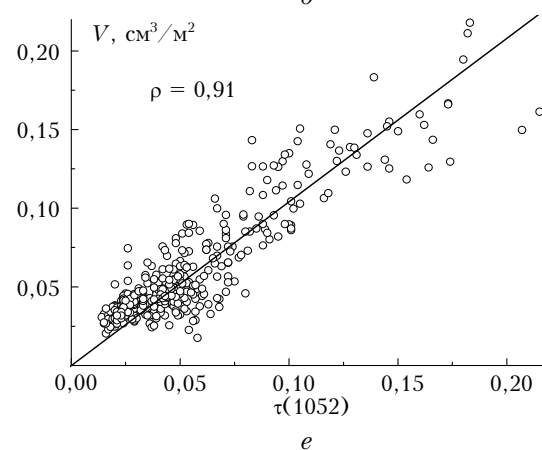
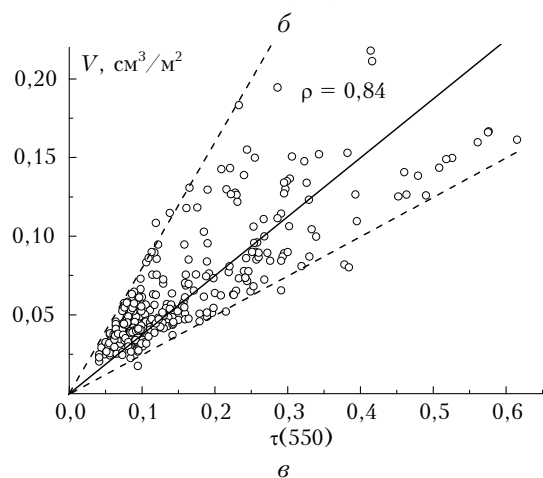
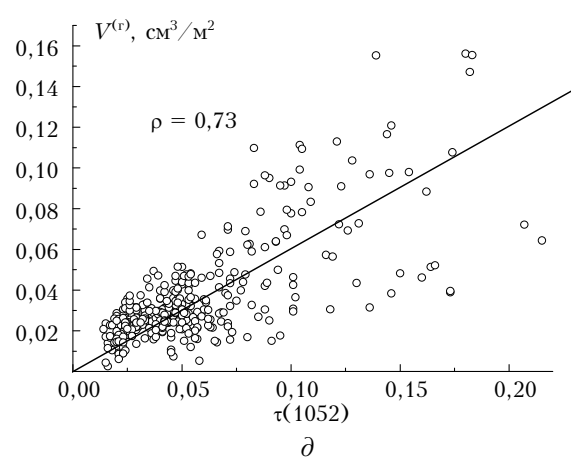
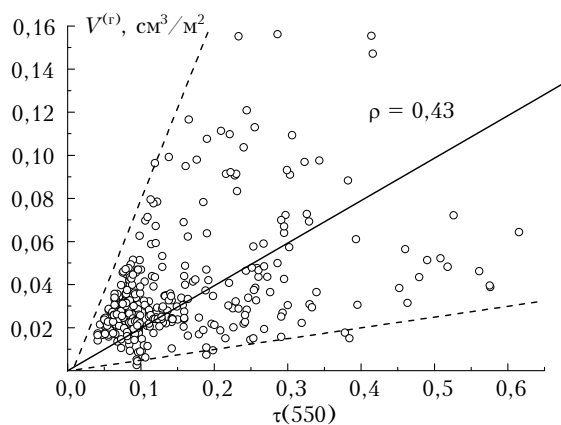
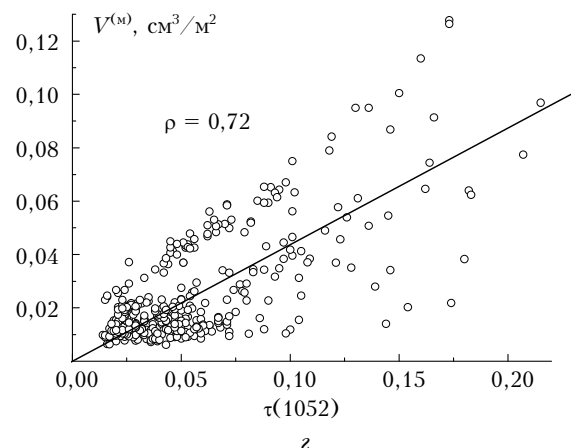
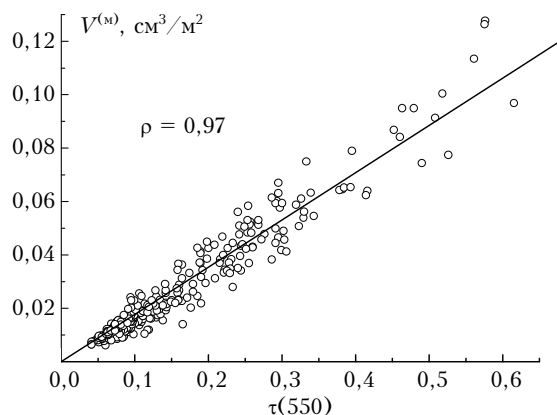


