

ОПТИКА КЛАСТЕРОВ, АЭРОЗОЛЕЙ И ГИДРОЗОЛЕЙ

УДК 551.501.793

**Изменчивость микроструктуры аэрозоля под влиянием дымов лесных пожаров по данным обращения спектральных характеристик ослабления света в приземном слое и вертикальном столбе атмосферы**

**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 14.03.2019 г.

Исследованы особенности микроструктуры аэрозоля в приземном слое и в вертикальном столбе атмосферы при поступлении в атмосферу дымов пожаров. Микроструктурные параметры аэрозоля определялись из решения обратной задачи для спектральных измерений коэффициента аэрозольного ослабления света трассовым методом и аэрозольной оптической толщины методом солнечной фотометрии в условиях чистой атмосферы и при ее задымлении в районе Томска. Были рассчитаны геометрическое сечение, объемная концентрация и средний радиус частиц субмикронной и грубодисперсной фракций аэрозоля. Для фоновых условий типично преобладание грубодисперсной фракции в суммарном объеме аэрозоля. При задымлении воздуха в объемном содержании доминирующей становится субмикронная фракция аэрозольных частиц. В результате в задымленной атмосфере уменьшается средний по суммарному ансамблю радиус частиц. Также при задымлении атмосферы существенно меняется характер регрессионных связей между параметрами микроструктуры разных фракций аэрозоля и спектральными характеристиками аэрозольного ослабления света.

*Ключевые слова:* ослабление света, микроструктура аэрозоля, дым, обратные задачи, регрессия; extinction of light, aerosol microstructure, smoke, inverse problem, regression.

**Введение**

В результате лесных пожаров в атмосферу поступает большое количество продуктов горения в аэрозольной и газовой фазах. Как важный компонент атмосферного аэрозоля, дымовые частицы могут оказывать существенное влияние на радиационный баланс атмосферы и земной поверхности, процессы образования и развития облаков и осадков, участвуя в формировании погоды и климата Земли [1–3]. Загрязнение атмосферы токсичными продуктами горения во время пожаров оказывает негативное воздействие на здоровье человека [1, 4–6].

Большое разнообразие физико-химических свойств дымовых аэрозолей — источник неопределенности в оценке последствий их влияния на окружающую среду. В этой связи большие усилия направляются на изучение дымовых аэрозолей в процессе их образования и развития [7–10], переноса и пространственного распределения [11–14], взаимодействия с оптическим и тепловым излучением [13, 15–18]. При этом используются результаты как натуральных, так и лабораторных экспериментов в контролируемых условиях, а также методы чис-

ленного моделирования. Наряду с наземными измерениями привлекаются данные самолетных и спутниковых наблюдений [11–15].

Для исследования характеристик дымового аэрозоля широко применяются оптические методы. В связи с проблемой аэрозольного радиационного форсинга значительный интерес представляет оценка поглощающих свойств дымового аэрозоля. В течение более чем 20 лет на Аэрозольной станции ИОА СО РАН ведутся круглосуточные почасовые измерения коэффициента направленного светорассеяния сухой основы субмикронного аэрозоля и массовой концентрации сажи [19–21].

В контролируемых лабораторных условиях в Большой аэрозольной камере ИОА СО РАН получен большой объем данных по характеристикам рассеяния, ослабления и поглощения дымов, образующихся при горении биомассы лесной природы. По результатам решения обратной задачи для спектрофелометрических измерений определены дисперсный состав и показатель преломления дымов, образующихся при различных режимах горения [7, 9, 10].

Измерения спектрального пропускания света признаны эффективным средством при решении задачи определения дисперсного состава аэрозоля в широком диапазоне размеров. Некоторые результаты исследования изменчивости микроструктуры

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

аэрозоля, полученные по данным солнечной фотометрии в условиях задымления атмосферы в Томске в летние сезоны 1999, 2003 и 2004 г., представлены в [22, 23]. При обращении спектральных измерений аэрозольной оптической толщины (АОТ), выполненных в Томске в 1999–2008 гг., получены обобщенные статистические данные о параметрах микроструктуры аэрозоля при наличии дымов в сравнении с фоновыми условиями [24].

В настоящей статье приведены результаты исследования влияния дымов лесных пожаров на изменчивость микроструктуры аэрозоля с использованием данных спектральных измерений коэффициента аэрозольного ослабления трассовым методом и аэрозольной оптической толщины методом солнечной фотометрии.

## 1. Характеристика условий измерений и описание экспериментальных данных

Для анализа были выбраны данные регулярных измерений в августе 2003 г. в районе г. Томска. В третьей декаде месяца было отмечено задымление воздуха, обусловленное лесными пожарами.

Коэффициенты аэрозольного ослабления  $\epsilon(\lambda)$  определялись базовым методом с помощью измерителя горизонтальной прозрачности атмосферы [25] на 11 длинах волн в диапазоне 0,45–3,91 мкм. Измерительная трасса протяженностью 830 м проходила на высотах 5–12 м над поверхностью земли. Из полученных значений спектрального пропускания атмосферы определялись коэффициенты общего ослабления излучения, а затем с помощью метода множественной линейной регрессии находились коэффициенты аэрозольного ослабления  $\epsilon(\lambda)$ . Погрешность определения  $\epsilon(\lambda)$  составляет  $0,01 \text{ км}^{-1}$ . Измерения  $\epsilon(\lambda)$  проводились круглосуточно с периодичностью 2 ч. Длительность измерительного цикла составляла ~30 мин.

На рис. 1 представлены box-диаграммы (box-whisker plot) распределений коэффициентов аэрозольного ослабления света  $\epsilon(\lambda_i)$ , полученных в фоновых условиях (1–20.08.2003 г.) и в период задымления атмосферы (21–31.08.2003 г.). Представленные диаграммы позволяют в наглядной форме сравнить особенности изменчивости распределений  $\epsilon(\lambda)$  в ситуациях «фон/дым».

Во всех случаях рассмотренные распределения отличаются сильно выраженной правосторонней асимметрией с более удлиненными правыми «хвостами» распределений. В фоновых условиях диапазон изменения коэффициента асимметрии  $\gamma_1$  составляет 1,48–2,13 и сужается до 1,41–1,49 при задымлении атмосферы. С приходом дымового аэрозоля происходит увеличение средних и медиан распределений  $\epsilon(\lambda)$  при  $\lambda \leq 1,22$  мкм. Различие средних значений  $\bar{\epsilon}(\lambda_i)$  в ситуациях «фон/дым» является значимым с доверительной вероятностью 0,95 для всех длин волн, кроме  $\lambda = 1,22$  и 1,60 мкм.

