

ОПТИКА КЛАСТЕРОВ, АЭРОЗОЛЕЙ И ГИДРОЗОЛЕЙ

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 I. Геометрическое сечение субмикронных
и грубодисперсных 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.

Представлены результаты восстановления параметров микроструктуры приземного аэрозоля в летний период из спектральных измерений коэффициента аэрозольного ослабления света. Экспериментальные данные получены с помощью измерителя спектральной прозрачности атмосферы на 11 длинах волн в диапазоне 0,45–3,91 мкм на горизонтальной трассе в районе г. Томска. Для решения обратной задачи был использован численный алгоритм на основе метода интегральных распределений. В первой части работы проведен анализ изменчивости геометрического сечения частиц субмикронной, грубодисперсной фракций и полного ансамбля. Рассмотрено влияние задымления атмосферы на вариации микроструктурных параметров. Показано, что основной вклад (73–77%) в суммарное сечение приземного аэрозоля вносят частицы субмикронной фракции. Коэффициенты вариации сечений частиц на месячных интервалах без учета влияния дымов имеют высокие значения в пределах 53–61% для субмикронной и 53–69% для грубодисперсной фракций аэрозоля. Исследованы корреляционные связи между коэффициентами аэрозольного ослабления света на разных длинах волн и восстановленными параметрами микроструктуры аэрозоля.

Ключевые слова: коэффициент аэрозольного ослабления света, микроструктура приземного аэрозоля, обратные задачи; aerosol extinction coefficient, near-surface aerosol microstructure, inverse problem.

Введение

На протяжении длительного периода в районе г. Томска проводятся регулярные измерения спектрального пропускания атмосферы с использованием многоволнового солнечного фотометра по всей толще атмосферы и базового метода на горизонтальной трассе. По измеренным сигналам определяются аэрозольная оптическая толщина (АОТ) в вертикальном столбе атмосферы $\tau(\lambda)$ и коэффициент аэрозольного ослабления света $\epsilon(\lambda)$ в приземном слое атмосферы. В цикле работ [1, 2] авторами выполнен сравнительный анализ одновременных вариаций спектральных зависимостей $\tau(\lambda)$ и $\epsilon(\lambda)$, их корреляционных связей в различных условиях, оценивалась высота однородного слоя аэрозоля; отмечена необходимость изучения микроструктурных параметров аэрозоля.

В исследованиях изменчивости оптических и микрофизических параметров приземного аэрозоля

основное внимание уделяется преимущественно характеристикам субмикронного аэрозоля. Систематические измерения характеристик субмикронного аэрозоля и черного углерода в приземном слое воздуха ведутся на Аэрозольной станции Института оптики атмосферы (ИОА) СО РАН начиная с 1996 г. [3–7]. Исследованы особенности годового хода, вариации и тренды межгодовой изменчивости среднегодовых и среднесезонных значений аэрозольных характеристик. По данным измерений на Звенигородской научной станции Института физики атмосферы РАН в 2001–2006 гг., в работе [8] проанализированы долгопериодные вариации массовой концентрации и параметра конденсационной активности приземного субмикронного аэрозоля.

Информация о микроструктуре аэрозоля может быть получена путем решения соответствующей обратной задачи. Результаты обращения наземных измерений спектральных зависимостей $\epsilon(\lambda)$ до настоящего времени носили только эпизодический характер [9, 10]. Большой объем информации об изменчивости параметров микроструктуры аэрозоля в вертикальном столбе атмосферы получен в ИОА СО РАН с использованием численных алгоритмов

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

решения обратной задачи для спектральных измерений АОТ $\tau(\lambda)$ [11] по данным солнечной фотометрии. В [12] рассмотрены особенности временной изменчивости объемной концентрации и среднего радиуса аэрозольных частиц в вертикальном столбе атмосферы по данным солнечной фотометрии, полученным в течение июля—августа 2003 г.

Для указанного периода в статье представлены аналогичные результаты анализа изменчивости микроструктуры приземного аэрозоля, восстановленной из решения обратной задачи для спектральных измерений коэффициента аэрозольного ослабления света $\epsilon(\lambda)$. Работа состоит из двух частей. Первая часть содержит описание оптико-метеорологического состояния атмосферы в период наблюдений, методику обращения измерений $\epsilon(\lambda)$. По результатам решения обратной задачи исследована изменчивость параметров микроструктуры аэрозоля, таких как геометрическое сечение частиц субмикронной и грубодисперсной фракций. Рассмотрены корреляционные связи между восстановленными параметрами микроструктуры и измеренными значениями коэффициентов аэрозольного ослабления света. Во второй части [13] основное внимание уделено анализу изменчивости объемной концентрации и среднего радиуса частиц двух основных фракций аэрозоля в фоновых условиях и при задымлении атмосферы в результате пожаров. Проведено сравнение параметров микроструктуры аэрозоля, восстановленных по данным оптических измерений на горизонтальной и наклонной трассах.

1. Характеристика условий измерения и описание экспериментальных данных

В Западной Сибири 2003 г. отличался рядом климатических особенностей. В обзоре [14] отмечены такие климатические аномалии (отклонения от нормы — средней величины базового периода 1961—1990 гг.), как среднегодовые и среднесезонные аномалии температуры воздуха и аномалии средних за год и сезоны месячных сумм осадков. Например, аномалия температуры воздуха летом 2003 г., осредненной по территории Западной Сибири, составила 1,7 °C и была максимальной среди регионов России. В Томске значительное отклонение среднемесячной температуры от нормы достигалось в июне (4,5 °C) и августе (3,1 °C) 2003 г.

При значительном росте осадков в Западной Сибири с начала 1990-х гг. в 2003 г. впервые за прошедшие 10 лет наблюдался дефицит осадков. По данным [14], в летний сезон аномалия составила 5,86 мм. В июле и августе дефицит осадков в Томске составил 59 и 62% [15] от нормы соответственно.

В работе [16] отмечены особенности синоптических условий в Томске в 2003 г., когда повторяемость циклонических образований была минимальной за 1993—2004 гг. и составила 3,8%, причем в течение летнего сезона циклоны и антициклоны

не наблюдались вообще. К другим особенностям 2003 г. относится максимальное за 1995—2016 гг. поступление суммарной солнечной радиации в Томске [17, 18] в целом за год, а также в мае, июне и августе 2003 г. В статье [19] установлено, что между синоптическими условиями и прозрачностью атмосферы существуют устойчивые взаимосвязи.

Измерения горизонтальной прозрачности атмосферы проводились в летний период 2003 г. в районе г. Томска базовым методом с использованием автоматизированного фотометра [20] на 11 длинах волн в диапазоне 0,45—3,9 мкм. Приземная трасса протяженностью 830 м проходила на высотах 5—12 м над уровнем подстилающей поверхности. 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 км⁻¹. Измерения проводились круглосуточно с периодичностью измерительных циклов 2 ч. Длительность измерительного цикла составляла около 30 мин. Полученные значения коэффициента аэрозольного ослабления усреднялись на часовом интервале. Общее число среднечасовых спектров составило около 500 реализаций.