Рис. 11. Диаграммы рассеяния измерений АОТ $\tau(\lambda)$ и восстановленных значений объемной концентрации субмикронной $V^{(m)}$ (а, з), грубодисперсной $V^{(r)}$ (б, д) фракций аэрозоля и их суммы V (е, е) при $\lambda = 0,55$ мкм (а–в) и $1,052$ мкм (з–е)

4. Статистические связи

В заключение рассмотрим статистические связи между измерениями АОТ и микроструктурными параметрами, восстановленными в результате решения обратной задачи.

На рис. 11 представлены диаграммы рассеяния, на которых ось абсцисс соответствует среднечасовым значениям АОТ $\tau(\lambda_i)$ на фиксированной длине волны $\lambda_1 = 0,55$ мкм (а, б, в) и $\lambda_2 = 1,052$ мкм (з, д, е), а по оси ординат указаны восстановленные значения объемных концентраций $V^{(m)}$, $V^{(r)}$ и V .

Прямые линии на рис. 11 определяют линейную регрессию параметров $V^{(m)}$, $V^{(r)}$ и V по $\tau(\lambda_i)$.

Для представленных на рис. 11 данных в табл. 3 приведены соответствующие значения коэффициента корреляции ρ , коэффициента регрессии b и его стандартной ошибки σ_b . Также в табл. 3 указаны статистические параметры σ и σ – стандартные отклонения восстановленных значений объемных концентраций $V^{(m)}$, $V^{(r)}$ и V относительно их общих средних и от рассчитанных по уравнению регрессии соответственно.

Как следует из данных табл. 3 и рис. 11, для длины волны $\lambda_1 = 0,55$ мкм наибольшая корреляция (0,97) имеет место между АОТ и объемной концентрацией субмикронного аэрозоля $V^{(m)}$. Коэффициент регрессии $b^{(m)} = 0,177$ ($\text{см}^3/\text{м}^2$) в оценке параметра $V^{(m)} = b^{(m)}\tau(0,55)$ обеспечивает среднюю квадратическую ошибку $\sigma^{(m)} = 0,005$ $\text{см}^3/\text{м}^2$, которая существенно ниже стандартного отклонения $\sigma^{(m)} = 0,02$ $\text{см}^3/\text{м}^2$.

Таблица 3

Оценки параметров регрессии по $\tau(\lambda)$ объемных концентраций $V^{(m)}$, $V^{(r)}$ и V для $\lambda = 0,55$ и $1,052$ мкм

Объемная концентрация	ρ	b	σ_b	σ	σ
$V^{(m)}$ [$\tau(0,55)$]	0,97	0,177	0,001	0,020	0,005
$V^{(r)}$ [$\tau(0,55)$]	0,43	0,197	0,007	0,025	0,026
V [$\tau(0,55)$]	0,84	0,374	0,007	0,036	0,023
$V^{(m)}$ [$\tau(1,052)$]	0,72	0,437	0,011	0,020	0,014
$V^{(r)}$ [$\tau(1,052)$]	0,73	0,603	0,014	0,025	0,018
V [$\tau(1,052)$]	0,91	1,04	0,013	0,036	0,017

Это позволяет оперативно и с высокой надежностью оценивать объемную концентрацию субмикронного аэрозоля в столбе атмосферы по измерениям оптической толщины $\tau(\lambda)$ на длине волны $\lambda = 0,55$ мкм, минуя этап решения обратной задачи. Понятно, что данный вывод справедлив для условий, аналогичных тем, при которых получен обработанный массив экспериментальных данных.