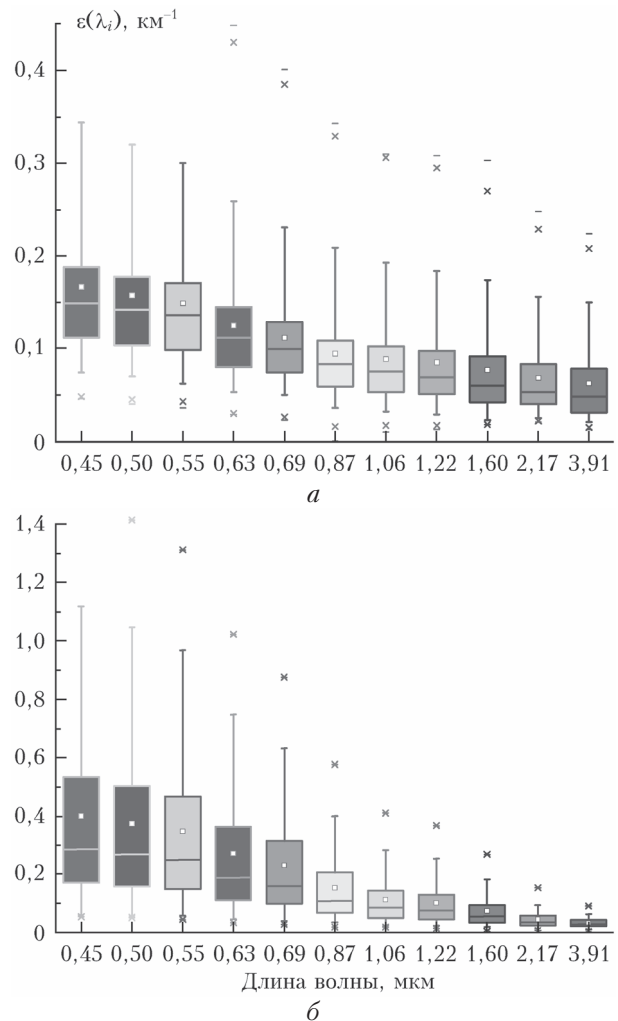


Рис. 1. Box-диаграммы распределений коэффициентов аэрозольного ослабления света  $\epsilon(\lambda_i)$  в приземном слое атмосферы, соответствующих: а – фоновым; б – дымовым ситуациям; границы ящиков на диаграммах отображают первый и третий квартили; линия внутри ящика – медиана; символ (□) – положение среднего значения; концы усов – 5-й и 95-й процентиля; (×) – 1-й и 99-й процентиля; (-) – максимальные и минимальные значения каждой выборки

Измерения аэрозольной оптической толщины проводились в ИОА СО РАН С.М. Сакеринным и Д.М. Кабановым с помощью солнечного фотометра SP-6 на 13 длинах волн в диапазоне 0,37–4 мкм [26]. Солнечный фотометр был расположен на высоте около 18 м, вблизи прохождения приземной трассы.

Компактное представление о статистических характеристиках спектральных измерений АОТ  $\tau(\lambda_i)$  в условиях «фон/дым» дают box-диаграммы на рис. 2. Так же как и в случае измерений  $\epsilon(\lambda_i)$  в приземном слое атмосферы, распределения  $\tau(\lambda_i)$  имеют значительную положительную асимметрию, более высокую в фоновых условиях с коэффициентами  $\gamma_1 = 2,39$ –2,99. При задымлении воздуха степень асимметрии распределений  $\tau(\lambda_i)$  уменьшается ( $\gamma_1 = 0,55$ –1,44), а средние и медианы распределений возрастают. Причем превышение средними зна-

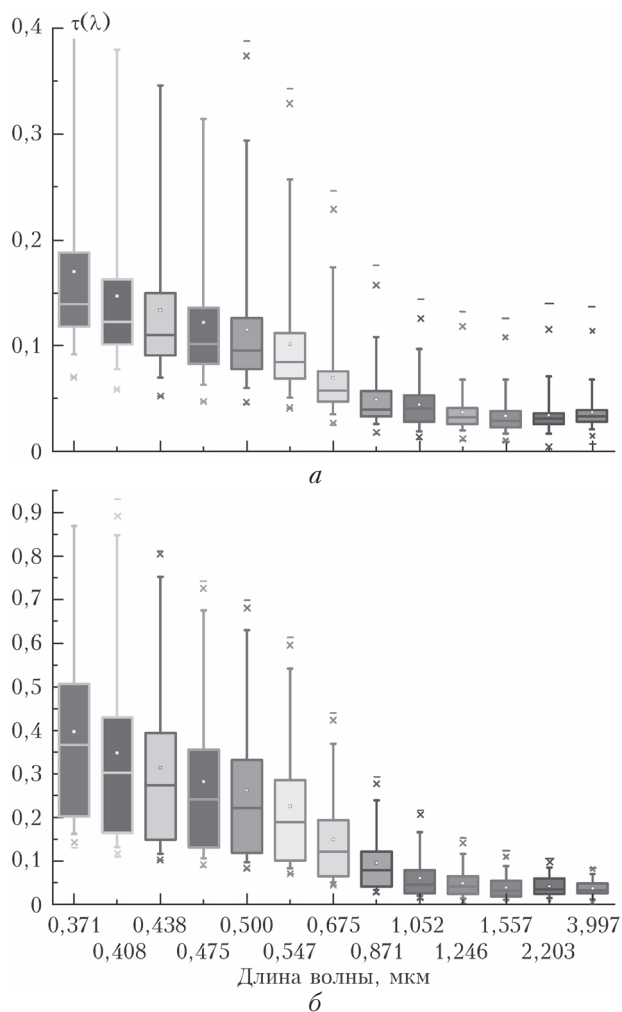


Рис. 2. Вох-диаграммы распределений АОТ  $\tau(\lambda_i)$  в столбе атмосферы, соответствующих: а – фоновым; б – дымовым ситуациям. Обозначения см. на рис. 1

чениями  $\bar{\tau}(\lambda_i)$ , полученными в период задымления, соответствующих фоновых значений является значимым с доверительной вероятностью 0,95 для всех длин волн, кроме  $\lambda = 1,557$  и  $3,997$  мкм.

## 2. Метод решения обратной задачи и результаты восстановления параметров микроструктуры

Для определения микроструктуры аэрозоля использовался численный алгоритм решения обратной задачи, разработанный на основе метода интегральных распределений [27]. В качестве искомой функции в методе [27] рассматривается суммарное геометрическое сечение частиц  $S(r)$  радиусом, большим или равным  $r$ . Применение интегральных аэрозольных распределений для описания дисперсного состава аэрозоля дает возможность восстанавливать приближенное устойчивое решение обратной задачи путем минимизации функционала невязки на множестве монотонных ограниченных функций.

При обращении оптические характеристики предварительно усреднялись на часовом интервале. По результатам решения обратной задачи рассчитывались микроструктурные параметры субмикронной ( $f$ ) и грубодисперсной ( $c$ ) фракций аэрозоля: геометрическое сечение  $S$ , объемная концентрация  $V$  и средний радиус частиц  $r_s = (3/4)V/S$ .

В табл. 1 и 2 представлены статистические характеристики микроструктурных параметров, восстановленных из данных оптических измерений, полученных для приземного слоя и всей толщи атмосферы в фоновых и дымовых условиях:  $m$  – среднее значение;  $\sigma$  – стандартное отклонение;  $m_e$  – медиана распределения;  $N$  – объем выборки.