На рис. 1 представлены временные ряды (N — номер реализации) и гистограммы распределения коэффициентов аэрозольного ослабления $\epsilon(\lambda)$ на двух длинах волн $\lambda = 0,55$ и $1,06$ мкм, полученные в июле и августе 2003 г. На рис. 1, б обращает на себя внимание резкий рост $\epsilon(\lambda)$ в третьей декаде августа, начиная с 17:00 21.08.2003 г. ($N = 135$). По данным наземных наблюдений в указанный период в атмосфере региона отмечено появление дымового аэрозоля. Аналогичная особенность наблюдается также и на других длинах волн.

Представленные гистограммы содержат обобщенную информацию о структуре и изменчивости оптических характеристик в течение двух месяцев. При построении гистограмм для августа из измерений были исключены данные, полученные в условиях задымления атмосферы. Все гистограммы имеют унимодальный вид с положительным коэффициентом асимметрии. На панелях гистограмм приведены также среднемесячные значения (m) и стандартные отклонения (σ) соответствующих характеристик. Статистические параметры коэффициентов $\epsilon(\lambda)$, полученных в августе, указаны через слэш (/) в двух вариантах: с учетом и без учета задымления атмосферы. Видно, что в условиях чистой атмосферы статистические параметры для однотипных оптических характеристик в разные месяцы отличаются незначительно.

Была выполнена оценка значимости расхождения средних и дисперсий коэффициентов ослабления $\epsilon(\lambda)$, полученных для чистой атмосферы за два разных периода. Для проверки значимости различия среднемесячных значений коэффициентов $\epsilon(\lambda)$ использовался критерий Сатервайта [21]. При равенстве средних в обеих выборках статистика кри-

терия имеет распределение Стьюдента. Из результатов проверки следует, что значимое расхождение между среднемесячными значениями $\varepsilon(\lambda)$ имеет место для коэффициентов ослабления на длинах волн не менее 0,87 мкм с надежностью (доверительной вероятностью) 0,95.

Проверка гипотезы H_0 равенства дисперсий коэффициентов $\varepsilon(\lambda)$, выполненная с использованием статистики критерия Фишера [21], показала отсутствие оснований для ее отклонения при измерениях на всех длинах волн в диапазоне 0,45–3,91 мкм с доверительной вероятностью 0,95.

Компактное представление о функциях распределения коэффициентов ослабления $\varepsilon(\lambda)$ на месячных интервалах для всех длин волн измерений дают box-диаграммы (box-whisker plot), изображенные

на рис. 2. Они позволяют наглядно сравнить особенности спектральной изменчивости распределений $\varepsilon(\lambda)$. Видно, что характер распределений сохраняется при изменении длины волны. В частности, для всех λ среднемесячные значения распределений больше, чем их медианы, а правые «хвосты» распределений значительно превышают их левые «хвосты». Для разных месяцев 95-е процентиля отличаются незначительно при любых длинах волн.

В период оптических измерений выполнялись наблюдения за метеорологическими параметрами приземного слоя атмосферы. Общее представление об изменчивости температуры (t), относительной влажности (RH) воздуха и скорости ветра (V) по результатам наблюдений [22] дают их статистические характеристики, приведенные в табл. 1.

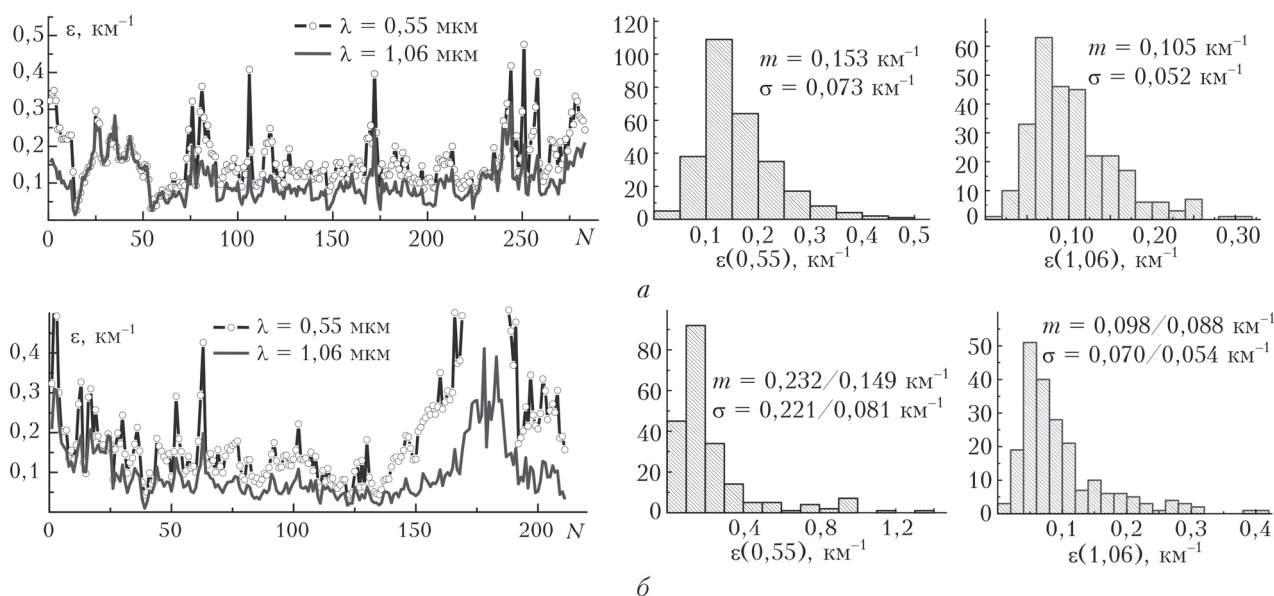


Рис. 1. Временные ряды и гистограммы распределения коэффициентов аэрозольного ослабления в июле (а) и августе 2003 г. (б)

