

ОПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И БАЗЫ ДАННЫХ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

УДК 551.501.793

Внутригодовая изменчивость микроструктуры аэрозоля по данным измерений горизонтальной прозрачности атмосферы в Томске

В.В. Веретенников, С.С. Меньщикова*

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

Поступила в редакцию 21.07.2021 г.

Исследована внутригодовая изменчивость микроструктуры приземного аэрозоля по результатам решения обратной задачи для спектральных измерений коэффициента аэрозольного ослабления света с помощью численного алгоритма метода интегральных распределений. Рассмотрены геометрическое сечение, объемная концентрация и средний радиус аэрозольных частиц. Параметры микроструктуры аэрозоля оценивались для субмикронной и грубодисперсной фракций аэрозоля, а также объединенного ансамбля частиц. Получены оценки статистических характеристик распределений микроструктурных параметров аэрозоля на месячных интервалах. Показано, что субмикронные частицы вносят основной вклад в суммарное геометрическое сечение аэрозоля, который изменяется в пределах 73–88%. В объемном содержании приземного аэрозоля доминирует грубодисперсная фракция, составляя в среднем за весь период наблюдений ~75%. В период наблюдений среднемесячные значения геометрического сечения и объемной концентрации субмикронного аэрозоля возрастали монотонно. Объемная концентрация субмикронных частиц увеличилась более чем в четыре раза. Среднемесячные значения концентрации грубодисперсных частиц снизились примерно в два раза.

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

Введение

Необходимость изучения оптических и микрофизических свойств аэрозоля обусловлена их важной ролью во многих процессах, протекающих в атмосфере. В атмосферной оптике влияние аэрозоля следует учитывать при решении задач распространения оптических сигналов, при разработке систем лазерной локации, навигации и связи [1–5]. Рассеивая и поглощая излучение, аэрозоль оказывает существенное влияние на радиационный баланс атмосферы и земной поверхности, формирование климата Земли. По заключению Межправительственной группы экспертов по изменению климата [6], с недостаточностью информации о параметрах атмосферного аэрозоля связана высокая неопределенность в оценках радиационного форсинга и глобального изменения климата [7–9]. Знание оптических характеристик аэрозоля необходимо при исследовании поверхности суши и океана со спутников, решении задач атмосферной коррекции данных дистанционного зондирования Земли [10–13].

Возрастающее аэрозольное загрязнение атмосферы от промышленных источников и транспорта, а также образование вредных соединений в фотохимическом смоге оказывают негативное воздействие

на здоровье человека и окружающую среду [14–16]. Признавая важность влияния аэрозоля на формирование погоды и климата, а также зависимость здоровья людей от качества атмосферного воздуха и состояния экосистемы, Всемирная метеорологическая организация представила перечень основных параметров аэрозоля, рекомендованных для долговременных наблюдений в глобальной сети наземных станций по программе WMO/GAW [17–19]. В число ключевых входят оптические (аэрозольная оптическая толщина (АОТ), коэффициенты рассеяния и поглощения на разных длинах волн) и микрофизические (массовые концентрации и химический состав субмикронной и грубодисперсной фракций) параметры. Кроме того, необходимо определять функцию распределения по размерам, счетную концентрацию частиц и вертикальное распределение аэрозольных коэффициентов обратного рассеяния и ослабления.

Для оценки АОТ применяются наземные методы солнечной фотометрии. В настоящее время существует целый ряд глобальных и региональных сетей наблюдения, использующих серийно выпускаемые солнечные фотометры для мониторинга АОТ (AERONET [20, 21], GAW-PFR [22, 23], SKYNET [24, 25] и др.). Также АОТ наряду с другими параметрами атмосферы и земной поверхности определяется с применением спутниковых систем дистанционного зондирования Земли из измерений

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

отраженной радиации. Примером могут служить данные спектрорадиометров MODIS со спутников EOS Terra и Aqua [26, 27], VIIRS/Suomi-NPP [28, 29], спектрометра OMI/EOS-Aura [30, 31].

Глобальные измерения аэрозольных коэффициентов рассеяния и поглощения в приземном слое атмосферы проводятся на станциях, входящих в информационную сеть GAWSYS [32]. В частности, измерения коэффициента аэрозольного рассеяния выполняются с помощью интегрирующих нефелометров, как правило, на трех длинах волн: $\lambda = 450, 525/550, 635/700$ нм.