Таблица 1

Статистические характеристики параметров микроструктуры аэрозоля в приземном слое атмосферы

Параметр	Фон ( $N = 123$ )			Дым ( $N = 88$ )		
	$m$	$\sigma$	$m_e$	$m$	$\sigma$	$m_e$
$S^{(f)}$ , км <sup>-1</sup>	0,0792	0,0483	0,0690	0,2157	0,2087	0,1445
$S^{(c)}$ , км <sup>-1</sup>	0,0232	0,0161	0,0176	0,0130	0,0077	0,0101
$S^{(tot)}$ , км <sup>-1</sup>	0,1024	0,0607	0,0884	0,2288	0,2153	0,1525
$V^{(f)} \cdot 10^9$	0,0180	0,0120	0,0151	0,0491	0,0454	0,0335
$V^{(c)} \cdot 10^9$	0,0630	0,0474	0,0474	0,0266	0,0149	0,0229
$V^{(tot)} \cdot 10^9$	0,0810	0,056	0,0606	0,0757	0,0573	0,0532
$r_s^{(f)}$ , мкм	0,171	0,0336	0,177	0,174	0,025	0,173
$r_s^{(c)}$ , мкм	1,963	0,412	2,048	1,619	0,497	1,545
$r_s^{(tot)}$ , мкм	0,575	0,174	0,575	0,290	0,089	0,265

Таблица 2

Статистические характеристики параметров микроструктуры аэрозоля в вертикальном столбе атмосферы

Параметр	Фон ( $N = 166$ )			Дым ( $N = 117$ )		
	$m$	$\sigma$	$m_e$	$m$	$\sigma$	$m_e$
$S^{(f)}$	0,0956	0,0542	0,0778	0,2857	0,1863	0,25700
$S^{(c)}$	0,0114	0,0056	0,0099	0,0111	0,0062	0,00895
$S^{(tot)}$	0,1069	0,0572	0,0898	0,2968	0,1904	0,272
$V^{(f)}$ , см <sup>3</sup> /м <sup>2</sup>	0,0143	0,0087	0,0112	0,0410	0,0271	0,0366
$V^{(c)}$ , см <sup>3</sup> /м <sup>2</sup>	0,0315	0,0156	0,0277	0,0285	0,0147	0,0238
$V^{(tot)}$ , см <sup>3</sup> /м <sup>2</sup>	0,0457	0,0216	0,0408	0,0695	0,0381	0,0594
$r_s^{(f)}$ , мкм	0,111	0,0109	0,107	0,107	0,0075	0,107
$r_s^{(c)}$ , мкм	2,089	0,264	2,130	1,959	0,186	1,949
$r_s^{(tot)}$ , мкм	0,336	0,087	0,325	0,188	0,042	0,182

Более детальную информацию о структуре и изменчивости восстановленных параметров микроструктуры аэрозоля в компактном виде содержат вох-диаграммы их распределений.

### 2.1. Объемная концентрация аэрозоля

На рис. 3 представлены вох-диаграммы распределений объемных концентраций  $V^{(f)}$ ,  $V^{(c)}$  и  $V^{(tot)} = V^{(f)} + V^{(c)}$  аэрозольных частиц в приземном слое атмосферы в ситуациях «фон/дым».

Так же как и при рассмотрении коэффициентов ослабления  $\epsilon(\lambda_i)$ , все распределения объемной концентрации частиц характеризуются значительной

положительной асимметрией. Причем коэффициенты асимметрии распределений  $V^{(f)}$  и  $V^{(c)}$  в дымовых ситуациях имеют меньшие значения (1,599 и 0,903) по сравнению с фоновыми (2,365 и 1,494). Независимо от наличия или отсутствия дыма, более высокие значения принимает коэффициент асимметрии  $\gamma_1$  для распределения  $V^{(f)}$ .

Из данных табл. 1 и рис. 3 следует, что в приземном слое в фоновых условиях объемная концентрация грубодисперсных частиц в среднем по ансамблю почти в 4 раза превышает содержание субмикронного аэрозоля, составляя 77,8% от общего объема аэрозоля.

С приходом дымового аэрозоля концентрация субмикронных частиц значительно возрастает как в абсолютном выражении, так и по отношению к грубодисперсной фракции. При задымлении атмосферы среднее по ансамблю значение  $V^{(f)}$  возрастает от  $0,18 \cdot 10^{-10}$  до  $0,49 \cdot 10^{-10}$ , или в 2,73 раза, и превышает соответствующее значение  $V^{(c)}$  в 1,85 раза. Зна-

чение  $V^{(f)}$  составляет 65% от суммарного объема аэрозоля  $V^{(tot)}$ . В период максимального задымления отношение среднечасовых значений  $V^{(f)}/V^{(c)}$  варьируется в интервале 2,12–4,03 при среднесуточном отношении, равном 2,93.

Влияние задымления в значительно меньшей степени отражается на статистических характеристиках суммарного объема частиц  $V^{(tot)}$ . Между средними значениями объемной концентрации  $V^{(tot)}$ , так же как и между медианами, не установлено значимого расхождения в ситуациях «фон/дым» при доверительной вероятности 0,95. При этом для распределений  $V^{(tot)}$  сохраняются близкие значения квартилей Q1 ( $0,417$  и  $0,40$ )  $\cdot 10^{-10}$  и Q3 ( $0,106$  и  $0,093$ )  $\cdot 10^{-9}$ .

Вох-диаграммы распределений объемных концентраций  $V^{(f)}$ ,  $V^{(c)}$  и  $V^{(tot)}$  аэрозольных частиц в столбе атмосферы, восстановленных по данным солнечной фотометрии в условиях «фон/дым», представлены на рис. 4.

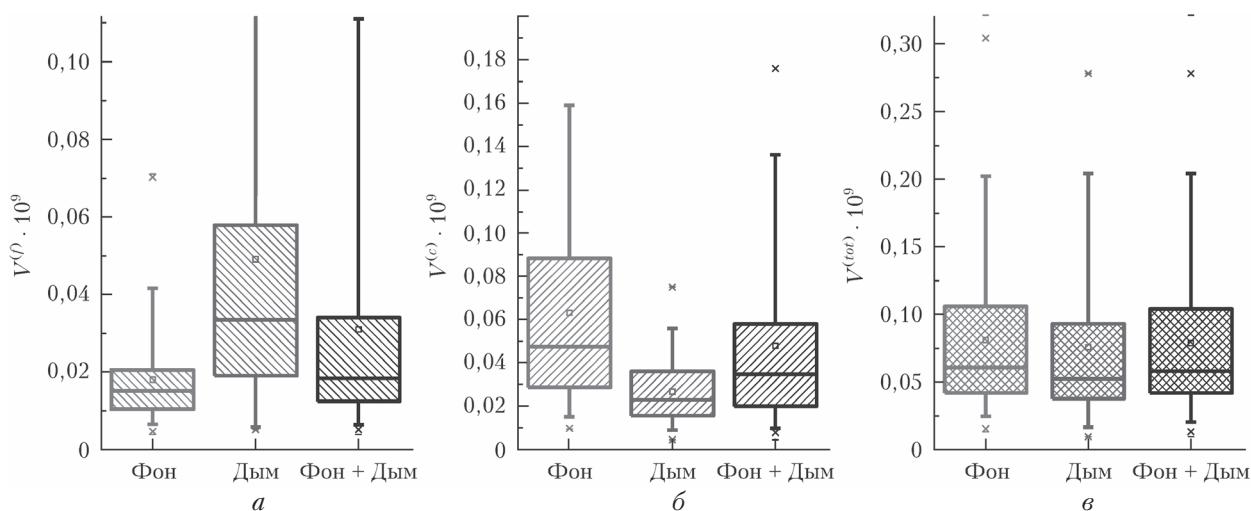


Рис. 3. Вох-диаграммы распределений объемных концентраций: *а* – субмикронных  $V^{(f)}$ ; *б* – грубодисперсных  $V^{(c)}$  частиц; *в* – их суммы  $V^{(tot)}$  в приземном слое атмосферы в ситуациях «фон/дым» по результатам обращения спектральных измерений  $\epsilon(\lambda_i)$