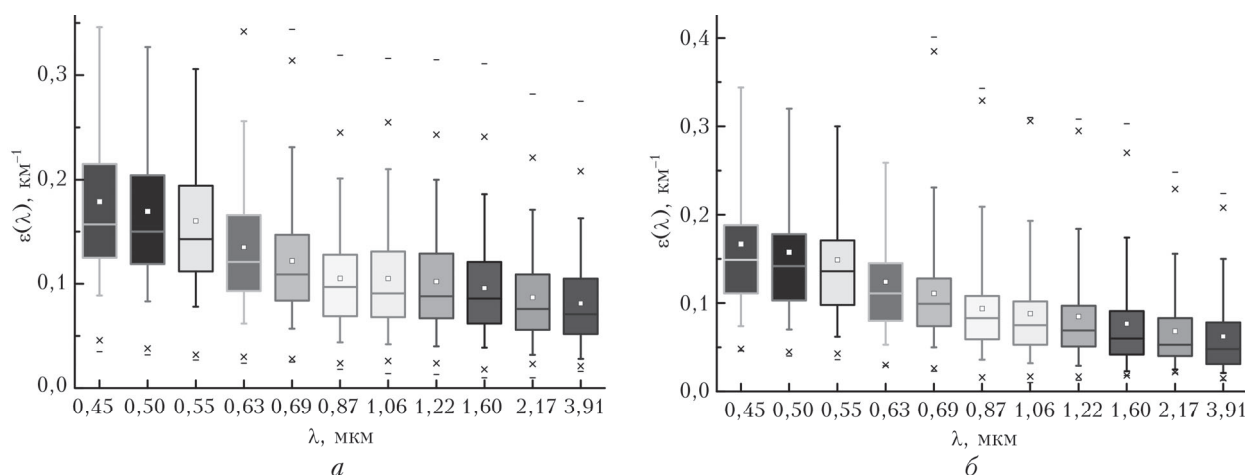


Рис. 2. Box-диаграммы распределения значений спектральных коэффициентов аэрозольного ослабления в июле (а) и августе 2003 г. (б). Границы ящиков – первый и третий квартили; линия внутри ящика – медиана; \square – положение среднего значения; концы «усов» – 5-й и 95-й процентиля; «x» – 1-й и 99-й процентиля; «-» – максимальные и минимальные значения каждой выборки

Таблица 1

Статистические характеристики метеопараметров атмосферы в период наблюдений; m – среднее значение; σ – стандартное отклонение; $Var = \sigma/m \cdot 100\%$ – коэффициент вариации

Параметр	Июль 2003 г.			Август 2003 г.		
	m	σ	$Var, \%$	m	σ	$Var, \%$
$t, ^\circ\text{C}$	18,6	5,65	30,4	18,3	5,15	28,1
$RH, \%$	64,6	17,9	27,7	63,3	19,9	31,4
$V, \text{м/с}$	1,71	0,73	42,7	1,85	0,85	45,9

Проверка значимости различия среднемесячных значений метеопараметров показала, что с доверительной вероятностью 0,95 не установлено значимое расхождение между среднемесячными значениями температуры t и относительной влажности RH . Напротив, при той же надежности отличие среднемесячных значений скорости ветра V определено как значимое.

2. Методика решения обратной задачи

При решении обратной задачи для спектральных измерений коэффициента аэрозольного ослабления света $\epsilon(\lambda)$ была использована модифицированная версия численного алгоритма метода интегральных распределений [11]. В качестве искомой функции в методе [11] рассматривается суммарное геометрическое сечение частиц $S(r)$ радиусом не меньше r , которые содержатся в единичном объеме воздуха. 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 этом не используются какие-либо дополнительные ограничения на искомое решение и априорная информация.

По восстановленной функции $S(r)$ можно рассчитать объемную концентрацию $V_{\alpha\beta}$ и средний радиус частиц $\bar{r}_{\alpha\beta}$ на произвольном отрезке $\alpha \leq r \leq \beta$, принадлежащем области определения функции $S(r)$, по формулам

$$V_{\alpha\beta} = (4/3) \left(\alpha S(\alpha) - \beta S(\beta) + \int_{\alpha}^{\beta} S(r) dr \right), \quad (1)$$

$$\bar{r}_{\alpha\beta} = (3/4) V_{\alpha\beta} / [S(\alpha) - S(\beta)]. \quad (2)$$

Для решения обратной задачи требуется знание комплексного показателя преломления аэрозольного вещества. Необходимая информация была получена с использованием оптической модели Крекова–Рахимова [23, 24]. Входным параметром модели служит относительная влажность воздуха, значения которой были взяты из данных метеонаблюдений [22].

Временные ряды значений относительной влажности приземного слоя воздуха в период измерений представлены на рис. 3. Колебания RH обусловлены преимущественно суточным ходом темпе-

ратуры воздуха t . Корреляция между RH и t отрицательная с коэффициентами $-0,83$ в июле и $-0,9$ в августе. Отличительной особенностью изменчивости RH в августе является наличие двух участков, на которых можно выделить линейные тренды противоположного знака. Отрицательный тренд захватывает конец июля и сохраняется до 21.08, когда тренд меняет знак. Примечательно, что момент перемены знака тренда близок к началу поступления в регион дымового аэрозоля.

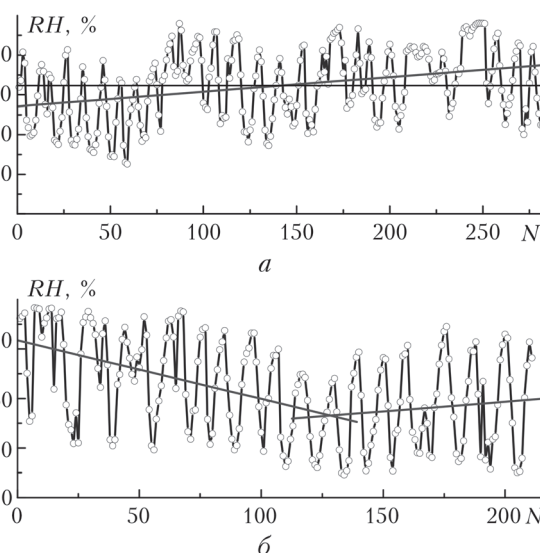


Рис. 3. Временная изменчивость относительной влажности RH воздуха в июле (а) и августе (б)

На рис. 4 представлены бокс-диаграммы, которые позволяют провести сравнение параметров распределений относительной влажности в июле и августе 2003 г.

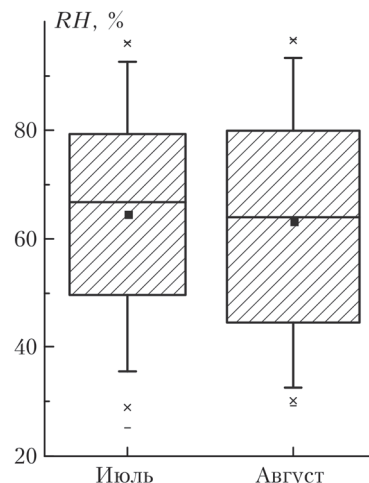


Рис. 4. Бокс-диаграммы распределений относительной влажности воздуха

Среднемесячным значениям RH на диаграммах соответствуют символы в виде квадратов, которые расположены практически на одном уровне. Эти значения, приведенные в табл. 1, отличаются незначимо с вероятностью 0,95. Также из диаграмм

следует, что половина значений RH в июле была заключена в интервале от 50 до 79%, а в августе – от 46 до 80%.

По измеренным значениям RH рассчитывался комплексный показатель преломления $n - i \cdot k$ частиц субмикронной (f) и грубодисперсной (с) фракций аэрозоля с использованием модели Крекова–Рахимова. В качестве примера в табл. 2 приведены среднестатистические значения и стандартные отклонения вещественной и мнимой частей показателя преломления аэрозольных частиц субмикронной и грубодисперсной фракций. Статистические характеристики рассчитаны для различных участков спектра по измерениям RH в июле.

