

УДК 551.501.793

Изменчивость параметров микроструктуры приземного аэрозоля в летний сезон по результатам обращения измерений спектрального ослабления света на горизонтальной трассе в Томске.

Часть II. Объемная концентрация и средний радиус частиц

В.В. Веретенников, С.С. Меньщикова, В.Н. Ужегов*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 8.08.2018 г.

Исследована изменчивость объемной концентрации и среднего радиуса частиц субмикронной и грубодисперсной фракций приземного аэрозоля в летний период по результатам решения обратной задачи для спектральных измерений коэффициента аэрозольного ослабления света. Показано, что основной вклад (80%) в суммарный объем приземного аэрозоля вносят частицы грубодисперсной фракции. Средний радиус субмикронных частиц варьирует в диапазоне от 0,08 до 0,25 мкм. Диапазон изменения среднего радиуса грубодисперсного аэрозоля составляет 1,06–3 мкм. Рассмотрено влияние задымления атмосферы на вариации микроструктурных параметров. Проведено сравнение изменчивости восстановленных микроструктурных параметров приземного аэрозоля с аналогичными результатами, полученными по данным солнечной фотометрии.

Ключевые слова: коэффициент аэрозольного ослабления света, микроструктура приземного аэрозоля, объемная концентрация, средний радиус частиц, обратные задачи; aerosol extinction coefficient, near-surface aerosol microstructure, volume concentration, mean radius of particles, inverse problem.

Введение

В первой части работы [1] представлены результаты исследования изменчивости геометрического сечения частиц субмикронной и грубодисперсной фракций приземного аэрозоля в летний период, восстановленного из решения обратной задачи для измерений коэффициента аэрозольного ослабления света в спектральном диапазоне 0,45–3,91 мкм базовым методом на горизонтальной трассе в районе Томска.

Во многих работах, связанных с изучением микроструктурных свойств аэрозоля оптическими методами, основное внимание уделяется анализу объемной (массовой) концентрации и размеров частиц. Размер частиц является существенным фактором в разнообразных физических и химических процессах, протекающих в атмосфере с участием аэрозолей [2, 3]. Важное значение имеет размер частиц в процессах взаимодействия с водяным паром, диффузии, коагуляции. Массовая концентрация субмикронной и грубодисперсной фракций

отмечена в числе ключевых параметров аэрозоля, рекомендованных для долговременных наблюдений в глобальной сети по программе WMO/GAW [4]. Особое внимание уделяется контролю параметров массовой концентрации частиц в связи с проблемами экологического мониторинга воздушного бассейна [5–8].

На территории России большой объем экспериментальных данных получен в приземном слое атмосферы при исследовании субмикронного аэрозоля. На аэрозольной станции ИОА СО РАН в приземном слое ведутся регулярные измерения оптико-микрофизических характеристик субмикронного аэрозоля и черного углерода [9]. Возможности изучения микрофизических свойств субмикронного аэрозоля существенно расширены за счет применения метода активной спектрофелометрии [10, 11].

Информацию о микроструктуре субмикронной и грубодисперсной фракций аэрозоля содержат измерения аэрозольного ослабления в широком диапазоне спектра. В работе [12] исследована изменчивость объемной концентрации и среднего радиуса субмикронных и грубодисперсных частиц аэрозоля в течение летнего периода в вертикальном столбе атмосферы, восстановленных из решения обратной задачи для спектральных измерений аэрозольной оптической толщины в диапазоне 0,37–4 мкм.

* Виктор Васильевич Веретенников (vvv@iao.ru); Светлана Сергеевна Меньщикова (mss@iao.ru); Виктор Николаевич Ужегов (uzhegov@iao.ru).

В продолжение исследований, начатых в [1], основное внимание второй части работы будет посвящено анализу изменчивости объемной концентрации и среднего радиуса частиц двух основных фракций приземного аэрозоля в фоновых условиях и при задымлении атмосферы в результате пожаров. Рассматриваемые параметры микроструктуры аэрозоля определялись по формулам (1) и (2), приведенным в [1], из интегральных функций распределения геометрического сечения частиц по размерам, которые были восстановлены при обращении спектральных измерений коэффициента аэрозольного ослабления света $\varepsilon(\lambda)$.

1. Восстановление объемной концентрации аэрозоля

На рис. 1 представлены временные ряды объемной концентрации субмикронных $V^{(f)}$ и грубодисперсных $V^{(c)}$ частиц аэрозоля и гистограммы их распределений, которые восстановлены из результатов обращения среднечасовых зависимостей $\varepsilon(\lambda_i)$, полученных в июле и августе 2003 г. При построении гистограмм распределений параметров микроструктуры в августе были исключены данные третьей декады месяца (а точнее, с 19:00 20.08.2003 г.), когда наблюдалось задымление атмосферы в результате лесных пожаров. На панелях гистограмм приведены также среднемесячные значения (m) и стандартные отклонения (σ) соответствующих микроструктурных параметров.

Гистограммы распределения параметров $V^{(f)}$ и $V^{(c)}$ имеют унимодальный асимметричный вид с положительными коэффициентами асимметрии. Модальное значение $V_{\text{mod}}^{(f)} = 0,109 \cdot 10^{-10}$ распределения частиц субмикронной фракции в июле меньше

соответствующего значения в августе $V_{\text{mod}}^{(f)} = 0,143 \cdot 10^{-10}$. Противоположное соотношение имеет место для грубодисперсных частиц: в июле модальное значение $V_{\text{mod}}^{(c)} = 0,688 \cdot 10^{-10}$ более чем вдвое превышает значение $V_{\text{mod}}^{(c)} = 0,313 \cdot 10^{-10}$ в августе.

Статистические характеристики микроструктурных параметров, восстановленных на месячных интервалах, объединены в табл. 1, где также указаны их коэффициенты вариации. Данные, полученные в августе, разделены в таблице на две группы с границей 19:00 20.08.2003 г., которая соответствует моменту прихода дымового аэрозоля. Так же как и в случае рассмотрения геометрических сечений [1], значительно отличаются среднемесячные значения объемной концентрации грубодисперсных частиц $V^{(c)}$ в условиях незадымленной атмосферы.