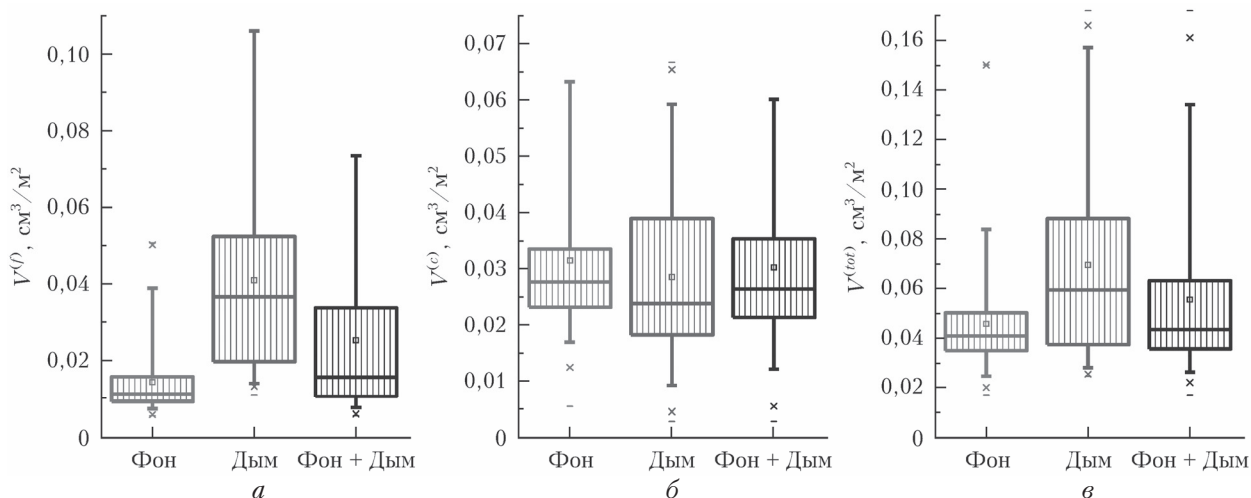


Рис. 4. Вох-диаграммы распределений объемных концентраций: *а* – субмикронных  $V^{(f)}$ ; *б* – грубодисперсных  $V^{(c)}$  частиц; *в* – их суммы  $V^{(tot)}$  в столбе атмосферы в ситуациях «фон/дым» по результатам обращения спектральных измерений  $\tau(\lambda_i)$



Общей чертой распределений объемной концентрации в столбе атмосферы, как и в приземном слое, является их положительная асимметрия, которая значительно снижается с приходом дымового аэрозоля. Для субмикронного аэрозоля коэффициент асимметрии  $\gamma_1$  распределения параметра  $V^{(f)}$  уменьшается почти вдвое, с 2,44 (фон) до 1,255 (дым); для грубодисперсного аэрозоля — в 3,8 раза, с 2,635 (фон) до 0,713 (дым).

Как и в приземном слое, в столбе атмосферы в фоновых условиях грубодисперсные частицы вносят основной вклад в объемную концентрацию аэрозоля, который в среднем по ансамблю достигает 68,9%. Для грубодисперсного аэрозоля не выявлено значимое различие между средними значениями параметра  $V^{(c)}$  в условиях «фон/дым», так же как и между медианами распределений.

С приходом дымов средняя по ансамблю объемная концентрация субмикронных частиц в столбе атмосферы значительно увеличивается, с 0,0143 до 0,041  $\text{см}^3/\text{м}^2$ , или в 2,87 раза. Относительный вклад субмикронного аэрозоля в суммарный объем в период задымления возрастает до 59%.

При максимальном задымлении атмосферы  $V^{(f)}$  достигает 0,118  $\text{см}^3/\text{м}^2$  и превышает концентрацию грубодисперсного аэрозоля почти в 3 раза. При переходе к средненежным значениям величина  $V^{(f)}$  понижается до 0,094  $\text{см}^3/\text{м}^2$ , а отношение  $V^{(f)}/V^{(c)} = 2,07$ .

## 2.2. Средний радиус частиц

Рассмотрим влияние задымления атмосферы на изменчивость среднего размера аэрозольных частиц. На рис. 5 представлены box-диаграммы распределений средних радиусов субмикронных  $r_s^{(f)}$ , грубодисперсных  $r_s^{(c)}$  частиц и суммарного ансамбля  $(f) + (c)$   $r_s^{(tot)}$  в приземном слое воздуха.

В фоновых условиях распределения  $r_s^{(f)}$  и  $r_s^{(c)}$  отличаются слабой отрицательной асимметрией ( $|\gamma_1| < 0,33$ ), которая меняет знак с приходом дымов.

Задымление воздуха не оказывает существенного влияния на вариации размеров субмикронных частиц (рис. 5, а). В фоновых и дымовых условиях средние по выборкам значения  $r_s^{(f)}$  отличаются незначимо и близки к 0,17 мкм. Также близкими к средним являются медианы распределений  $r_s^{(f)}$ . Из рис. 5, а следует, что в фоновых условиях половина значений  $r_s^{(f)}$  заключена в интервале 0,145(Q1)—0,195(Q3) мкм. С приходом дымов межквартильный размах Q3—Q1 сужается почти вдвое.

Изменчивость параметров  $r_s^{(c)}$  и  $r_s^{(tot)}$  при задымлении более заметна рис. 5, б, в. С приходом дымов наблюдается уменьшение как средних, так и медиан распределений указанных параметров. Средние по выборкам значения  $r_s^{(tot)}$  в ситуациях «фон/дым» значимо различаются с доверительной вероятностью 0,95. Аналогичное заключение относится к медианам распределений. В фоновых условиях 50% значений  $r_s^{(c)}$  заключено в интервале 1,65(Q1)—2,27(Q3) мкм. В дыму межквартильный размах  $r_s^{(c)}$  Q3—Q1 практически не изменяется.

При умеренной асимметрии распределения  $r_s^{(tot)}$  в фоновых условиях ( $\gamma_1 = 0,57$ ) среднее значение и медиана  $r_s^{(tot)}$  практически совпадают (0,575 мкм), а межквартильный размах Q3—Q1 составляет 0,256 мкм. В задымленной атмосфере происходит уменьшение среднего по суммарному ансамблю радиуса  $r_s^{(tot)}$  вдвое, до 0,29 мкм, обусловленное преимущественно значительным увеличением относительного вклада субмикронных частиц в суммарный объем аэрозоля (см. рис. 3, а, б). При этом межквартильный размах также сужается до 0,113 мкм, или в 2,3 раза.

Рассмотрим основные признаки, характеризующие изменчивость размеров аэрозольных частиц в вертикальном столбе и приземном слое атмосферы в ситуациях «фон/дым». Для сравнения обратимся к рис. 6 с box-диаграммами распределений параметров  $r_s^{(f)}$ ,  $r_s^{(c)}$  и  $r_s^{(tot)}$  в столбе атмосферы.