Начало систематических исследований оптических характеристик приземного аэрозоля на территории России относится к 1960-м гг., когда в Институте физики атмосферы (ИФА) АН СССР были получены обширные экспериментальные данные об угловых зависимостях компонент матрицы рассеяния. В результате анализа полученных оптических характеристик сделан важный вывод о возможности классификации наблюдаемых атмосферных ситуаций по типам оптической погоды [33]. Дальнейшее развитие исследований и обобщение на основе результатов статистического анализа и решения обратной задачи привели к построению оптико-микрофизической однопараметрической модели приземного аэрозоля [34], в которой входным параметром служит коэффициент рассеяния света на $\lambda = 0,546$ мкм.

В 1974–1977 гг. сотрудниками ИОА СО АН СССР был проведен длительный цикл исследований спектральной прозрачности атмосферы на протяженных трассах в диапазоне $\lambda = 0,48–11,9$ мкм и угловых зависимостей коэффициента направленного рассеяния, включая его ортогональные поляризационные составляющие, на $\lambda = 0,546$ мкм в прибрежной зоне Черного моря [35]. С помощью решения обратной задачи для оптических характеристик получены данные о дисперсном составе и показателе преломления прибрежных атмосферных дымок [36–38]. Обобщающий результат проведенных исследований – разработка однопараметрической модели оптических и микрофизических характеристик прибрежных дымок [35].

Исследованию микроструктуры приземного аэрозоля методами решения обратных задач для спектральных измерений коэффициента аэрозольного ослабления света $\epsilon(\lambda)$ посвящен ряд работ, в которых рассмотрены динамика плотной зимней дымки [39, 40], формирование аномальной спектральной зависимости аэрозольного ослабления [41]. С использованием результатов обращения среднемесячных зависимостей $\epsilon(\lambda)$, полученных в период с мая по октябрь 2002 г., в [42] проведено микрофизическое моделирование сезонной и суточной изменчивости $\epsilon(\lambda)$.

Более длинные ряды микроструктурных параметров приземного аэрозоля восстановлены при обращении круглосуточных измерений $\epsilon(\lambda)$, выполненных в течение лета 2003 г. [43, 44]. В качестве анализируемых параметров микроструктуры рас-

сматривались объемная концентрация (фактор заполнения) V , геометрическое сечение S и средний радиус частиц $r_s = (4/3)V/S$. Указанные параметры оценивались для субмикронной (f), грубодисперсной (c) фракций аэрозольных частиц и суммарного ансамбля (tot).

Было установлено, что среднемесячная суммарная объемная концентрация приземного аэрозоля в летний период изменяется от $0,81 \cdot 10^{-10}$ до $0,95 \cdot 10^{-10}$ при среднем радиусе в пределах $0,58–0,65$ мкм. В большинстве реализаций основной вклад в суммарный объем аэрозоля вносит грубодисперсная фракция частиц, ее относительная доля составляет в среднем $\sim 80\%$. Средний радиус субмикронных частиц варьируется в диапазоне от $0,08$ до $0,25$ мкм. Диапазон изменения среднего радиуса частиц грубодисперсного аэрозоля составляет $1,06–3$ мкм.

Микроструктурные параметры приземного аэрозоля за длительный период наблюдений отличаются от полученных ранее в летние месяцы.

О долгопериодных вариациях оптических и микрофизических параметров приземного аэрозоля свидетельствуют данные многолетних измерений массовой концентрации аэрозоля, параметра Ангстрема и параметра конденсационной активности на Звенигородской научной станции ИФА РАН [45, 46]. Были выявлены высокочастотные вариации с периодами $3–20, 40–50$ и $70–100$ сут.

Анализ регулярных измерений массовой концентрации сухой основы субмикронного аэрозоля и поглощающего вещества в составе аэрозольных частиц, проводимых на Аэрозольной станции ИОА СО РАН с 1996 г. [47, 48], выявил наличие устойчивых тенденций в сезонной изменчивости аэрозольных характеристик. В частности, установлено, что годовые ходы аэрозольных характеристик в фоновых условиях имеют зимние максимумы и летние минимумы. Типичная черта параметра конденсационной активности – наличие весеннего максимума [49].

Настоящая работа развивает исследования [43, 44]. Цель работы – изучение особенностей изменчивости микроструктурных параметров приземного аэрозоля, которые восстановлены из спектральных измерений $\epsilon(\lambda)$, выполненных в ИОА СО РАН Ю.А. Пхалаговым, В.Н. Ужegovым и Н.Н. Щелкановым на той же экспериментальной базе с мая по октябрь 2003 г.