Таблица 2

Статистические характеристики вещественной и мнимой частей показателя преломления аэрозольных частиц субмикронной (f) и грубодисперсной (с) фракций, рассчитанные по измерениям RH в июле с использованием модели Крекова–Рахимова

Параметр	λ , мкм					
	0,55		1,06		2,17	
	m	σ	m	σ	m	σ
$n^{(f)}$	1,437	0,042	1,436	0,043	1,407	0,049
$k^{(f)}$	0,0019	0,0008	0,0014	0,0006	0,0041	0,0018
$n^{(c)}$	1,490	0,102	1,487	0,102	1,467	0,110
$k^{(c)}$	0,0026	0,0017	0,0021	0,0016	0,0059	0,0036

Значения аналогичных параметров, полученные по измерениям RH в августе, несущественно отличаются от приведенных в табл. 2.

3. Восстановление геометрического сечения частиц приземного аэрозоля

Перейдем к рассмотрению результатов обращения спектральных коэффициентов аэрозольного ослабления света, поведение которых обсуждалось в разд. 1. Поскольку в качестве решения обратной задачи в алгоритме [11] рассматривалась интегральная функция распределения геометрического сечения $S(r)$, то естественно обратиться в первую очередь к анализу параметров микроструктуры, которые напрямую связаны с восстановленным распределением $S(r)$. В данном разделе будет рассмотрена временная изменчивость геометрического сечения полного ансамбля аэрозольных частиц

$S^{(tot)} = S(0)$ с разделением на грубодисперсную $S^{(c)} = S(r^{(c)})$ и субмикронную $S^{(f)} = S^{(tot)} - S^{(c)}$ фракции. Условная граница между фракциями аэрозоля предполагалась фиксированной и равной 0,55 мкм.

Указанные параметры характеризуют площадь поверхности аэрозольных частиц и выступают в качестве весовых множителей при полидисперсных факторах эффективности оптического взаимодействия в расчетах характеристик аэрозольного светорассеяния. Информация о распределении $S(r)$ важна для изучения процессов, в которых поверхность частиц играет существенную роль. Через поверхность аэрозольной частицы происходит обмен веществом с окружающей средой. С поверхностью аэрозоля связаны такие процессы, как адсорбция и химические реакции, за счет которых, в том числе, могут происходить удаление из атмосферы загрязняющих веществ, взаимодействие с электрическими зарядами [25, 26].

На рис. 5–8 представлены временные ряды и гистограммы распределения геометрических сечений $S^{(f)}$, $S^{(c)}$ и $S^{(tot)} = S^{(f)} + S^{(c)}$, восстановленных при решении обратной задачи для среднечасовых спектральных зависимостей $\epsilon(\lambda_i)$, которые получены в июле и августе. В гистограммах распределений, полученных в августе, не учитывались данные периода задымления атмосферы на протяжении третьей декады месяца.

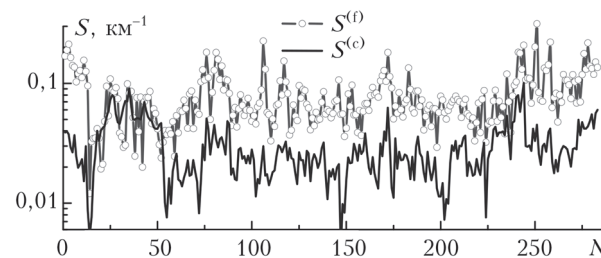


Рис. 5. Временные ряды геометрического сечения частиц субмикронной и грубодисперсной фракций приземного аэрозоля в июле

В табл. 3 сведены статистические характеристики восстановленных микроструктурных параметров. Для сравнения здесь же приведены статистические характеристики коэффициентов аэрозольного ослабления $\epsilon(\lambda_i)$, временные ряды которых были рассмотрены в разд. 1.

Таблица 3

Статистические характеристики коэффициентов аэрозольного ослабления $\epsilon(\lambda_i)$ на длинах волн $\lambda = 0,55$ и $1,06$ мкм и восстановленных геометрических сечений $S^{(f)}$, $S^{(c)}$ и $S^{(tot)}$

Параметр	Июль			Август (без учета дымов)			Август (дым)		
	m	σ	Var , %	m	σ	Var , %	m	σ	Var , %
$\epsilon(0,55)$, км ⁻¹	0,153	0,073	47,7	0,149	0,081	54,4	0,348	0,292	83,9
$\epsilon(1,06)$, км ⁻¹	0,105*	0,052	49,5	0,088*	0,054	61,4	0,111	0,086	77,5
$S^{(f)}$, км ⁻¹	0,0798	0,0425	53,3	0,0792	0,0483	61,0	0,2157	0,2087	96,8
$S^{(c)}$, км ⁻¹	0,0301*	0,0160	53,2	0,0232*	0,0161	69,4	0,0130	0,0077	59,2
$S^{(tot)}$, км ⁻¹	0,1099	0,0503	45,8	0,1024	0,0607	59,3	0,2288	0,2153	94,1

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

Данные за август разделены на две группы: до и после прихода дымового аэрозоля. В табл. 3 значимо отличающимися микроструктурными характеристиками в условиях незадымленной атмосферы являются среднемесячные геометрические сечения грубодисперсных частиц. Также значимое различие установлено между медианами распределений $S^{(c)}$.

Детальную информацию о структуре и изменчивости параметров микроструктуры аэрозоля дает анализ гистограмм распределений, приведенных на рис. 6 и 8. Видно, что во всех случаях гистограммы распределения сечений частиц имеют унимодальную асимметричную форму с крутым подъемом на левом склоне распределений и более плавным спуском на

правом. Из сравнения гистограмм и данных табл. 3 следует, что среднемесячные значения параметров $S^{(f)}$, $S^{(c)}$ и $S^{(tot)}$ всегда превышают их модальные значения.

Наиболее вероятные значения сечений субмикронных частиц $S^{(f)}$ в июле и августе заключены в совпадающих интервалах 0,04–0,08 км⁻¹. В указанный диапазон попадает 51% значений параметра $S^{(f)}$, восстановленных в июле, и 54% – в августе.

В отличие от статистических характеристик распределений $S^{(f)}$ модальные значения сечений грубодисперсных частиц $S^{(c)}$ в июле и августе существенно различаются и равны соответственно 0,023 и 0,014 км⁻¹. При этом как средние, так

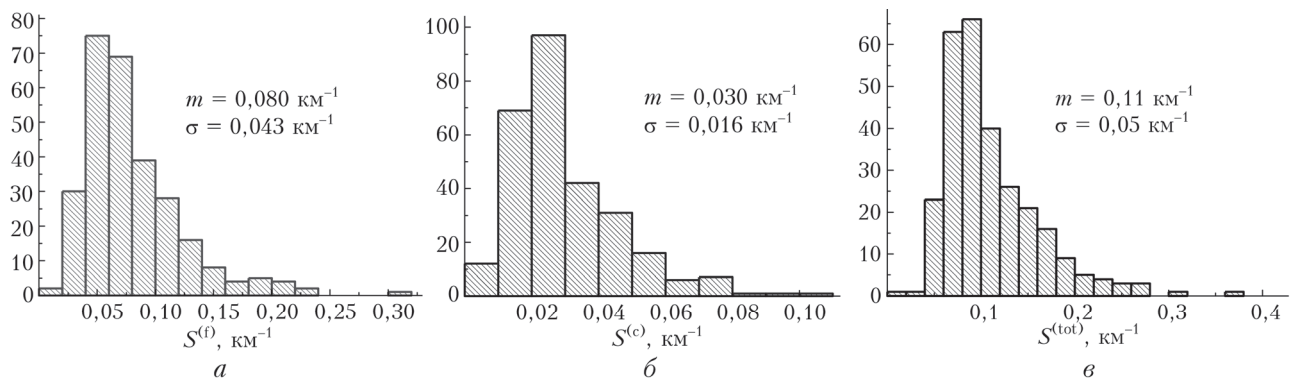


Рис. 6. Гистограммы распределений микроструктурных параметров $S^{(f)}$ (а), $S^{(c)}$ (б) и $S^{(tot)}$ (в), восстановленных при обращении спектральных зависимостей $\epsilon(\lambda)$ в июле