Из данных, представленных на рис. 1 и в табл. 1, видно, что при отсутствии дымов доля частиц грубодисперсной фракции в объемном содержании аэрозоля является преобладающей. Этим обусловлена статистическая значимость различия средних значений суммарной объемной концентрации аэрозоля $V^{(\text{tot})} = V^{(f)} + V^{(c)}$ на месячных интервалах в условиях незадымленной атмосферы, что не наблюдалось для суммарных геометрических сечений $S^{(\text{tot})}$.

Относительный вклад среднемесячных значений $V^{(c)}$ в общий объем составляет 82% в июле и 78% в августе (без учета периода задымления). Для сравнения напомним, что в суммарное геометрическое сечение $S^{(\text{tot})}$ основной вклад вносят субмикронные частицы (73–77%).

На рис. 2 представлены бок-диаграммы распределения объемных концентраций аэрозольных частиц. Они позволяют наглядно сравнить изменчивость статистических характеристик параметров микроструктуры на месячных интервалах.

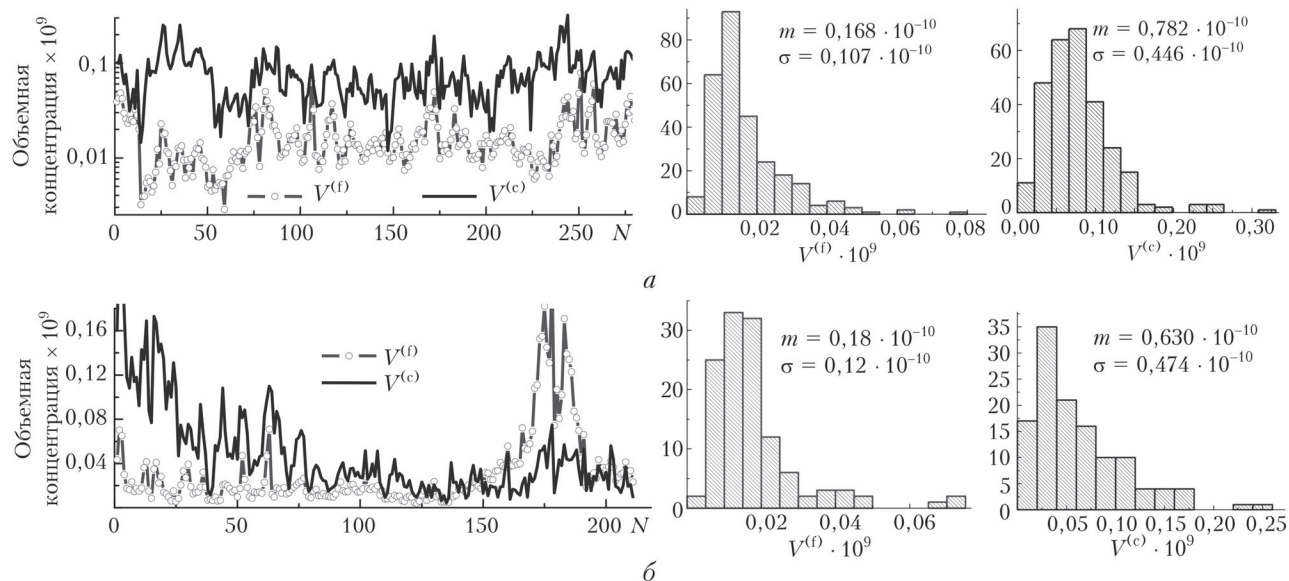


Рис. 1. Временные ряды и гистограммы распределений объемной концентрации частиц субмикронной $V^{(f)}$ и грубодисперсной $V^{(c)}$ фракций приземного аэрозоля, восстановленных при обращении спектральных зависимостей $\varepsilon(\lambda)$ в июле (а) и августе 2003 г. (б)

Таблица 1

Статистические характеристики восстановленных параметров микроструктуры аэрозоля;
 m – среднее значение; σ – стандартное отклонение; $Var = \sigma/m \cdot 100\%$ – коэффициент вариации

Параметр	Июль			Август (без учета дымов)			Август (дым)		
	m	σ	$Var, \%$	m	σ	$Var, \%$	m	σ	$Var, \%$
$V^{(f)} \cdot 10^{-9}$	0,0168	0,0107	63,7	0,018	0,0120	66,7	0,0491	0,0454	92,5
$V^{(c)} \cdot 10^{-9}$	0,0782*	0,0446	57,0	0,0630*	0,0474	75,2	0,0266	0,0149	56,0
$V^{(tot)} \cdot 10^{-9}$	0,0950*	0,0498	52,4	0,0810*	0,056	69,1	0,0757	0,0573	75,7
$r_s^{(f)}$, мкм	0,155*	0,035	22,6	0,171*	0,0336	19,6	0,174	0,025	14,4
$r_s^{(c)}$, мкм	1,958	0,375	19,2	1,963	0,412	21,0	1,619	0,497	30,7
$r_s^{(tot)}$, мкм	0,654*	0,189	28,9	0,575*	0,174	30,3	0,290	0,089	30,7

* Средние величины, которые с доверительной вероятностью 0,95 значимо различаются на месячных интервалах (с исключением дымовых ситуаций).