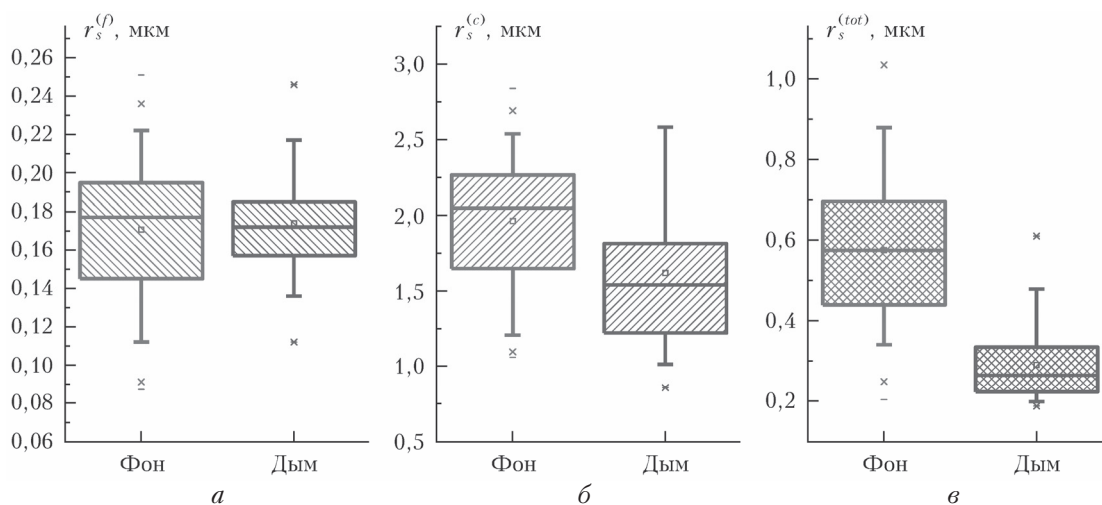


Рис. 5. Box-диаграммы распределений средних радиусов: а — субмикронных  $r_s^{(f)}$ ; б — грубодисперсных  $r_s^{(c)}$  частиц; в — суммарного ансамбля  $r_s^{(tot)}$  в приземном слое атмосферы в ситуациях «фон/дым» по результатам обращения спектральных измерений  $\epsilon(\lambda_i)$

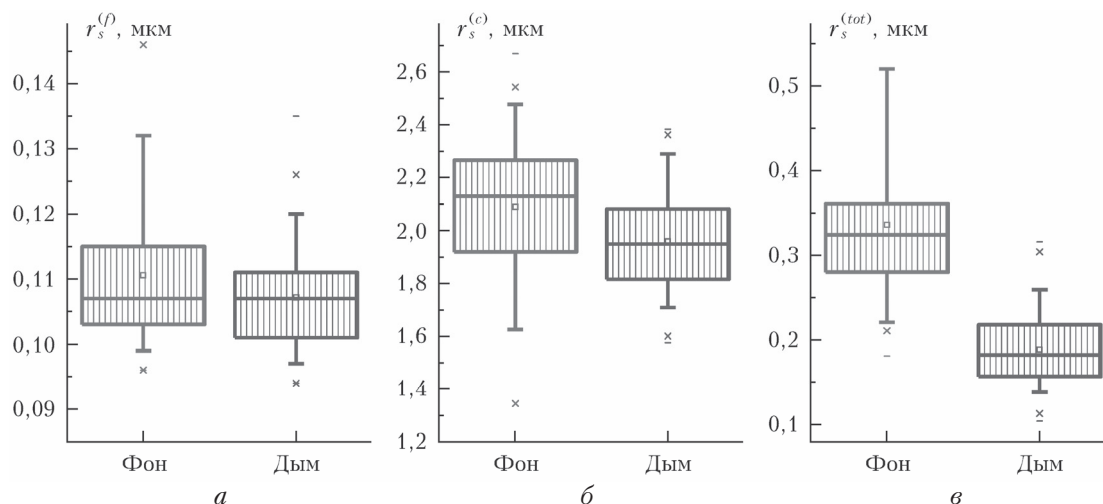


Рис. 6. Вох-диаграммы распределений средних радиусов: *a* – субмикронных  $r_s^{(f)}$ ; *б* – грубодисперсных  $r_s^{(c)}$  частиц; *в* – суммарного ансамбля  $r_s^{(tot)}$  в столбе атмосферы в ситуациях «фон/дым» по результатам обращения спектральных измерений  $\tau(\lambda_i)$

При переходе от приземного слоя ко всей толще атмосферы только для распределения  $r_s^{(c)}$  в фоновых условиях сохраняется отрицательная асимметрия, которая с приходом дымового аэрозоля становится слабой ( $\gamma_1 = 0,27$ ) и меняет знак (рис. 6, б).

Для субмикронного аэрозоля средние по выборкам значения  $r_s^{(f)}$  в столбе атмосферы меньше соответствующих значений в приземном слое. В зависимости от ситуации «фон/дым» разность между ними сохраняется примерно на одном уровне (0,06–0,067 мкм).

В отличие от приземного слоя для субмикронного аэрозоля средние по выборкам значения  $r_s^{(f)}$  в столбе атмосферы в ситуациях «фон/дым» значительно различаются с доверительной вероятностью 0,95. При этом медианы распределений  $r_s^{(f)}$  остаются практически без изменения (0,103 мкм). Также слабо меняется межквартильный размах (0,01–0,012 мкм).

Тенденции, отмеченные в изменчивости параметров  $r_s^{(c)}$  и  $r_s^{(tot)}$  приземного слоя, сохраняются в основном и для всей толщи атмосферы. При задымлении атмосферы происходит значимое умень-

шение средних значений и медиан распределений указанных параметров.

В фоновых условиях 50% значений  $r_s^{(c)}$  заключено в интервале 1,92(Q1)–2,27(Q3) мкм. С приходом дымового аэрозоля межквартильный размах распределений  $r_s^{(c)}$  уменьшается от 0,346 до 0,265 мкм.

По сравнению с приземным аэрозолем более низкие значения имеет средний радиус  $r_s^{(tot)}$  суммарного ансамбля частиц в столбе атмосферы как в фоновых условиях (0,336 мкм), так и в условиях задымления (0,188 мкм). Это обусловлено более высоким относительным вкладом субмикронного аэрозоля в суммарный объем аэрозоля в столбе атмосферы по сравнению с приземным слоем в ситуациях «фон/дым».

### 3. Анализ корреляционных связей

Различие между фоновым и дымовым аэрозолем проявляется также в характере статистических связей между объемными концентрациями субмикронных и грубодисперсных частиц. На рис. 7 пред-

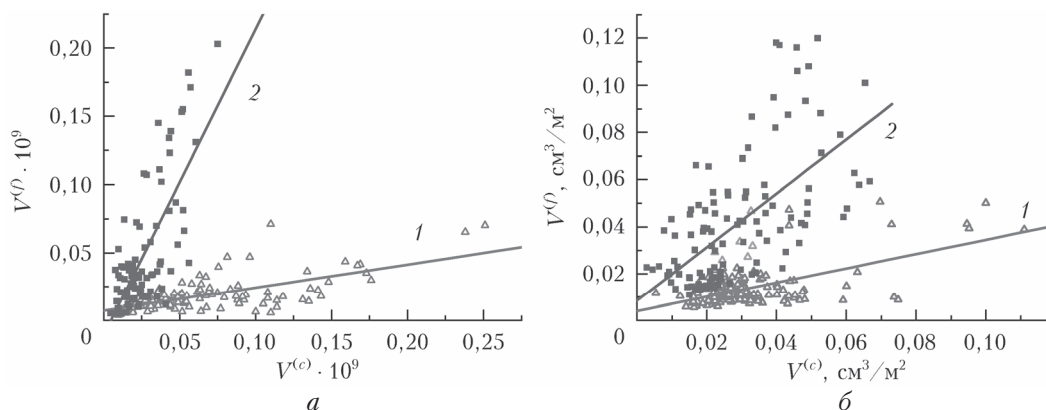


Рис. 7. Диаграммы рассеяния объемных концентраций субмикронных  $V^{(f)}$  и грубодисперсных  $V^{(c)}$  частиц в приземном слое (*a*) и в вертикальном столбе атмосферы (*б*): 1 – в фоновых условиях; 2 – при задымлении воздуха

ставлены диаграммы рассеяния параметров  $V^{(f)}$  и  $V^{(c)}$  в приземном слое и вертикальном столбе атмосферы.