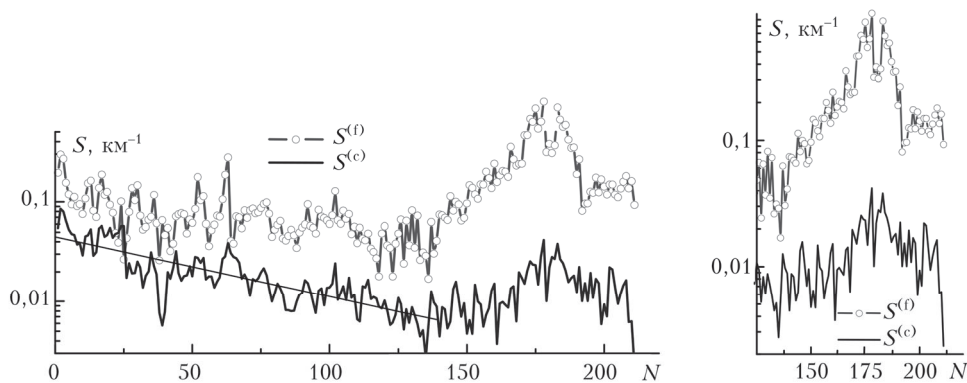


Рис. 7. Временные ряды геометрического сечения частиц субмикронной и грубодисперсной фракций приземного аэрозоля в августе

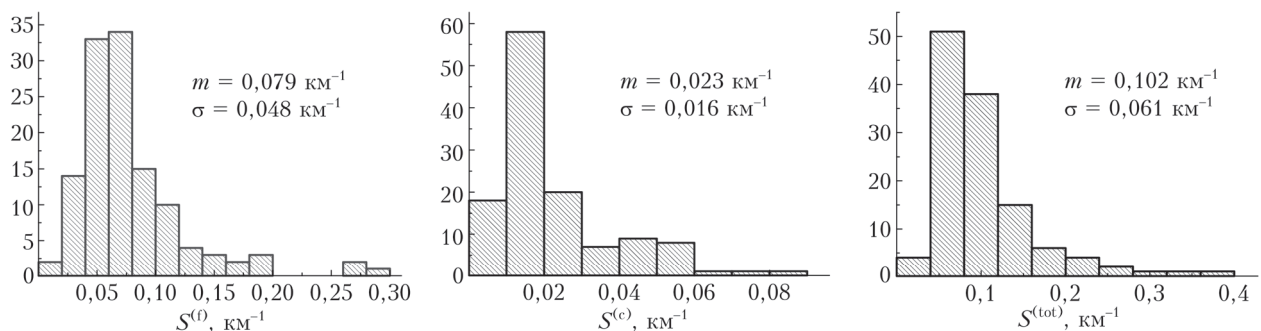


Рис. 8. Гистограммы распределений микроструктурных параметров $S^{(f)}$ (а), $S^{(c)}$ (б) и $S^{(tot)}$ (в), восстановленных при обращении спектральных зависимостей $\epsilon(\lambda)$ в августе

и модальные значения распределений $S^{(c)}$, восстановленных в июле, превышают соответствующие значения, полученные в августе.

Сходство и различие распределений параметров $S^{(f)}$, $S^{(c)}$ и $S^{(tot)}$ можно наглядно наблюдать на box-диаграммах, которые представлены на рис. 9 и служат дополнением к соответствующим гистограммам. Видно, что во всех рассмотренных случаях средние значения распределений указанных микроструктурных параметров больше их медиан. На рис. 9, *a* можно отметить особенно близкое расположение медиан распределений $S^{(f)}$. Аналогичное заключение относится к среднемесячным значениям параметра $S^{(f)}$, что также следует из данных табл. 3. Анализ box-диаграмм позволяет также оценить размах распределений.

Рассмотрим особенности временной изменчивости параметров $S^{(f)}$, $S^{(c)}$ и $S^{(tot)}$ в течение летнего сезона. Из рис. 5, 7 и табл. 3 следует, что основной вклад в суммарную поверхность аэрозоля вносят частицы субмикронной фракции. Их относительная доля по сечению в условиях незадымленной атмосферы изменяется мало и составляет 73% в июле и 77% в августе.

На временных зависимостях параметров $S^{(f)}$ и $S^{(c)}$ на рис. 5 выделяется участок временного ряда $N = 14 - 53$ (2 - 6.07) с аномальным дисперсным составом аэрозоля, на протяжении которого вклад грубодисперсного аэрозоля заметно увеличен. В этот же период выравниваются значения коэффициентов аэрозольного ослабления в видимой и ИК-областях спектра, представленные на рис. 1, *a*.

Накануне, 1.07 до 23:00 ($N = 11$) наблюдаются высокие значения сечения $S^{(f)}$ (см. рис. 5). В рассматриваемый период средний уровень сечения $S^{(f)}$ равен $0,149 \text{ км}^{-1}$ и составляет 84% от суммарного значения. В ночь на 2.07 сечение субмикронного аэрозоля резко, в 13 раз, уменьшается, достигая минимума к 07:00. Сечение $S^{(c)}$ также убывает, но в меньшей степени. В последующий период до 21:00 6.07 ($N = 53$) соотношение между сечениями $S^{(f)}$ и $S^{(c)}$ носит знакопеременный характер при приблизительно

равном вкладе частиц обеих фракций в суммарное сечение. Затем с ростом величины $S^{(f)}$ ее вклад в суммарное сечение вновь становится преобладающим.

Возможной причиной наблюдаемого изменения дисперсного состава аэрозоля может служить смена воздушной массы при перемене направления ветра. Отмеченная перестройка дисперсного состава аэрозоля происходила на фоне изменения направления ветра с западного на северо-восточное (рис. 10). Среднее направление ветра в рассматриваемый период со 2 по 6.07.2003 г. составляло 69° .

Как уже было отмечено в разд. 1, в момент времени 17:00 21.08 ($N = 135$), с которым мы связываем поступление в атмосферу региона дымового аэрозоля, коэффициент аэрозольного ослабления $\epsilon(0,55)$ проходит точку минимума и затем начинает круто расти (см. рис. 1, *б*).