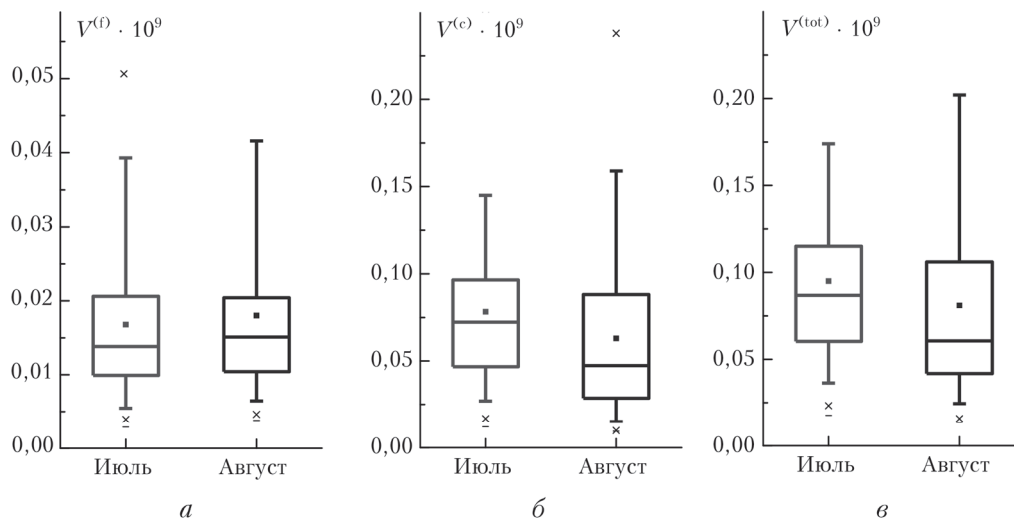


Рис. 2. Вох-диаграммы распределений параметров $V^{(f)}$ (а), $V^{(c)}$ (б) и $V^{(tot)}$ (в). Границы ящиков – первый и третий квартили; линия внутри ящика – медиана; ■ – положение среднего значения; концы «усов» – 5-й и 95-й процентили; «x» – 1-й и 99-й процентили; «-» – максимальные и минимальные значения каждой выборки

Видно, что во всех рассмотренных случаях средние значения распределений объемных концентраций больше, чем их медианы. Средние значения и медианы параметров $V^{(c)}$ и $V^{(tot)}$ на месячных интервалах значимо различаются с доверительной вероятностью 0,95.

Для субмикронного аэрозоля значимого расхождения между средними значениями объемной концентрации $V^{(f)}$ в указанные периоды не установлено, так же как и между медианами распределений. Более того, для распределений $V^{(f)}$ практически совпадают значения квартилей Q1 (0,099 и 0,104) $\cdot 10^{-10}$ и Q3 (0,206 и 0,204) $\cdot 10^{-10}$. Таким образом, в течение двух летних месяцев около 50% значений $V^{(f)}$ заключено в интервале (0,99–2,06) $\cdot 10^{-11}$. Близкими также являются значения 5-й и 95-й процентили.

Вох-диаграммы, представленные на рис. 3, дают возможность сравнить изменчивость статистических характеристик объемных концентраций $V^{(f)}$, $V^{(c)}$ и $V^{(tot)}$, восстановленных в дневные и ночные часы в течение июля. Из рисунка видно, что при разделении массивов данных средние значения объемных концентраций частиц по-прежнему больше их медиан. Средние и медианы объемных кон-

центраций для ночных наблюдений больше аналогичных значений, полученных в дневное время. Например, для дневных и ночных наблюдений в июле средние значения $V^{(f)}$ равны соответственно 0,142 $\cdot 10^{-10}$ и 0,213 $\cdot 10^{-10}$. Средние значения параметров $V^{(f)}$, $V^{(c)}$ и $V^{(tot)}$ для дневных и ночных наблюдений значимо различаются с доверительной вероятностью 0,95. Также значимое расхождение имеет место между медианами распределений. Аналогичные различия между статистическими характеристиками, полученными в дневное и ночное время, сохраняются в августе.

Рассмотрим особенности временной изменчивости объемных концентраций $V^{(f)}$, $V^{(c)}$ и $V^{(tot)}$. Сравним временные ряды параметров $V^{(f)}$, $V^{(c)}$, восстановленных в июле, которые изображены на рис. 1, а, с соответствующими рядами параметров $S^{(f)}$, $S^{(c)}$ (см. [1], рис. 5). Можно заметить, что участок ряда $N = 14$ –53 (2–6.07.2003 г.) на рис. 1, а с аномальным дисперсным составом аэрозоля не выделяется столь явно, как при рассмотрении зависимостей геометрических сечений частиц. До 23:00 1.07 ($N = 11$) объемная концентрация грубодисперсных частиц $V^{(c)}$ в среднем вдвое превышает

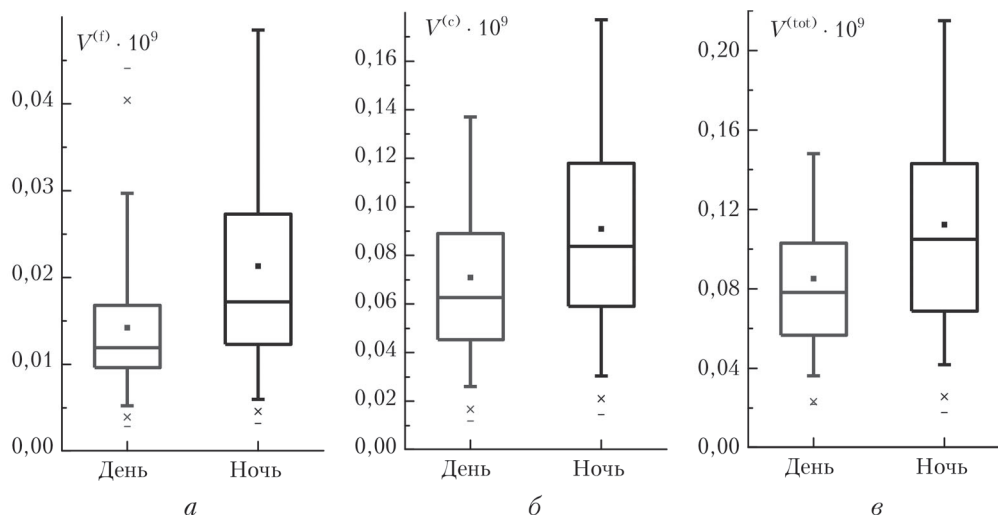


Рис. 3. Вох-диаграммы распределений параметров $V^{(f)}$ (а), $V^{(c)}$ (б) и $V^{(tot)}$ (в), восстановленных в течение июля в дневные и ночные часы

объемную концентрацию субмикронного аэрозоля. Далее происходит резкое, на порядок, уменьшение объемной концентрации субмикронного аэрозоля $V^{(f)}$ с $0,32 \cdot 10^{-10}$ до $0,03 \cdot 10^{-10}$. При этом концентрация $V^{(c)}$ также падает, но затем увеличивается и в период до 21:00 6.07 ($N = 53$) сохраняет более высокие значения относительно среднемесячного уровня, превышая значения $V^{(f)}$ в среднем в 12,4 раза. В этот же период частицы обеих фракций вносят примерно равный вклад в суммарное геометрическое сечение.