При переходе к г-фракции статистическая связь концентрации частиц с АОТ $\tau(0,55)$ ослабевает и коэффициент корреляции ρ уменьшается до 0,43. В этом случае ошибка регрессии $\sigma^{(r)}$ практически не отличается от величины стандартного отклонения $\sigma^{(r)} = 0,025$ $\text{см}^3/\text{м}^2$.

В случае объединенного ансамбля частиц м- и г-фракций коэффициент корреляции ρ и АОТ $\tau(0,55)$ равен 0,84 и заключен между соответствующими значениями коэффициентов корреляции для отдельных фракций. При этом стандартное отклонение σ восстановленных значений объемной концентрации V от значений, рассчитанных из уравнения регрессии, составляет 0,54 относительно σ .

Данные, представленные на рис. 11 и в табл. 3, позволяют оценить влияние длины волны предикторной переменной $\tau(\lambda)$ на ее статистические связи с объемной концентрацией аэрозоля. Для сравнения

значение второй длины волны $\lambda_2 = 1,052$ мкм выбрано в ближней ИК-области спектра, в которой возрастает влияние грубодисперсного аэрозоля, а оптическая активность субмикронных частиц заметно снижается. Как видно из табл. 3, при переходе от $\lambda_1 = 0,55$ мкм к большей длине волны $\lambda_2 = 1,052$ мкм наблюдается существенное увеличение коэффициента корреляции между АОТ и $V^{(r)}$ – до 0,73. При этом корреляция между АОТ и $V^{(m)}$ понижается ($\rho = 0,72$), но сохраняется достаточно высокой. Однако в отличие от предыдущего случая при объединении субмикронных и грубодисперсных частиц в единый ансамбль коэффициент корреляции между АОТ $\tau(1,052)$ и V оказался больше, чем коэффициенты корреляции для отдельных фракций ($\rho = 0,91$).

Отмеченная тенденция сохраняется при дальнейшем сдвиге длины волны к правой границе спектрального интервала. Например, коэффициенты корреляции между АОТ $\tau(1,557)$ и объемными концентрациями частиц $V^{(m)}$, $V^{(r)}$ и V соответственно равны 0,54; 0,92 и 0,93.

Корреляционные связи АОТ $\tau(\lambda_i)$ со средним радиусом частиц, в отличие от связи с объемной концентрацией аэрозоля, выражены слабо как для полного ансамбля частиц, так и для отдельных фракций. Во всех рассмотренных случаях при вариациях длины волны значение коэффициента корреляции не превышало 0,34. Коэффициенты корреляции между одноименными микроструктурными параметрами различных фракций аэрозоля принимают также невысокие значения (менее 0,3).

Заключение

В статье рассмотрены результаты восстановления микроструктурных параметров атмосферного аэрозоля из спектральных измерений АОТ, полученные с использованием двух алгоритмов решения обратной задачи, базового и его модификации, представленной в первой части статьи. В базовом алгоритме реализован метод интегральных распределений. Отличие модифицированной версии заключается в использовании параметрического подхода при описании функции распределения по размерам микродисперсной фракции аэрозоля. Обладая достоинствами метода интегральных распределений, новый алгоритм позволяет повысить точность оценки вклада микродисперсных частиц в микроструктуру аэрозоля.

Исходными данными при решении обратной задачи являлись среднечасовые спектральные зависимости АОТ, полученные в летний период в г. Томске. Микроструктура аэрозоля характеризовалась такими интегральными параметрами, как объемная концентрация, геометрическое сечение и средний радиус частиц. Оценка микроструктурных параметров проводилась для полного ансамбля частиц, а также для его субмикронной и грубодисперсной фракций.