На рис. 11 представлен временной ход среднесуточных значений геометрического сечения частиц субмикронной и грубодисперсной фракций приземного аэрозоля в августе. Вертикальной отсечкой на кривых отмечено стандартное отклонение восстановленных параметров для соответствующего дня.

Из рис. 7 и 11 видно, что с приходом дымового аэрозоля начинается значительное увеличение сечения субмикронного аэрозоля $S^{(f)}$. Следует отметить, что в течение предыдущих суток уже происходил всплеск сечения $S^{(f)}$ на фоне продолжающегося падения $S^{(c)}$. В результате в августе на временной зависимости среднесуточных значений параметра $S^{(f)}$ (рис. 11) монотонное повышение сечения субмикронного аэрозоля началось на сутки раньше, с 20.08. Возможно, это служит индикатором более раннего задымления атмосферы.

Сечение субмикронного аэрозоля $S^{(f)}$ в 11:00 26.08 повышается до максимального значения, равного $1,01 \text{ км}^{-1}$ (см. рис. 7, *б*, $N = 178$), а затем к концу месяца постепенно идет на спад. В условиях задымления параметр $S^{(c)}$ также увеличивается, но в меньшей степени, не превышая максимального уровня, равного $0,042 \text{ км}^{-1}$, который достигнут одновременно с $S^{(f)}$.

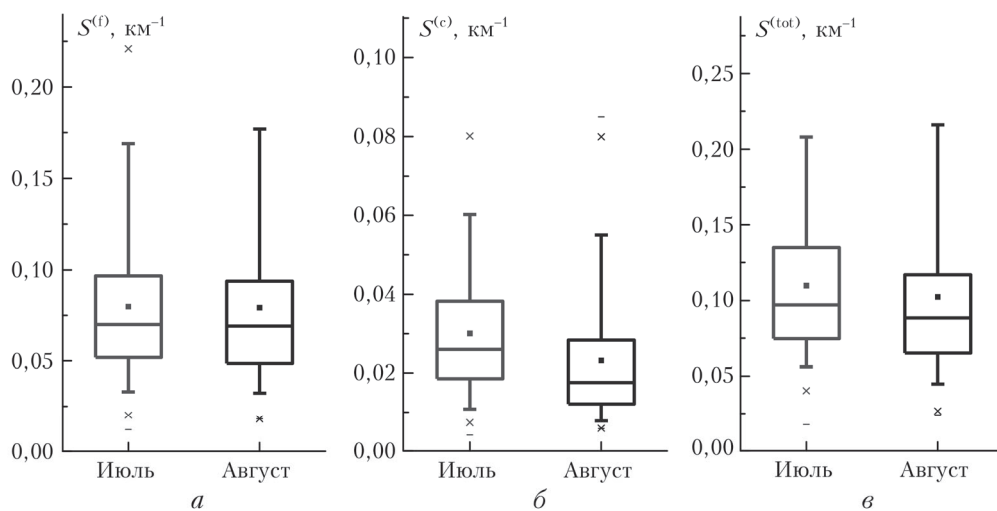


Рис. 9. Box-диаграммы распределений параметров $S^{(f)}$ (*a*), $S^{(c)}$ (*б*) и $S^{(tot)}$ (*в*)

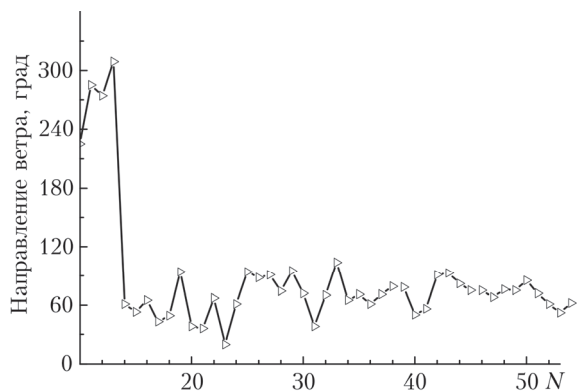


Рис. 10. Направление ветра в период наблюдения аномального состава приземного аэрозоля

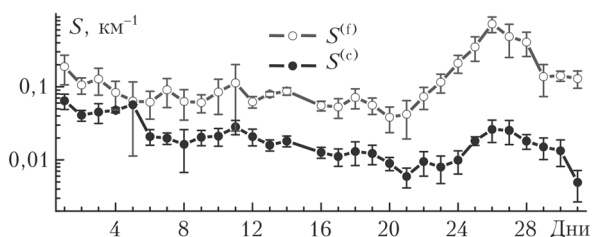


Рис. 11. Изменчивость в течение августа среднесуточных значений геометрического сечения частиц субмикронной и грубодисперсной фракций приземного аэрозоля

Отношение максимальных значений параметров $S^{(f)}$ и $S^{(c)}$ в дымовых условиях составляет 24,2. Более показательным является отношение их среднесуточных значений, которое в точке максимума 26.08 достигает величины 27,7. Наконец, отношение средних значений за период задымления $S^{(f)}$ и $S^{(c)}$ по данным табл. 3 также велико и равно 16,6.

Еще одной особенностью временных рядов параметров $S^{(f)}$ и $S^{(c)}$ в августе является наличие значимых отрицательных трендов в период, предшествующий приходу дымового аэрозоля. Ранее отрицательный тренд в тот же период отмечался во временной изменчивости относительной влажности (см. рис. 3, б). Сечение грубодисперсных частиц убывает с большей скоростью. В нашем случае это приводит к тому, что с течением времени сечение $S^{(f)}$ все более превалирует над вкладом грубодисперсного аэрозоля. Если, например, в начале месяца отношение между среднесуточными значениями $S^{(f)}$ и $S^{(c)}$ составляло около трех, то к моменту прихода дымового аэрозоля оно увеличилось до семи.

Об изменчивости микроструктурных параметров $S^{(f)}$, $S^{(c)}$ и $S^{(tot)}$ можно судить по их коэффициентам вариации, приведенным в табл. 3, которые в основном превышают 50%. Исключение составляет значение $Var(S^{(tot)})$ в июле, немного меньшее 46%. Причем изменчивость суммарного сечения $S^{(tot)}$ всегда меньше изменчивости его составляющих $S^{(f)}$ и $S^{(c)}$ (при отсутствии дымового аэрозоля). При переходе от июля к августу наблюдается увеличение коэффициентов вариации геометрических сечений, наиболее существенное для параметров $S^{(c)}$ и $S^{(tot)}$ (приблизительно на 30%). Наконец, с приходом в регион дымового аэрозоля происхо-

дит значительный рост вариаций сечений частиц субмикронной фракции и суммарного ансамбля, которые достигают 98 и 94% соответственно.