Из рис. 1, б видно, что в августе до прихода дымового аэрозоля в суммарном объеме преобладает вклад грубодисперсных частиц. В этот же период на временной зависимости среднечасовых значений объемной концентрации грубодисперсных частиц, так же как и на зависимости их среднесуточных значений $V^{(c)}$, представленной на рис. 4, а, прослеживается отрицательный тренд. На рис. 4 вертикальной отсечкой на кривых отмечено стандартное отклонение восстановленных параметров для каждого дня.

В первой части работы [1] уже отмечалось, что отрицательный тренд в августе имеют временные зависимости относительной влажности воздуха RH и геометрического сечения грубодисперсных частиц $S^{(c)}$ (см. [1], рис. 7). Коэффициент корреляции между среднесуточными значениями $V^{(c)}$ и RH в условиях незадымленной атмосферы в августе составил 0,83.

С приходом дымового аэрозоля начинает увеличиваться концентрация субмикронных частиц $V^{(f)}$ и в период с 23:00 20.08 по 05:00 23.08.2003 г. ($N = 126-150$) выравнивается со значениями $V^{(c)}$. В дальнейшем вклад $V^{(f)}$ становится основным, достигая максимального значения 73% 26.08. Объемная концентрация грубодисперсного аэрозоля в период задымления также увеличивается, но с меньшей скоростью. Отношение среднесуточных значений объемных концентраций $V^{(f)}$ и $V^{(c)}$ в точке макси-

муму 26.08 близко к трем, а отношение их средних значений за период задымления по данным табл. 1 равно 1,85.

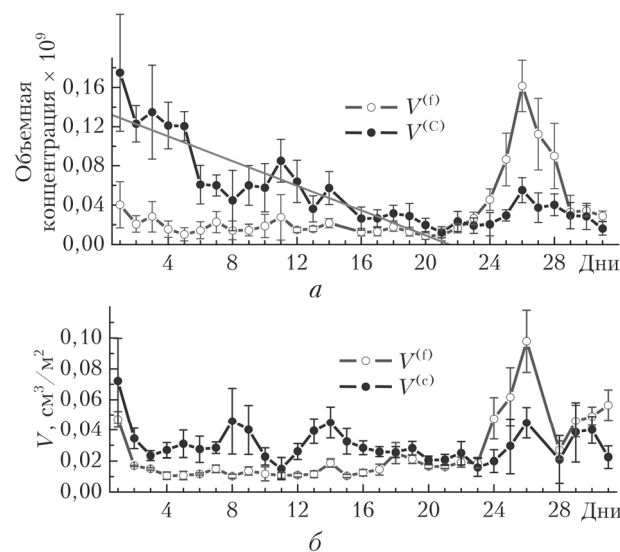


Рис. 4. Сравнение среднесуточных значений объемных концентраций частиц субмикронной $V^{(f)}$ и грубодисперсной $V^{(c)}$ фракций аэрозоля в приземном слое (а) и в вертикальном столбе атмосферы (б), восстановленных в августе

Для сравнения на рис. 4, б представлена изменчивость среднесуточных значений параметров $V^{(f)}$ и $V^{(c)}$, восстановленная по данным солнечной фотометрии [12]. В зависимостях на рис. 4 можно проследить элементы сходства и различия. Общей чертой является преобладание грубодисперсных частиц в суммарном объеме аэрозоля с начала месяца и до прихода дымового аэрозоля, когда начинает расти и становится доминирующим вклад субмикронного аэрозоля. Такое превышение для среднечасовых реализаций $V^{(f)}$ и $V^{(c)}$, восстановленных при обращении измерений аэрозольной оптической

толщины [12], достигает 2,7 раза, а для среднесуточных значений в точке максимума 26.08 составляет 2,2 раза.

В отдельных случаях изменение $V^{(f)}$ и $V^{(c)}$ в приземном слое и во всей толще атмосферы происходит в противофазе. Например, 8.08 в приземном слое наблюдаются локальные минимумы параметров $V^{(f)}$ и $V^{(c)}$, а в столбе атмосферы концентрация грубодисперсного аэрозоля максимальная при локальном минимуме $V^{(f)}$. Наоборот, 11.08 параметры $V^{(f)}$ и $V^{(c)}$ приземного аэрозоля достигают максимальных значений, а во всей толще атмосферы концентрация грубодисперсного аэрозоля $V^{(c)}$ имеет глобальный минимум за период месячных наблюдений. Все параметры 14.08 достигают локальных максимумов. Наконец, значимый тренд $V^{(c)}$ наблюдается только на рис. 4, а для приземного аэрозоля.

2. Восстановление среднего радиуса аэрозольных частиц

Средний радиус аэрозольных частиц определяется через отношение объемной концентрации частиц к их геометрическому сечению как $r_s = (3/4)(V/S)$. При рассмотрении отдельных фракций вместо параметров V и S в отношении подставляются соответствующие значения объемных концентраций и сечений для фракций аэрозоля.

На рис. 5 приведены временные ряды и гистограммы распределения средних радиусов частиц субмикронной $r_s^{(f)}$, грубодисперсной $r_s^{(c)}$ фракций и суммарного ансамбля $r_s^{(tot)}$, которые получены на основе данных об объемных концентрациях частиц,

рассмотренных в разд. 1 и данных о геометрических сечениях частиц, приведенных в [1]. Основные статистические характеристики параметров $r_s^{(f)}$, $r_s^{(c)}$ и $r_s^{(tot)}$ указаны в табл. 1. Средние радиусы частиц имеют самый низкий коэффициент вариации среди рассмотренных микроструктурных параметров.

Гистограммы распределений средних радиусов частиц разных диапазонов дисперсности отличаются большим разнообразием. Средний радиус субмикронных частиц $r_s^{(f)}$ варьирует в диапазоне от 0,08 до 0,25 мкм. Гистограммы распределений $r_s^{(f)}$ на месячных интервалах имеют унимодальную форму со слабой отрицательной асимметрией, которая более выражена на гистограмме в августе и может наблюдаться на box-диаграмме, изображенной на рис. 6, а. Видно, что среднее и медиана распределения $r_s^{(f)}$ в июле практически совпадают. Среднемесячные значения и медианы распределений $r_s^{(f)}$ на месячных интервалах значимо различаются с доверительной вероятностью 0,95.