1. Характеристика условий измерений и восстановления микроструктурных параметров приземного аэрозоля

На территории Западной Сибири в 2003 г. наблюдались климатические аномалии (отклонения от нормы – средней величины базового периода 1961–1990 гг.) температуры приземного воздуха и месячных сумм осадков [50].

Аномалия температуры воздуха, осредненной по территории Западной Сибири, была положительной для всех сезонов, за исключением зимы, и составила в среднем за год $0,71\text{ }^{\circ}\text{C}$. Наиболее значительная аномалия температуры в Западной Сибири наблюдалась летом ($1,7\text{ }^{\circ}\text{C}$), она была максимальной среди других физико-географических регионов России.

В Томске существенные отклонения среднемесячной температуры воздуха от нормы установлены в мае ($4,7\text{ }^{\circ}\text{C}$), июне ($4,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) и августе ($3,1\text{ }^{\circ}\text{C}$) 2003 г. [51]. Они были одними из самых высоких на протяжении предшествующего десятилетия и занимают вторые-третьи места по величине в ряду наблюдений до 2019 г.

В 2003 г. впервые за десятилетие в регионе был отмечен дефицит осадков. По данным [50], значительная отрицательная аномалия месячной суммы осадков наблюдалась в регионе летом ($-5,86\text{ мм}$) и осенью ($-6,91\text{ мм}$). В Томске в среднем за 2003 г. аномалия осадков составила $-4,83\text{ мм}$. Значительный дефицит осадков в Томске в 2003 г. был в июле (59% от нормы), августе (62%) и октябре (86%).

Рассматриваемый год также является аномальным по появлению в Томске циклонов и антициклонов [52]. Повторяемость циклонических образований в 2003 г. была минимальной за 1993–2004 гг. и составила 3,8%, причем циклоны наблюдались только в ноябре. Повторяемость антициклонов была экстремально высокой в январе, мае и сентябре (70,8%) с абсолютным максимумом в апреле (83,3%), а в течение летних месяцев антициклоны не наблюдались вообще. Среди других особенностей 2003 г. в Томске можно отметить максимальное за 1995–2016 гг. поступление суммарной солнечной радиации [53, 54] в целом за год, а также в течение мая, июня и августа.

На протяжении полугодового периода с мая по октябрь 2003 г. в окрестностях томского Академгородка Ю.А. Пхалаговым, В.Н. Ужegovым и Н.Н. Щелкановым были проведены измерения $\epsilon(\lambda)$ базовым методом с использованием автоматизированного фотометра [55] на 11 длинах волн в диапазоне $0,45\text{--}3,9\text{ мкм}$. Схема и порядок проведения оптических измерений представлены в [43]. Количество спектров $\epsilon(\lambda)$, использованных для обращения, составило 1242 (94/275/283/211/180/199 для каждого месяца соответственно). В период проведения оптических измерений выполнялись наблюдения за метеорологическими параметрами приземного слоя атмосферы.

На рис. 1 изображены box-диаграммы (box-whisker plot), построенные по данным [56], на которых в компактном виде представлена информация о статистических характеристиках распределений температуры (t) и относительной влажности (RH) воздуха на месячных интервалах. Данные об относительной влажности воздуха были использованы для оценки показателя преломления аэрозольного вещества, который необходимо априорно задавать при решении обратной задачи.