4. Корреляционные связи

Рассмотрим корреляционные связи между параметрами $S^{(f)}$, $S^{(c)}$, $S^{(tot)}$ и коэффициентами аэрозольного ослабления света на разных длинах волн. На рис. 12 представлены зависимости коэффициента корреляции ρ от длины волны λ_i между измеренными значениями $\epsilon(\lambda_i)$ и восстановленными значениями сечений аэрозольных частиц в июле и августе. Результаты, приведенные на рис. 12, б, получены в условиях незадымленной атмосферы. Общей чертой всех изображенных на рисунках зависимостей является их монотонный вид. Коэффициенты корреляции убывают с ростом λ_i для параметров $S^{(f)}$, $S^{(tot)}$ и возрастают для сечения $S^{(c)}$. Причем кривые ρ для суммарного сечения $S^{(tot)}$ всегда расположены выше, чем кривые корреляций для сечений $S^{(f)}$. Сходство спектральных зависимостей корреляций обусловлено определяющей ролью субмикронных частиц в изменчивости суммарного сечения $S^{(tot)}$.

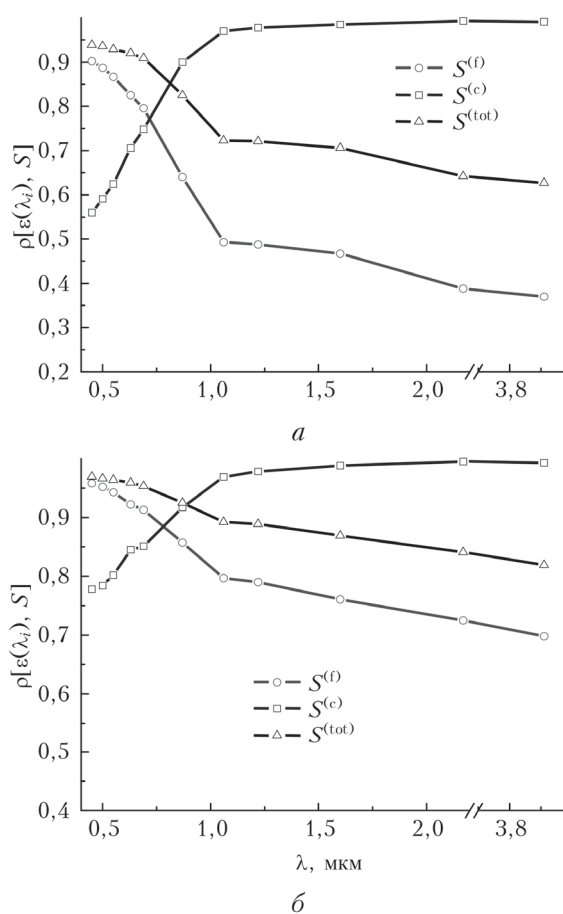


Рис. 12. Спектральная изменчивость коэффициента корреляции ρ между измеренными значениями коэффициента аэрозольного ослабления $\epsilon(\lambda_i)$ в июле (а) и августе 2003 г. (б) и восстановленными значениями сечений частиц $S^{(f)}$, $S^{(c)}$ и $S^{(tot)}$

В июле коэффициенты корреляции сечений $S^{(f)}$, $S^{(tot)}$, принимающие при $\lambda_i = 0,45$ мкм максимальные значения 0,902 и 0,939 соответственно, не опускаются ниже 0,8 при $\lambda \leq 0,69$ мкм. Для субмикронной фракции существенное уменьшение ρ происходит при переходе к длине волны 1,06 мкм (0,493) с дальнейшим более пологим спадом до 0,37 на правом конце спектрального интервала.

Для грубодисперсной фракции частиц в спектральном интервале 0,45–1,06 мкм происходит наиболее существенный рост коэффициента корреляции от 0,56 до 0,97. На остальную часть спектрального интервала приходится увеличение ρ до 0,991.

Спектральные зависимости коэффициентов корреляции на рис. 12, б, полученные в августе, качественно мало отличаются от кривых ρ , определенных для июля. В целом для августа характерен более высокий уровень корреляции, особенно в области низких значений ρ .

В частности, корреляция между измерениями $\epsilon(\lambda_i)$ и сечением субмикронных частиц при высоком уровне на левом краю спектра также остается достаточно высокой в ИК-области, где не опускается ниже 0,698. Еще более высокие значения имеет коэффициент корреляции суммарного сечения $S^{(tot)}$, который во всем диапазоне спектра изменяется от 0,969 ($\lambda = 0,45$ мкм) до 0,819 ($\lambda = 3,91$ мкм).

Коэффициент корреляции сечения грубодисперсных частиц в спектральном интервале 1,06–3,91 мкм изменяется незначительно при переходе от июля к августу, оставаясь на высоком уровне. При этом увеличиваются минимальные значения ρ в видимой области, не опускаясь ниже 0,778.

Заключение

Рассмотрены результаты восстановления параметров микроструктуры приземного аэрозоля в летний период из спектральных измерений коэффициента аэрозольного ослабления света. Экспериментальные данные получены с помощью измерителя спектральной прозрачности атмосферы на 11 длинах волн в диапазоне 0,45–3,91 мкм на горизонтальной трассе в районе г. Томска. Значения коэффициентов аэрозольного ослабления усреднялись на часовом интервале. Общее число среднесуточных спектров, использованных при обращении, составило около 500 реализаций.

Для восстановления микроструктуры аэрозоля был применен численный алгоритм решения обратной задачи на основе метода интегральных распределений. В качестве искомой функции при решении обратной задачи рассматривалось суммарное геометрическое сечение частиц $S(r)$ радиусом не меньше r , которые содержатся в единичном объеме воздуха. Априорная информация о показателе преломления аэрозольного вещества была получена с использованием модели Крекова–Рахимова. Входным параметром модели служит относительная влажность воздуха, значения которой были взяты из данных метеонаблюдений.

Выполнен анализ изменчивости геометрического сечения частиц субмикронной, грубодисперсной

фракций и полного ансамбля. Для месячных интервалов наблюдений построены гистограммы восстановленных микроструктурных параметров и получены оценки их статистических характеристик, таких как среднее значение, стандартное отклонение, коэффициент вариации, мода и медиана распределений.

Проведена оценка значимости расхождения средних и дисперсий коэффициентов аэрозольного ослабления и микроструктурных параметров, полученных для месячных интервалов. Рассмотрено влияние задымления атмосферы на изменчивость микроструктурных параметров. Показано, что основной вклад в суммарное сечение приземного аэрозоля вносят частицы субмикронной фракции. Их относительная доля по сечению в условиях незадымленной атмосферы варьирует на месячных интервалах в пределах 73–77%. В дымовых условиях отношение максимальных среднесуточных значений сечений субмикронных и грубодисперсных частиц составляет около 28. Коэффициенты вариации сечений частиц на месячных интервалах без учета влияния дымов имеют высокие значения в пределах 53–61% для субмикронной и 53–69% для грубодисперсной фракций аэрозоля.

Также исследованы корреляционные связи между коэффициентами аэрозольного ослабления света на разных длинах волн и восстановленными параметрами микроструктуры аэрозоля. Для субмикронной фракции и суммарного ансамбля частиц коэффициенты корреляции геометрических сечений достигают максимальных значений при $\lambda = 0,45$ мкм (0,902 и 0,939 соответственно) и монотонно убывают при увеличении длины волны. Напротив, коэффициент корреляции геометрического сечения грубодисперсных частиц монотонно возрастает с ростом длины волны, достигая максимального значения 0,991 при $\lambda = 3,91$ мкм.