Средний радиус грубодисперсных частиц $r_s^{(c)}$ изменяется от 1,06 до 3 мкм. Форма гистограмм распределений $r_s^{(c)}$ в июле и августе различная. На гистограмме в июле (рис. 5, а) выделяется область 1,4–2,2 мкм, в которой значения $r_s^{(c)}$ распределены квазиравномерно. При этом среднее и медиана распределения $r_s^{(c)}$ в июле расположены близко (см. рис. 6, б), как и в случае субмикронных частиц. На гистограмме параметра $r_s^{(c)}$ в августе (рис. 5, б) наблюдаются две моды с границей в окрестности 1,9 мкм. При разных формах распределений в среднемесячных значениях распределений $r_s^{(c)}$ значимые различия не наблюдаются.

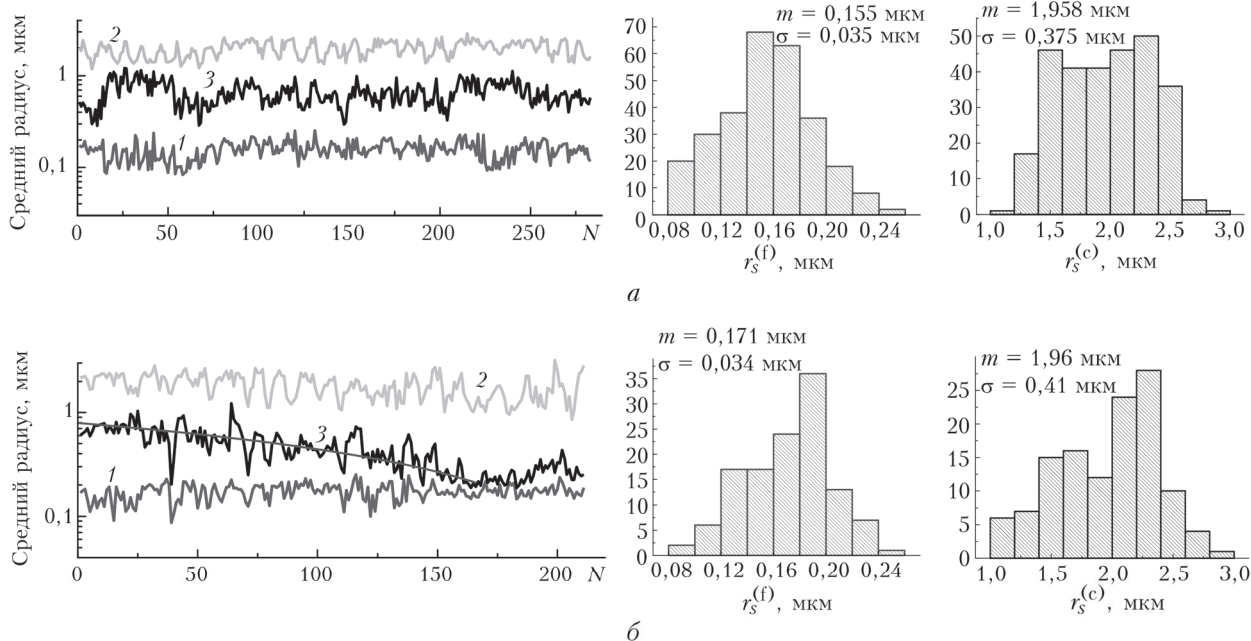


Рис. 5. Временные ряды среднего радиуса частиц субмикронной $r_s^{(f)}$ (1), грубодисперсной $r_s^{(c)}$ (2) фракций и суммарного ансамбля $r_s^{(tot)}$ (левая панель) и гистограммы распределений $r_s^{(f)}$, $r_s^{(c)}$ приземного аэрозоля (правая панель), восстановленных при обращении спектральных зависимостей $\epsilon(\lambda)$ в июле (а) и августе (б)

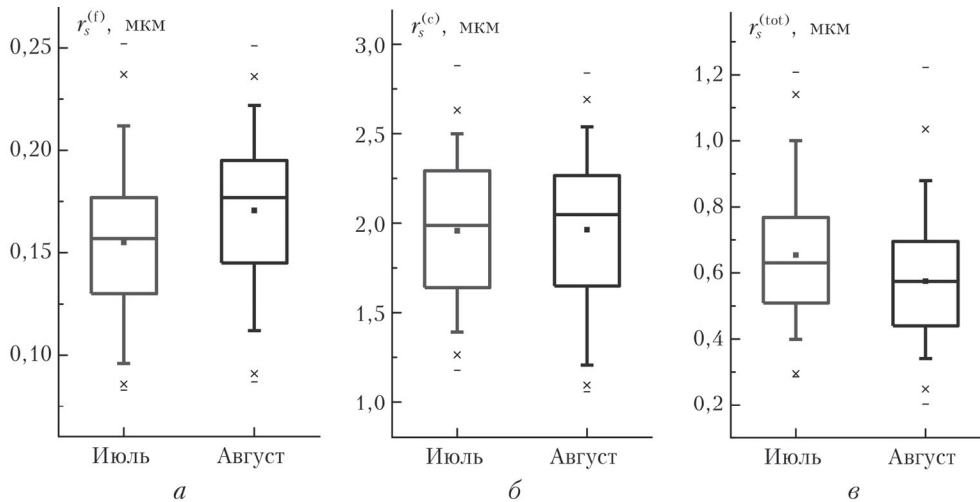


Рис. 6. Вох-диаграммы распределения средних радиусов частиц $r_s^{(f)}$ (а), $r_s^{(c)}$ (б) и $r_s^{(tot)}$ (в)

Средний радиус суммарного ансамбля $r_s^{(tot)}$ изменяется в диапазоне 0,2–1,22 мкм. Из рис. 6, в видно, что в августе среднее и медиана распределения $r_s^{(tot)}$ почти совпадают. Среднемесячные значения распределений $r_s^{(tot)}$ на месячных интервалах значительно различаются с доверительной вероятностью 0,95.

На рис. 7 показаны вох-диаграммы распределений параметров $r_s^{(f)}$, $r_s^{(c)}$ и $r_s^{(tot)}$, восстановленных в июле, с разделением на дневные и ночные часы. Во всех случаях средние и медианы распределений для ночных наблюдений больше аналогичных значений в дневное время. Средние значения и медианы распределений параметров, полученных в дневное и ночное время, значительно различаются с доверительной вероятностью 0,95. Наиболее существенные различия наблюдаются в распределениях среднего радиуса грубодисперсных частиц (рис. 7, б). Медианы распределений $r_s^{(c)}$ в дневные и ночные часы в июле равны 1,765 и 2,278 мкм соответственно.