На каждой из панелей в общем массиве точек отчетливо различаются два подмассива, которые соответствуют данным, полученным в фоновых и дымовых ситуациях. Для каждого подмножества на рисунках приведены прямые регрессии  $V^{(f)}$  по  $V^{(c)}$ . Коэффициенты линейных регрессий существенно отличаются и равны, например, для приземной атмосферы 0,17 (фон) и 2,25 (дым). При этом значения коэффициентов корреляции  $\rho$  между параметрами  $V^{(f)}$  и  $V^{(c)}$  сохраняются достаточно высокими — 0,67 (фон) и 0,74 (дым). Для всей толщи атмосферы значения коэффициентов корреляции между пара-

метрами  $V^{(f)}$  и  $V^{(c)}$  несколько ниже и в обоих случаях заключены в пределах 0,61–0,62.

Похожая картина наблюдается при рассмотрении корреляционных связей между объемной концентрацией частиц и спектральными характеристиками ослабления света. В качестве примера на рис. 8 представлены диаграммы рассеяния коэффициентов ослабления света  $\epsilon(\lambda_i)$  для ряда длин волн и объемной концентрации субмикронного  $V^{(f)}$  и грубодисперсного  $V^{(c)}$  аэрозоля в приземной атмосфере в ситуациях «фон/дым».

Для субмикронной фракции при  $\lambda = 0,45$  мкм коэффициенты корреляции  $\rho$  для частичных выборок «фон/дым» принимают высокие значения: 0,956 (фон) и 0,981 (дым). По указанным выборкам

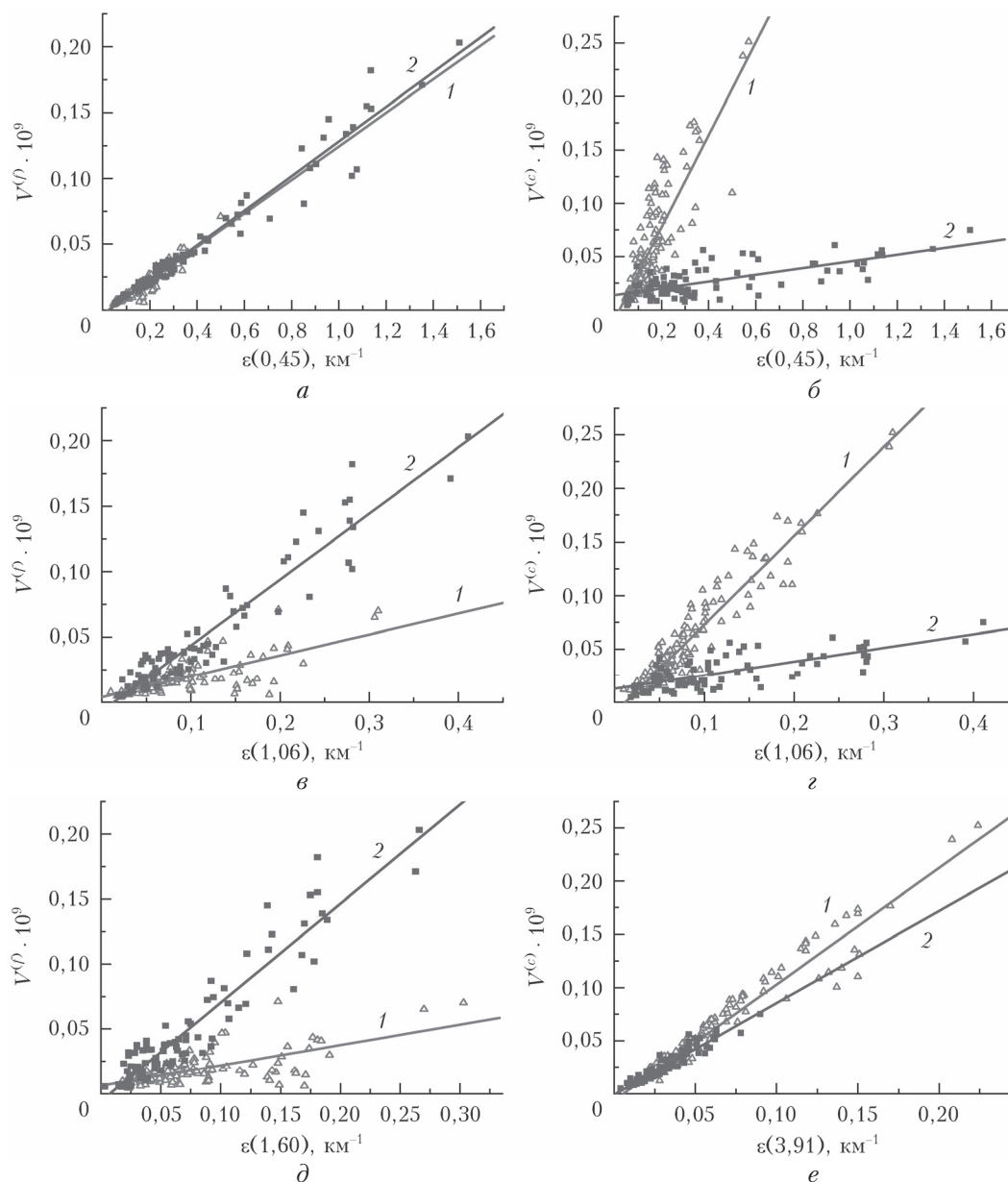


Рис. 8. Диаграммы рассеяния коэффициентов аэрозольного ослабления  $\epsilon(\lambda_i)$  и объемных концентраций  $V^{(f)}$  (а, в, д) и  $V^{(c)}$  (б, з, е): 1 — в фоновых условиях; 2 — при задымлении воздуха в приземном слое атмосферы; линиями обозначены регрессии для соответствующих подмассивов данных

на рис. 8, а построены прямые регрессии  $V^{(f)}$  по  $\epsilon(0,45)$ , которые имеют близкие значения коэффициентов регрессии, равные 0,128 и 0,132. Подмножества точек на рис. 8, а, соответствующие ситуациям «фон/дым», практически невозможно разграничить.

С увеличением  $\lambda$  подмножества точек, соответствующие на диаграммах рассеяния фоновым и дымовым ситуациям, становятся все более различимыми (см. рис. 8, в, д). При этом наклон прямых 1 и 2 регрессий  $V^{(f)}$  по  $\epsilon(\lambda_i)$ , построенных по частичным выборкам, также различается все сильнее. В частности, прямым 1 и 2 регрессии  $V^{(f)}$  по  $\epsilon(1,60)$  на рис. 8, д соответствуют существенно разные коэффициенты регрессии (0,158 и 0,762).

В случае грубодисперсных частиц (рис. 8, б, г, е) с изменением длины волны наблюдается противоположная тенденция. Для небольших длин волн подмножества точек на диаграммах рассеяния  $\epsilon(\lambda_i)$  и  $V^{(c)}$ , соответствующих ситуациям «фон/дым», имеют минимальную область перекрытия. Коэффициенты регрессии  $V^{(c)}$  по  $\epsilon(\lambda_i)$  на частичных выборках значительно различаются и, например, для  $\lambda = 0,45$  мкм равны 0,433 (фон) и 0,0315 (дым). При переходе в ИК-диапазон диаграммы рассеяния и  $V^{(c)}$ , построенные на частичных выборках, все более перекрываются. Коэффициенты регрессии также сближаются и, например, для  $\lambda = 3,91$  мкм равны 1,09 (фон) и 0,86 (дым).