В результате установлено, что применение модифицированного алгоритма к обработке спектраль-

ных измерений АОТ позволяет в среднем дополнительно учесть до 47% объема субмикронных частиц. При этом коррекция решения в микродисперсном интервале размеров частиц приводит к уменьшению их среднего радиуса с 0,16 до 0,1 мкм.

В большинстве наблюдений основной вклад в суммарный объем аэрозоля вносит грубодисперсная фракция частиц. Средняя за период наблюдений объемная концентрация частиц г-фракции равна $0,036 \text{ см}^3/\text{м}^2$, что в 1,44 раза превышает объемное содержание субмикронных частиц. Исключения составляют случаи задымленной атмосферы, когда на фоне роста объемной концентрации частиц обеих фракций субмикронный аэрозоль становится преобладающим. Средние радиусы частиц г-фракции и полного ансамбля равны соответственно 2,05 и 0,27 мкм.

Анализ дисперсии временных рядов восстановленных микроструктурных параметров показал, что доминирующими в их изменчивости являются факторы межсуточного масштаба по отношению к внутрисуточной изменчивости. В наибольшей степени это отразилось на поведении параметров субмикронной фракции и объединенного ансамбля частиц.

Также исследованы статистические связи между АОТ и восстановленными микроструктурными параметрами. Коэффициент корреляции между суммарной концентрацией и АОТ изменяется в диапазоне 0,84–0,91 без существенной спектральной зависимости в видимой и ближней ИК-области. Напротив, корреляция концентрации отдельных фракций и АОТ имеет выраженную спектральную зависимость. В рассматриваемой спектральной области коэффициент корреляции убывает от 0,97 до 0,54 в случае субмикронной фракции и возрастает от 0,43 до 0,92 в случае грубодисперсной фракции. Существенной корреляции между АОТ и размерами частиц не обнаружено.

Рассмотренные статистические характеристики и связи могут послужить основой для углубленного статистического анализа результатов интерпретации экспериментальных данных [16]. Представленные результаты свидетельствуют о возможности более содержательной интерпретации многочисленных экспериментов при исследовании влияния различных факторов на спектральную прозрачность атмосферы [17–20] с использованием модифицированного алгоритма решения обратной задачи.

Авторы признательны С.М. Сакерину и Д.М. Кабанову за предоставленные для анализа экспериментальные данные и В.Н. Ужегову за полезные замечания.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (Государственный контракт № 14.515.11.0030, Соглашение № 8325).

1. Шифрин К.С., Перельман А.Я. Определение спектра частиц дисперсной системы по данным о ее прозрачности // Оптика и спектроскопия. 1963. Т. 15, вып. 4–6. С. 533–542.