Обратимся к анализу особенностей временной изменчивости параметров $r_s^{(f)}$, $r_s^{(c)}$ и $r_s^{(tot)}$, представ-

ленной на рис. 5. Ранее на временных зависимостях микроструктурных параметров в июле предметом специального рассмотрения был участок ряда $N = 14–53$ (2–6.07) с аномальным дисперсным составом аэрозоля относительно геометрического сечения и объемной концентрации аэрозоля. Обращаясь к результатам, представленным на рис. 5, а, можно установить, что указанный период характерен уменьшением параметров $r_s^{(f)}$ и $r_s^{(c)}$ по отношению к среднемесячным значениям до 0,13 и 1,68 мкм соответственно. Напротив, средний радиус суммарного ансамбля $r_s^{(tot)}$ увеличился до 0,87 мкм, что обусловлено в первую очередь существенно возросшим относительным вкладом грубодисперсного аэрозоля в суммарное геометрическое сечение в рассматриваемый период [1].

К отличительным свойствам параметров микроструктуры в июле, наблюдаемых на рис. 5, а, относится высокий коэффициент корреляции ρ между средним радиусом $r_s^{(c)}$ и относительной влажностью воздуха, равный 0,90. Коэффициент корреляции между $r_s^{(f)}$ и RH приблизительно вдвое меньше.

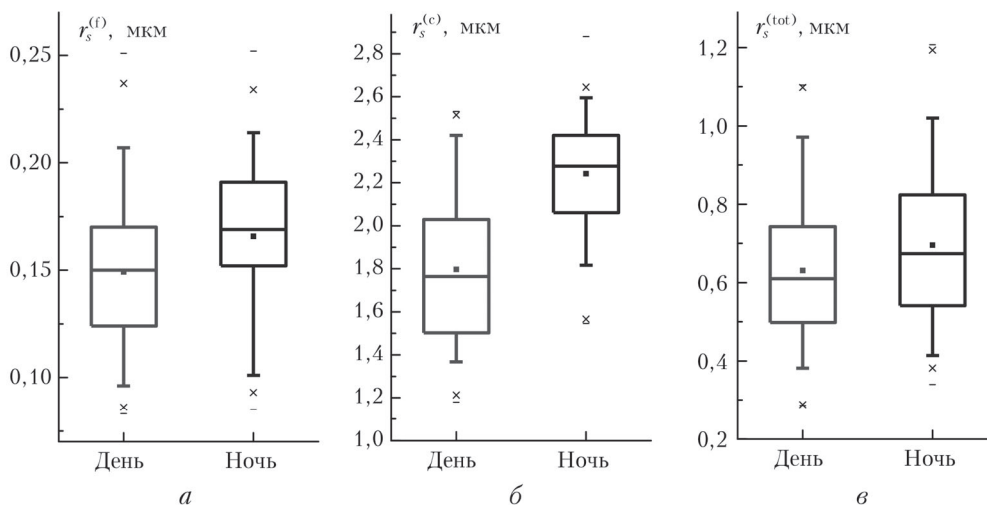


Рис. 7. Вох-диаграммы распределений параметров $r_s^{(f)}$ (а), $r_s^{(c)}$ (б) и $r_s^{(tot)}$ (в), восстановленных в течение июля в дневные и ночные часы

Далее рассмотрим поведение параметров $r_s^{(f)}$, $r_s^{(c)}$ и $r_s^{(tot)}$ в августе (см. рис. 5, б). Здесь в первую очередь представляет интерес временная изменчивость среднего радиуса суммарного ансамбля $r_s^{(tot)}$. Временная зависимость $r_s^{(tot)}$ характеризуется отрицательным трендом в период с начала месяца и до 26.08, когда наступил пик объемной концентрации аэрозоля при задымлении атмосферы. Наблюдаемый тренд обусловлен уменьшением относительного вклада частиц грубодисперсной фракции в суммарный объем на фоне отрицательного тренда $V^{(c)}$ (см. рис. 1, б). Также отрицательный тренд можно наблюдать на временной зависимости среднесуточных значений $r_s^{(tot)}$ на рис. 8, а.

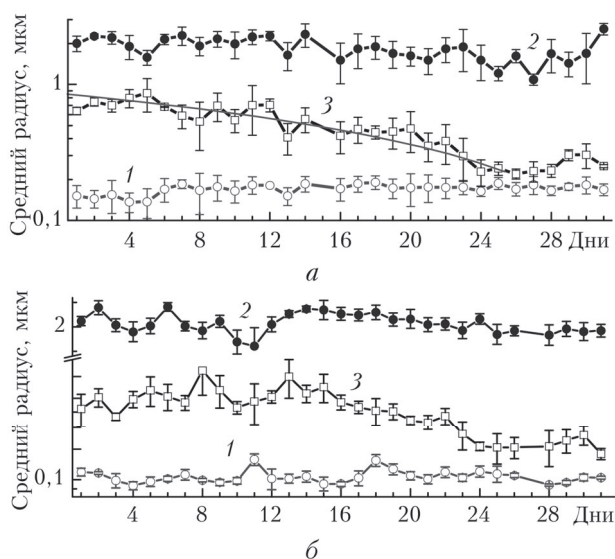


Рис. 8. Сравнение среднесуточных значений микроструктурных параметров $r_s^{(f)}$ (1), $r_s^{(c)}$ (2) и $r_s^{(tot)}$ (3) в приземном слое (а) и в вертикальном столбе атмосферы (б), восстановленных в августе

Как и в июле, в августе сохраняется высокая корреляция между средним радиусом грубодисперсных частиц $r_s^{(c)}$ и относительной влажностью воздуха ($\rho = 0,87$). При переходе к среднесуточным значениям $r_s^{(c)}$ и RH коэффициент корреляции между ними увеличивается до 0,91.