Аналогичная ситуация наблюдается в столбе атмосферы. Соответствующие значения коэффициентов регрессии  $b$  приведены в табл. 3. В ситуациях «фон/дым» коэффициенты регрессии  $V^{(f)}$  по  $\tau(\lambda_i)$  принимают близкие значения в коротковолновой области спектра, которые расходятся с увеличением длины волны света.

Таблица 3

**Коэффициенты регрессии  $b$  объемных концентраций  $V^{(f)}$  и  $V^{(c)}$  по  $\tau(\lambda_i)$  в столбе атмосферы в ситуациях «фон/дым»;  $\rho$  – коэффициент корреляции**

Параметр	$\lambda_i$ , мкм	$\rho$ (фон)	$b$ (фон)	$\rho$ (дым)	$b$ (дым)
$V^{(f)}$	0,408	0,9855	0,1056	0,9921	0,1260
	1,55	0,5459	0,2645	0,8533	0,9036
$V^{(c)}$	0,408	0,6431	0,1237	0,6691	0,0461
	3,997	0,9784	0,9045	0,9891	0,8215

Максимальное различие в коэффициентах регрессии объемной концентрации грубодисперсных частиц  $V^{(c)}$  по  $\tau(\lambda_i)$  имеет место для коротких длин волн.

### Заключение

Изучено влияние задымления воздуха в результате природных пожаров на изменчивость микроструктурных параметров аэрозоля в приземном слое и вертикальном столбе атмосферы. В качестве исследуемых параметров рассматривались геометрическое сечение, объемная концентрация и средний радиус частиц субмикронной, грубодисперсной фракций аэрозоля и полного ансамбля.

Параметры микроструктуры находились из решения обратной задачи для спектральных измерений аэрозольного коэффициента ослабления в приземной атмосфере и аэрозольной оптической толщины по данным солнечной фотометрии. Для микроструктурных параметров в фоновых и дымовых условиях получены оценки статистических характеристик, включая средние значения, стандартные отклонения, медианы и квартили распределений.

Установлено, что в фоновых условиях в объемном содержании аэрозоля преобладает вклад грубодисперсных частиц в приземном слое и столбе атмосферы. С приходом дымового аэрозоля значительно возрастает объемная концентрация частиц субмикронной фракции, составляя 65% в приземном слое и 59% в вертикальном столбе воздуха. В ситуациях «фон/дым» средние по выборкам радиусы субмикронных частиц  $r_s^{(f)}$  в приземном слое отличаются несущественно и близки к 0,17 мкм, превышая аналогичные значения в столбе атмосферы на 0,06–0,067 мкм.

Изменчивость среднего радиуса грубодисперсных частиц  $r_s^{(c)}$  выше, чем у субмикронных. В фоновых условиях средние по выборкам значения  $r_s^{(c)}$  в приземном слое и столбе атмосферы значимо отличаются, составляя 1,96 и 2,09 мкм соответственно. При задымлении воздуха происходит уменьшение средних значений  $r_s^{(c)}$ , наиболее существенное в приземном слое (до 1,62 мкм).

Вследствие изменения соотношения между объемными концентрациями частиц двух фракций в задымленной атмосфере происходит уменьшение среднего по суммарному ансамблю радиуса частиц с 0,575 до 0,29 мкм в приземном слое и с 0,336 до 0,188 мкм во всей толще, т.е. в 1,8–2 раза.

В задымленной атмосфере изменяется характер статистических связей между объемными концентрациями частиц отдельных фракций и измерениями аэрозольного ослабления света. Для субмикронного аэрозоля различие в коэффициентах регрессии  $V^{(f)}$  по  $\epsilon(\lambda)$  и  $\tau(\lambda)$ , соответствующих ситуациям «фон/дым», растет с увеличением длины волны. Для грубодисперсного аэрозоля прослеживается противоположная тенденция.

Авторы выражают признательность С.М. Сакрину и Д.М. Кабанову за предоставленные для анализа экспериментальные данные.

Исследования В.В. Веретенникова, С.С. Меньщиковой выполнены в рамках государственного задания ИОА СО РАН (№ АААА-А17-117021310144-9; исследования В.Н. Ужегова выполнены при финансовой поддержке РНФ (грант № 19-77-20109).

1. Fuzzi S., Baltensperger U., Carslaw K., Decesari S., Denier van der Gon H., Facchini M.C., Fowler D., Koren I., Langford B., Lohmann U., Nemitz E., Pandis S., Riipinen I., Rudich Y., Schaap M., Slowik J.G., Spracklen D.V., Vignati E., Wild M., Williams M., Gilaroni S. Particulate matter, air quality and climate: Lessons learned and future needs // Atmos. Chem. Phys. 2015. V. 15. P. 8217–8299.
2. Climate Change 2007: The Physical Science Basis / S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, H.L. Miller (eds.). Cambridge University Press, 2007. 996 p.