2. Yamamoto G., Tanaka M. Determination of aerosol size distribution from spectral attenuation measurements // Appl. Opt. 1969. V. 8, N 2. P. 447–453.
3. Костин Б.С., Наац И.Э. Определение спектра размеров аэрозольных частиц из оптических измерений методами регуляризации // Лазерное зондирование атмосферы. М.: Наука, 1976. С. 94–98.
4. Макиенко Э.В., Наац И.Э. Об одном алгоритме для обращения спектральных оптических измерений // Вопросы лазерного зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1976. С. 115–121.
5. Наац И.Э. Теория многочастотного лазерного зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1980. 158 с.
6. Макиенко Э.В., Наац И.Э. Вопросы оптимальной оценки параметров распределения аэрозольных частиц по размерам из оптических измерений // Атмосферная оптика. М.: Наука, 1974. С. 186–191.
7. Веретенников В.В., Наац И.Э. Вопросы обращения поляризационных измерений в характеристике атмосферного аэрозоля // Лазерное зондирование атмосферы. М.: Наука, 1976. С. 20–29.
8. Веретенников В.В., Якушева Е.П. О применении интегралов Стильбеса в обратных задачах аэрозольного светорассеяния // Оптика атмосфер. и океана. 1992. Т. 5, № 3. С. 273–284.
9. Веретенников В.В. Обратные задачи солнечной фотометрии для интегральных аэрозольных распределений. I. Теория и численный эксперимент в субмикронной области размеров частиц // Оптика атмосфер. и океана. 2006. Т. 19, № 4. С. 294–300.
10. Веретенников В.В., Меньщикова С.С. Микрофизическая экстраполяция в задаче обращения аэрозольной оптической толщины // Оптика атмосфер. и океана. 2011. Т. 24, № 10. С. 880–886.
11. Веретенников В.В., Меньщикова С.С. Особенности восстановления микроструктурных параметров аэрозоля из измерений аэрозольной оптической толщины. Часть I. Методика решения обратной задачи // Оптика атмосфер. и океана. 2013. Т. 26, № 4. С. 307–312.
12. Веретенников В.В. Обратные задачи солнечной фотометрии для интегральных аэрозольных распределений. II. Разделение на субмикронную и грубодисперсную фракции // Оптика атмосфер. и океана. 2006. Т. 19, № 4. С. 301–307.
13. Макиенко Э.В., Кабанов Д.М., Рахимов Р.Ф., Сакерин С.М. Изменения микроструктуры аэрозоля под воздействием дымов по результатам обращения данных спектральных оптических измерений // Оптика атмосфер. и океана. 2007. Т. 20, № 4. С. 321–327.
14. Сакерин С.М., Веретенников В.В., Журавлева Т.Б., Кабанов Д.М., Насртдинов И.М. Сравнительный анализ радиационных характеристик аэрозоля в ситуациях дымов лесных пожаров и обычных условиях // Оптика атмосфер. и океана. 2010. Т. 23, № 6. С. 451–461.
15. Исаев А.А. Статистика в метеорологии и климатологии. М.: Изд-во МГУ, 1988. 248 с.
16. Щелканов Н.Н. Методы вычисления случайных погрешностей параметров окружающей среды из экспериментальных данных // Оптика атмосфер. и океана. 2012. Т. 25, № 9. С. 815–821.
17. Пхалагов Ю.А., Ужegov В.Н., Польшин В.В., Козлов В.С., Итоплов И.И., Нагорский П.М. Исследования изменчивости и взаимосвязи оптических и электрических характеристик приземной атмосферы в зимних условиях // Оптика атмосфер. и океана. 2011. Т. 24, № 4. С. 269–274.
18. Кабанов Д.М., Курбангалев Т.Р., Рассказчикова Т.М., Сакерин С.М., Хуторова О.Г. Влияние синоптических факторов на вариации аэрозольной оптической

- толщи атмосферы в условиях Сибири // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 8. С. 665–674.
19. Сакерин С.М., Афонин С.В., Энгель М.В., Кабанов Д.М., Польшин В.В., Турчинович Ю.С., Букин О.А., Павлов А.Н. Пространственно-временная изменчивость аэрозольной оптической толщи атмосферы в Приморье и прилегающих морях в августе 2010 г. // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 9. С. 731–736.
20. Ужегов В.Н., Пхалагов Ю.А., Кабанов Д.М., Сакерин С.М. Грубодисперсный аэрозоль и его роль в формировании высоты однородной аэрозольной атмосферы // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 12. С. 1023–1027.

V.V. Veretennikov, S.S. Men'shchikova. Peculiarities of determining the aerosol microstructure parameters from measurements of the aerosol optical depth. Part II. Results of inversion.

Microstructure parameters of the atmospheric aerosol restored from spectral measurements of the aerosol optical depth are considered. The experiments are carried out in summer season in Tomsk. The results have been obtained using two algorithms for solving the inverse problem, basic one and its version presented in the first part of the paper. The integral distribution method is implemented in the basic algorithm. The modified algorithm possesses the advantages of the integral distribution method and enables one to increase the accuracy of the estimated contribution of the fine particles in the aerosol microstructure. The statistical data on restored parameters are presented. These data are obtained for the whole particle ensemble and for its submicron and coarse fractions. It was established that the modified algorithm allowed the volume concentration of the submicron aerosol to be taken into account additionally up to 47%. At the same time the solution correction in the fine fraction range results in the decrease of the mean radius of the submicron particles from 0.16 to 0.10 micrometers.