Для сравнения на рис. 8, б представлена изменчивость среднесуточных значений микроструктурных параметров $r_s^{(f)}$, $r_s^{(c)}$ и $r_s^{(tot)}$, восстановленных в августе по данным солнечной фотометрии [12]. Средние радиусы субмикронных частиц в вертикальном столбе атмосферы имеют меньшие значения, чем данные наземных наблюдений. По данным солнечной фотометрии в августе среднемесячное значение $r_s^{(f)}$ было равно 0,104 мкм. Средние радиусы частиц грубодисперсной фракции $r_s^{(c)}$ имеют близкие значения, равные 1,96 мкм для приземного аэрозоля и 2,05 мкм в столбе атмосферы при усреднении на месячном интервале. Радиусы суммарных ансамблей частиц отличаются почти вдвое при меньших значениях $r_s^{(tot)}$ в столбе атмосферы. Среднемесячное значение $r_s^{(tot)}$ по данным солнечной фотомет-

рии составило 0,293 мкм, а в приземном слое — 0,575 мкм. Такое расхождение обусловлено более высокой относительной концентрацией грубодисперсных частиц в приземном слое атмосферы. Отрицательный тренд во временной зависимости среднего радиуса $r_s^{(tot)}$ на рис. 8, б наблюдается позже, чем в приземном аэрозоле, с 13.08.2003 г.

3. Корреляционные связи

Рассмотрим статистические связи между спектральными измерениями коэффициента аэрозольного ослабления и объемной концентрацией аэрозольных частиц. На рис. 9 представлено поведение коэффициента корреляции ρ между параметрами $V^{(f)}$, $V^{(c)}$, $V^{(tot)}$ и измерениями $\epsilon(\lambda_i)$ в июле (а) и августе (б) в зависимости от длины волны (λ).

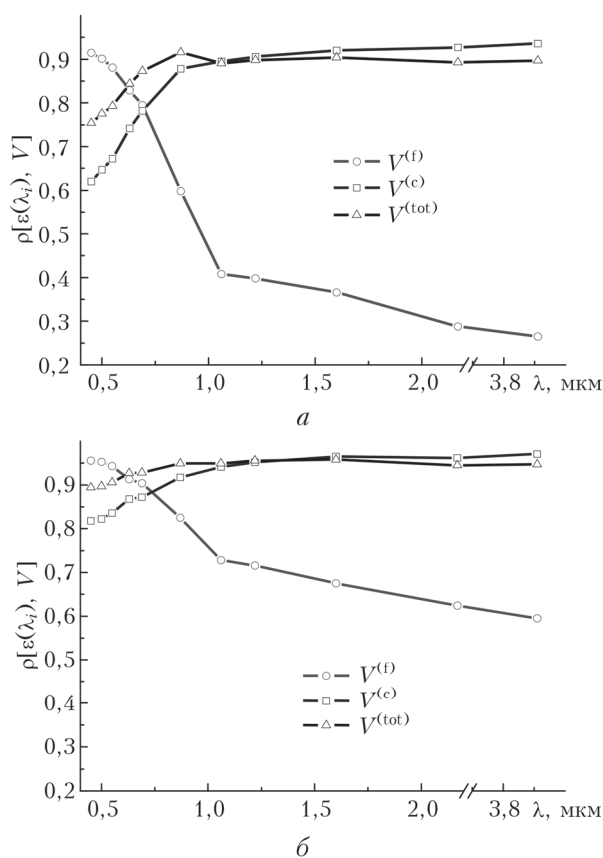


Рис. 9. Спектральная изменчивость коэффициента корреляции ρ между измеренными значениями коэффициента аэрозольного ослабления $\epsilon(\lambda_i)$ в июле (а) и августе (б) и восстановленными значениями объемной концентрации частиц $V^{(f)}$, $V^{(c)}$ и $V^{(tot)}$

Зависимости, представленные на рис. 9, б, получены в августе без учета задымления воздуха. Спектральные зависимости коэффициентов корреляции являются монотонными. Коэффициенты корреляции убывают с ростом λ_i для объемной концентрации субмикронного аэрозоля $V^{(f)}$ и возрастают для грубодисперсного аэрозоля $V^{(c)}$. Для суммарного ансамбля коэффициент корреляции

объемной концентрации $V^{(\text{tot})}$ является также возрастающей функцией, в отличие от коэффициента корреляции суммарного сечения $S^{(\text{tot})}$ [1]. Сходство в спектральном поведении коэффициентов корреляции $V^{(\text{tot})}$ и $V^{(c)}$ объясняется преобладанием грубодисперсного аэрозоля в суммарном объеме.

Высокая корреляция ($\rho \sim 0,92-0,96$) наблюдается между объемной концентрацией субмикронного аэрозоля $V^{(f)}$ и измерениями $\varepsilon(\lambda_i)$ на левом конце спектрального интервала. С увеличением длины волны коэффициент корреляции убывает и при $\lambda = 1,06$ мкм достигает значения 0,41 в июле и более высокого уровня $\rho = 0,73$ в августе.

Для корреляции $\varepsilon(\lambda_i)$ с параметрами $V^{(c)}$ и $V^{(\text{tot})}$ проявляется обратная тенденция. Коэффициенты корреляции возрастают при увеличении λ , достигая максимальных значений, равных 0,97 для $V^{(c)}$ и 0,95 для $V^{(\text{tot})}$. Причем в августе высокая корреляция сохраняется во всем спектральном диапазоне, не опускаясь для ρ ниже 0,82 для $V^{(c)}$ и 0,89 для $V^{(\text{tot})}$.

Заключение

Во второй части работы была исследована изменчивость объемной концентрации и среднего радиуса частиц субмикронной, грубодисперсной фракций и суммарного ансамбля аэрозоля в летний период в приземной атмосфере. Микроструктурные параметры аэрозоля получены из решения обратной задачи для измерений коэффициента аэрозольного ослабления света в спектральном диапазоне 0,45–3,91 мкм на горизонтальной трассе в г. Томске.

Проанализированы гистограммы микроструктурных параметров, восстановленных на месячных интервалах, и получены оценки их статистических характеристик, таких как среднее значение, стандартное отклонение, коэффициент вариации, мода и медиана распределений. Выполнена оценка значимости расхождения средних и медиан микроструктурных параметров, полученных для месячных интервалов.