3. Boucher O., Randall D., Artaxo P., Bretherton C., Feingold G., Forster P., Kerminen V.-M., Kondo Y., Liao H., Lohmann U., Rasch P., Satheesh S.K., Sherwood S., Stevens B., Zhang X.Y. Clouds and Aerosols // *Climate Change 2013: The Physical Science Basis* / T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley (eds.). Cambridge University Press, 2014. DOI: 10.1017/SBO9781107415324.
4. *Health Aspects of Air Pollution with Particulate Matter, Ozone and Nitrogen Dioxide*. World Health Organization, 2003.
5. WHO Air Quality Guidelines for Particulate Matter, Ozone, Nitrogen Dioxide and Sulfur Dioxide. WHO, 2006. URL: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/107823> (last access: 11.05.2019).
6. *Health Effects of Particulate Matter: Policy Implications for Countries in Eastern Europe, Caucasus and Central Asia*. World Health Organization, 2013.
7. Рахимов Р.Ф., Козлов В.С., Тумаков А.Г., Шмаргунов В.П. Оптические и микрофизические свойства смешанного дыма по данным поляризационных спектрофелометрических измерений // *Оптика атмосфер. и океана*. 2014. Т. 27, № 1. С. 59–68.
8. Рахимов Р.Ф., Козлов В.С., Панченко М.В., Тумаков А.Г., Шмаргунов В.П. Свойства атмосферного аэрозоля в дымовых шлейфах лесных пожаров по данным спектрофелометрических измерений // *Оптика атмосфер. и океана*. 2014. Т. 27, № 2. С. 126–133; Rakhimov R.F., Kozlov V.S., Panchenko M.V., Tumakov A.G., Shmargunov V.P. Properties of atmospheric aerosol in smoke plumes from forest fires according to spectronephelometer measurements // *Atmos. Ocean. Opt.* 2014. V. 27, N 3. P. 275–282.
9. Поповичева О.Б., Козлов В.С., Рахимов Р.Ф., Шмаргунов В.П., Киреева Е.Д., Персиянцева Н.М., Тимофеев М.А., Engling G., Eleftheriadis K., Diapouli L., Панченко М.В., Zimmermann R., Schnelle-Kreis J. Оптические-микрофизические и физико-химические характеристики дымов горения сибирских биомасс: эксперименты в аэрозольной камере // *Оптика атмосфер. и океана*. 2016. Т. 29, № 4. С. 323–331; Popovicheva O.B., Kozlov V.S., Rakhimov R.F., Shmargunov V.P., Kireeva E.D., Persiantseva N.M., Timofeev M.A., Engling G., Eleftheriadis K., Diapouli L., Panchenko M.V., Zimmermann R., Schnelle-Kreis J. Optical-microphysical and physical-chemical characteristics of Siberian biomass burning: Experiments in aerosol chamber // *Atmos. Ocean. Opt.* 2016. V. 29, N 6. P. 492–500.
10. Козлов В.С., Рахимов Р.Ф., Шмаргунов В.П. Изменчивость конденсационных свойств смешанного дыма горения биомассы на различных стадиях его эволюции // *Оптика атмосфер. и океана*. 2017. Т. 30, № 10. С. 846–855; Kozlov V.S., Rakhimov R.F., Shmargunov V.P. Variations in condensation properties of mixed smoke from biomass burning at different smoke evolution stages // *Atmos. Ocean. Opt.* 2018. V. 31, N 1. P. 9–18. URL: <https://doi.org/10.1134/S1024856018010086> (last access: 14.02.2019).
11. Антохин П.Н., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Воронцовская Н.Г., Головкин А.К., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Козлов А.С., Малышкин С.Б., Певнева Г.С., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Складнева Т.К., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В. Органический аэрозоль в атмосфере Сибири и Арктики. Ч. 3. Продукты лесных пожаров // *Оптика атмосфер. и океана*. 2017. Т. 30, № 9. С. 740–749.
12. Ситнов С.А., Горчаков Г.И., Свириденков М.А., Горчакова И.А., Карпов А.В., Колесникова А.Б. Аэрокосмический мониторинг дымового аэрозоля на европейской части России в период массовых пожаров лесов и торфяников в июле–августе 2010 г. // *Оптика атмосфер. и океана*. 2012. Т. 25, № 12. С. 1062–1076; Sitnov S.A., Gorchakov G.I., Sviridenkov M.A., Gorchakova I.A., Karpov A.V., Kolesnikova A.B. Aerospace monitoring of smoke aerosol over the European part of Russia in the period of massive forest and peat-bog fires in July–August of 2010 // *Atmos. Ocean. Opt.* 2013. V. 26, N 4. P. 265–280.
13. Ситнов С.А., Мохов И.И., Горчаков Г.И., Д жола А.В. Дымная мгла на европейской части России летом 2016 г.: связь с лесными пожарами в Сибири и аномалиями атмосферной циркуляции // *Метеорол. и гидрол.* 2017. № 8. С. 50–63.
14. Томишин О.А., Соловьев В.С. Исследование крупномасштабных неоднородностей аэрозольных полей, вызванных лесными пожарами в Сибири // *Оптика атмосфер. и океана*. 2016. Т. 29, № 7. С. 598–602.
15. Журавлева Т.Б., Панченко М.В., Козлов В.С., Насртдинов И.М., Полькин В.В., Терпугова С.А., Чернов Д.Г. Модельные оценки динамики вертикальной структуры поглощения солнечного излучения и температурных эффектов в фоновых условиях и экстремально задымленной атмосфере по данным самолетных наблюдений // *Оптика атмосфер. и океана*. 2017. Т. 30, № 10. С. 834–839; Zhuravleva T.B., Panchenko M.V., Kozlov V.S., Nasrtdinov I.M., Pol'kin V.V., Terpugova S.A., Chernov D.G. Model estimates of dynamics of the vertical structure of solar absorption and temperature effects under background conditions and in extremely smoke-laden atmosphere according to data of aircraft observations // *Atmos. Ocean. Opt.* 2018. V. 31, N 1. P. 25–30.
16. Складнева Т.К., Белан Б.Д., Аршинов М.Ю. Радиационный режим г. Томска в условиях дымной мглы // *Оптика атмосфер. и океана*. 2015. Т. 28, № 3. С. 215–222.
17. Горчакова И.А., Мохов И.И. Радиационный и температурный эффекты дымового аэрозоля в Московском регионе в период летних пожаров 2010 г. // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана*. 2012. Т. 48, № 5. С. 496–503.
18. Панченко М.В., Журавлева Т.Б., Козлов В.С., Насртдинов И.М., Полькин В.В., Терпугова С.А., Чернов Д.Г. Оценка радиационных эффектов аэрозоля в фоновых и задымленных условиях атмосферы Сибири на основе эмпирических данных // *Метеорол. и гидрол.* 2016. № 2. С. 45–54.
19. Kozlov V.S., Panchenko M.V., Tumakov A.G., Shmargunov V.P., Yausheva E.P. Some peculiarities of the mutual variability of the content of soot and sub-micron aerosol in the near-ground air layer // *J. Aerosol Sci.* 1997. V. 28, N 1. P. 231–232.
20. 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.
21. 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.
22. Веретенников В.В., Меньшикова С.С. Особенности восстановления микроструктурных параметров аэрозоля из измерений аэрозольной оптической толщины. Часть II. Результаты обращения // *Оптика атмосфер. 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.
23. *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; *Maikienko E.V., Kabanov D.M., Rakhimov R.F., Sakerin S.M.* Variations of aerosol microstructure under smoke effect assessed from inversion of spectral optical measurements // *Atmos. Ocean. Opt.* 2007. V. 20, N 4. P. 287–293.
  24. *Сакерин С.М., Веретенников В.В., Журавлева Т.Б., Кабанов Д.М., Насртдинов И.М.* Сравнительный анализ радиационных характеристик аэрозоля в ситуациях дымов пожаров и обычных условиях // *Оптика атмосфер. и океана.* 2010. Т. 23, № 6. С. 451–461.
  25. *Пхалагов Ю.А., Ужegov В.Н., Щелканов Н.Н.* Автоматизированный многоволновой измеритель спектральной прозрачности приземной атмосферы // *Оптика атмосфер. и океана.* 1992. Т. 5, № 6. С. 667–671.
  26. *Кабанов Д.М., Сакерин С.М., Турчинович С.А.* Солнечный фотометр для научного мониторинга (аппаратура, методики, алгоритмы) // *Оптика атмосфер. и океана.* 2001. Т. 14, № 12. С. 1132–1169.
  27. *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. 306–312; *Veretennikov V.V., Men'shchikova S.S.* Features of retrieval of microstructural parameters of aerosol from measurements of aerosol optical depth. Part I. Technique for solving the inverse problem // *Atmos. Ocean. Opt.* 2013. V. 26, N 6. P. 473–479.

*V.V. Veretennikov, S.S. Men'shchikova, V.N. Uzhegov. Variability of the aerosol microstructure under the forest fire smoke effect retrieved from spectral characteristics of light extinction in the near-surface air layer and in the atmospheric column.*

The features of the aerosol microstructure are investigated in the near-surface layer and vertical column of the atmosphere when smoke enters the atmosphere. The aerosol microstructure parameters were determined by solving the inverse problem for spectral measurements of the aerosol extinction coefficient using the base method, and of the aerosol optical thickness, using the solar photometry method in the clean atmosphere and under conditions of the smoke-polluted atmosphere near Tomsk. The geometric cross section, volume concentration, and mean radius of aerosol particles of submicron and coarse fractions were calculated. For background conditions, the coarse fraction prevails in the total volume of the aerosol. The submicron fraction becomes dominant under the condition of the smoke-polluted atmosphere. As a result, the particle radius averaged over the total ensemble decreases in the smoke-polluted atmosphere. The regression relations between the microstructure parameters of different aerosol fractions and the spectral characteristics of the light extinction significantly change in the smoke-polluted atmosphere.