1. Ужegov В.Н., Кабанов Д.М., Пхалагов Ю.А., Саке-рин С.М. Взаимосвязь вариаций аэрозольного ослабления видимой и ИК-радиации приземного слоя воздуха и всей атмосферной толщи // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 4. С. 386–391; Uzhegov V.N., Kabanov D.M., Pkhalagov Yu.A., Sakerin S.M. Correlation between variations of aerosol extinction in visible and IR radiation in near-ground air layer and in the atmospheric column // Atmos. Ocean. Opt. 2009. V. 22, N 3. P. 338–345.
2. Ужegov В.Н., Пхалагов Ю.А., Кабанов Д.М., Саке-рин С.М. Грубодисперсный аэрозоль и его роль в формировании высоты однородной аэрозольной атмосферы // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 12. С. 1023–1027.
3. 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, suppl. 1. P. 231–232.
4. Козлов В.С., Панченко М.В., Яушева Е.П. Относительное содержание сажи в субмикронном аэрозоле как индикатор влияния дымов удаленных лесных пожаров // Оптика атмосф. и океана. 2006. Т. 19, № 6. С. 484–491.

5. Козлов В.С., Панченко М.В., Яушева Е.П. Временная изменчивость содержания субмикронного аэрозоля и сажи в приземном слое атмосферы Западной Сибири // Оптика атмосфер. и океана. 2007. Т. 20, № 12. С. 1082–1085.
6. Яушева Е.П., Панченко М.В., Козлов В.С., Терпугова С.А., Чернов Д.Г. Влияние города на аэрозольные характеристики атмосферы Академгородка г. Томска в переходные сезоны // Оптика атмосфер. и океана. 2014. Т. 27, № 11. С. 981–988.
7. 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.
8. Исаков А.А., Груздев А.Н. Долгопериодные вариации оптических и микрофизических параметров приземного аэрозоля на Звенигородской научной станции // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2009. Т. 45, № 2. С. 245–254.
9. Макиенко Э.В., Пхалагов Ю.А., Рахимов Р.Ф., Ужегов В.Н., Щелканов Н.Н. Анализ особенностей микроструктуры аэрозоля зимней дымки по результатам обращения данных оптических измерений // Оптика атмосфер. и океана. 1995. Т. 8, № 9. С. 1272–1279.
10. Макиенко Э.В., Рахимов Р.Ф., Пхалагов Ю.А., Ужегов В.Н. Микрофизическая интерпретация аномальной спектральной зависимости аэрозольного ослабления излучения на приземной трассе // Оптика атмосфер. и океана. 2003. Т. 16, № 12. С. 1102–1106.
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. 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.
12. Веретенников В.В., Меньщикова 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. Peculiarities of determining the aerosol microstructure parameters from measurements of the aerosol optical depth. Part II. Results of inversion // Atmos. Ocean. Opt. 2013. V. 26, N 6. P. 480–491.
13. Веретенников В.В., Меньщикова С.С., Ужегов В.Н. Изменчивость параметров микроструктуры аэрозоля в летний сезон по результатам обращения измерений спектрального ослабления света на горизонтальной трассе в Томске. Часть 2. Объемная концентрация и средний радиус частиц // Оптика атмосфер. и океана. 2018. Т. 32, № 11. С. 867–875.
14. Груза Г.В., Ранькова Э.Я., Бардин М.Ю., Рочева Э.В., Платова Т.В., Самохина О.Ф., Соколов Ю.Ю., Рачкулик О. Изменения климата 2003. Обзор состояния и тенденций изменения климата России. Бюллетень Института глобального климата и экологии Росгидромета и РАН. [Электронный ресурс]. URL: http://climatechange.igce.ru/index.php?option=com_content&task=view&id=43 (дата обращения: 24.04.2018).
15. URL: http://thermograph.ru/mon/st_29430-y_2003.htm (дата обращения 24.04.2018).
16. Белан Б.Д., Рассказчикова Т.М., Скляднева Т.К. Синоптический режим Томска за 1993–2004 гг. // Оптика атмосфер. и океана. 2005. Т. 18, № 10. С. 887–892.
17. Белан Б.Д., Ивлев Г.А., Скляднева Т.К. Многолетний мониторинг суммарной и ультрафиолетовой (В) радиации в районе г. Томска // Оптика атмосфер. и океана. 2012. Т. 25, № 1. С. 61–65; Belan B.D., Ivlev G.A., Sklyadnaya T.K. Long-term monitoring of total and UV-B radiation in Tomsk // Atmos. Ocean. Opt. 2012. V. 25, N 4. P. 281–285.
18. Скляднева Т.К., Рассказчикова Т.М., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю. Изменение радиационных и метеорологических параметров атмосферы по данным наблюдений в Томске // Оптика атмосфер. и океана. 2018. Т. 31, № 4. С. 288–293.
19. Белан Б.Д., Задде Г.О., Кусков А.И., Рассказчикова Т.М. Спектральная прозрачность атмосферы в основных синоптических объектах // Оптика атмосфер. и океана. 1994. Т. 7, № 9. С. 1187–1197.
20. Пхалагов Ю.А., Ужегов В.Н., Щелканов Н.Н. Автоматизированный многоволновой измеритель спектральной прозрачности приземной атмосферы // Оптика атмосфер. и океана. 1992. Т. 5, № 6. С. 667–671.
21. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М.: Физматлит, 2006. 816 с.
22. URL: <http://lop.iao.ru/activity/?id=tor> (дата обращения: 24.04.2018).
23. Зуев В.Е., Креков Г.М. Оптические модели атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 256 с.
24. Креков Г.М., Рахимов Р.Ф. Оптико-локационная модель континентального аэрозоля. Новосибирск: Наука, 1982. 198 с.
25. Химия нижней атмосферы / под ред. С. Расула. М.: Мир, 1976. 408 с.
26. Райст П. Аэрозоли. Введение в теорию. М.: Мир, 1987. 280 с.

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 I. Geometric cross section of fine and coarse particles.

Results of retrieval of microstructure parameters of near-surface aerosol in the summer period from spectral measurements of the aerosol extinction coefficient are presented. Experimental data were obtained in Tomsk at a horizontal path using an atmospheric transmittance meter at 11 wavelengths in the range from 0.45 to 3.91 μm . The numerical algorithm, based on the method of integral distributions, was used to solve the inverse problem. In the first part of the work, the variability of the geometric cross section of particles of the fine and coarse fractions and the total ensemble is analyzed. The influence of smoke pollution of atmosphere on the variation in microstructure parameters is considered. It is shown that fine particles make the main contribution (73–77%) to the total cross section of near-surface aerosol. The coefficients of variation of the cross sections of the particles are high in the range 53–61% for the fine and 53–69% for the coarse fractions of aerosol in monthly intervals without taking into account the influence of the smoke. Correlations between the aerosol extinction coefficients at different wavelengths and the aerosol microstructure parameters retrieved are investigated.