Особое внимание уделено исследованию изменчивости параметров аэрозоля при задымлении атмосферы. Установлено, что грубодисперсные частицы вносят основной вклад в суммарный объем приземного аэрозоля, который в чистой атмосфере составляет около 80%. Концентрация субмикронного аэрозоля увеличивается и становится преобладающей с приходом дымового аэрозоля, достигая максимального значения 73% от общего объема частиц.

Средний радиус субмикронных частиц в период наблюдений варьирует в диапазоне от 0,08 до 0,25 мкм при среднемесячных значениях 0,155–0,171 мкм. Диапазон изменения среднего радиуса грубодисперсного аэрозоля составляет 1,06–3 мкм при среднем значении за период наблюдений 1,96 мкм. Изменчивость среднего радиуса суммарного ансамбля частиц преимущественно определяется вариациями соотношения между объемными концентрациями его фракций.

Сравнение статистических характеристик микроструктурных параметров, восстановленных в дневные и ночные часы, показало, что средние значения и медианы распределений рассматриваемых микроструктурных параметров значимо различаются с доверительной вероятностью 0,95. Среднемесячные значения и медианы распределений объемной концентрации и среднего радиуса частиц для ночных наблюдений меньше аналогичных дневных значений.

Проведено сравнение микроструктурных параметров, восстановленных на горизонтальной трассе в приземном слое атмосферы и в вертикальном столбе атмосферы по данным солнечной фотометрии. Отмечено, что в приземной атмосфере грубодисперсные частицы вносят более высокий относительный вклад в суммарный объем аэрозоля. Средние радиусы субмикронных частиц, восстановленные по данным солнечной фотометрии, имеют меньшие значения по сравнению с наземными наблюдениями.

Корреляция между коэффициентами аэрозольного ослабления света и объемной концентрацией аэрозольных частиц имеет выраженную спектральную зависимость. При увеличении длины волны коэффициент корреляции убывает для объемной концентрации субмикронного аэрозоля (при максимальном значении 0,956) и возрастает для объемных концентраций грубодисперсного аэрозоля и суммарного ансамбля до 0,971 и 0,947 соответственно.

1. Веретенников В.В., Меньщикова С.С., Ужegov В.Н. Изменчивость параметров микроструктуры аэрозоля в летний сезон по результатам обращения измерений спектрального ослабления света на горизонтальной трассе в Томске. Часть 1. Геометрическое сечение субмикронных и грубодисперсных частиц // Оптика атмосф. и океана. 2018. Т. 31, № 11. С. 857–866.
2. Химия нижней атмосферы / под ред. С. Расула. М.: Мир, 1976. 408 с.
3. Райст П. Аэрозоли. Введение в теорию. М.: Мир, 1987. 280 с.
4. WMO/GAW aerosol measurement procedures: Guidelines and recommendations. GAW Report N 153. Geneva: WMO, 2003. 67 p.
5. Schäfer K., Harbusch A., Emeis S., Koepke P., Wiegner M. Correlation of aerosol mass near the ground with aerosol optical depth during two seasons in Munich // Atmos. Environ. 2008. V. 42. P. 4036–4046.
6. Jing J., Wu Y., Tao J., Che H., Xia X., Zhang X., Yan P., Zhao D., Zhang L. Observation and analysis of near-surface atmospheric aerosol optical properties in urban Beijing // Particuology. 2015. V. 18. P. 144–154.
7. Yu X., Ma J., Kumar K.R., Zhu B., An J., He J., Li M. Measurement and analysis of surface aerosol optical properties over urban Nanjing in the Chinese Yangtze river delta // Sci. Total Environ. 2016. V. 542. P. 277–291.
8. Bennouna Y.S., Cachorro V.E., Mateos D., Burgos M.A., Toledano C., Torres B., de Frutos A.M. Long-term comparative study of columnar and surface mass concentration aerosol properties in a background environment // Atmos. Environ. 2016. V. 140. P. 261–272.
9. Yausheva E.P., Kozlov V.S., Panchenko M.V., Shmargunov V.P. Long-term variability of aerosol and Black Carbon concentrations in the atmospheric surface layer as results of 20-years measurements at the IAO

- Aerosol Station // Proc. SPIE. 2017. V. 10466. P. 10466 3I.
10. *Panchenko M.V., Sviridenkov M.A., Terpugova S.A., Kozlov V.S.* Active spectral nephelometry as a method for the study of submicron atmospheric aerosols // Int. J. Remote Sens. 2008. V. 29, N 9. P. 2567–2583.
 11. *Панченко М.В., Терпугова С.А., Докукина Т.А., Полькин В.В., Яушева Е.П.* Многолетняя изменчивость конденсационной активности аэрозоля в г. Томске // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25. № 4. С. 314–318; *Panchenko M.V., Terpugova S.A., Dokukina T.A., Pol'kin V.V., Yausheva E.P.* Long-term variability of aerosol condensation activity in Tomsk // Atmos. Ocean. Opt. 2012. V. 25, N 4. P. 251–255.
 12. *Веретенников В.В., Меньщикова С.С.* Особенности восстановления микроструктурных параметров аэрозоля из измерений аэрозольной оптической толщины. Часть II. Результаты обращения // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 4. С. 313–324; *Veretennikov V.V., Men'shchikova S.S.* Features of retrieval of microstructural parameters of aerosol from measurements of aerosol optical depth. Part II. Inversion results // Atmos. Ocean. Opt. 2013. V. 26, N 6. P. 480–491.

V.V. Veretennikov, S.S. Men'shchikova, V.N. Uzhegov. **Variability of microstructure parameters of the near-surface aerosol in the summer period retrieved by inverting the spectral extinction measurements along a horizontal path in Tomsk. Part II. Volume concentration and mean radius of particles.**

The variability of the volume concentration and the mean radius of the fine and coarse fractions of near-surface aerosol is studied based on solution of the inverse problem for spectral measurements of aerosol extinction coefficient. It is shown that coarse particles make the main contribution (80%) to the total volume of the near-surface aerosol. The mean radius of fine particles varies in the range from 0.08 to 0.25 μm . The range of variation in the mean radius of the coarse aerosol is 1.06–3 μm . The influence of atmosphere smoke on the variation of microstructure parameters of the aerosol is considered. The variability of the retrieved microstructure parameters of near-surface aerosol is compared with similar results obtained from solar spectrophotometry.