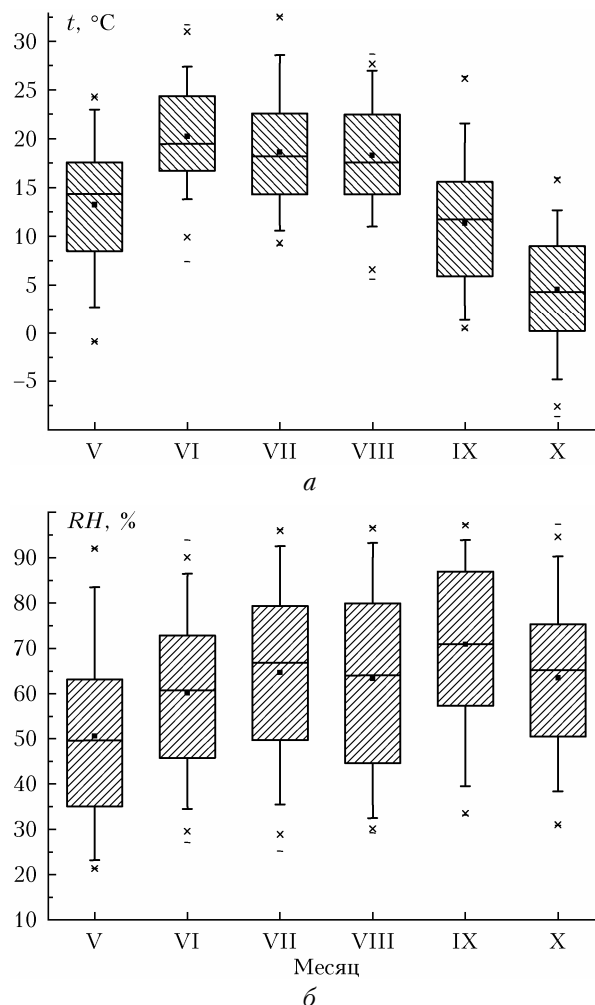


Рис. 1. Box-диаграммы распределений температуры (а) и относительной влажности (б) на месячных интервалах в период наблюдений. Границы ящика – первый и третий квартили; линия внутри ящика – медиана; ■ – положение среднего значения; концы «усов» – 5-й и 95-й процентиля; «x» – 1-й и 99-й процентиля; «-» – максимальное и минимальное значения каждой выборки

Алгоритм решения обратной задачи опубликован в [57]. Входными данными служили значения $\epsilon(\lambda_i)$ на $\lambda_i = 0,45; 0,50; 0,55; 0,63; 0,69; 0,87; 1,06; 1,22; 1,60; 2,17; 3,91\text{ мкм}$. В качестве искомой функции рассматривалось суммарное геометрическое сечение частиц $S(r)$, радиус которых больше или равен r , в единичном объеме воздуха.

Для обращения спектральных измерений $\epsilon(\lambda)$ требуется знание комплексного показателя преломления аэрозольного вещества. Необходимая информация была получена на основе оптической модели континентального аэрозоля [58, 59]. Входным параметром модели служит относительная влажность воздуха, значения которой были взяты из данных метеонаблюдений [56]. С использованием модели [58, 59] по измеренным значениям RH рассчитывался комплексный показатель преломления $n - i$ к частиц субмикронной и грубодисперсной фракций аэрозоля в зависимости от λ .

В качестве примера на рис. 2 представлены гистограммы среднемесячных значений вещественной части показателя преломления аэрозольных частиц $n(0,55)$ субмикронной и грубодисперсной фракций, которые рассчитаны для $\lambda = 0,55$ мкм и соответствуют данным об изменчивости RH , приведенным на рис. 1.

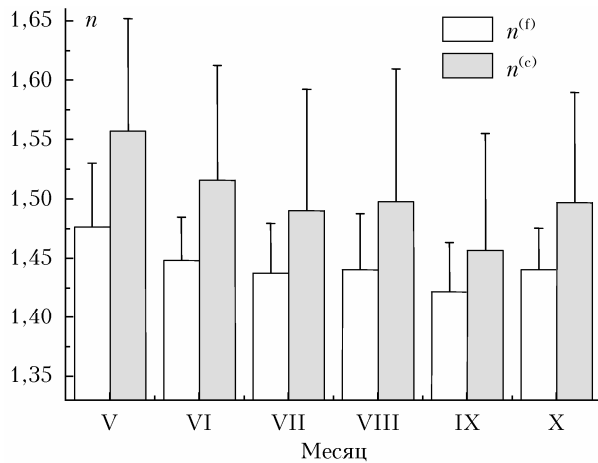


Рис. 2. Диаграмма распределения среднемесячных значений показателя преломления субмикронного и грубодисперсного аэрозолей, рассчитанных по модели [58] на $\lambda = 0,55$ мкм

Значения $n^{(f)}(0,55)$ изменяются в пределах 1,422–1,476 с минимумом в сентябре, когда относительная влажность достигает наибольших значений; $n^{(c)}(0,55)$ варьируется в среднем от 1,457 до 1,557. Изменчивость значений показателя преломления, рассчитанных для других длин волн, по крайней мере для $\lambda \leq 1,06$ мкм, несущественно отличается от результатов, представленных на рис. 2.

2. Геометрическое сечение частиц приземного аэрозоля

Рассмотрим временную изменчивость геометрического сечения грубодисперсных $S^{(c)} = S(r^{(c)})$ и субмикронных $S^{(f)} = S^{(tot)} - S^{(c)}$ частиц аэрозоля, а также суммарного ансамбля $S^{(tot)} = S(0)$, которые непосредственно связаны с восстанавливаемой функцией распределения $S(r)$. Значение $r^{(c)}$, определяющее границу между двумя фракциями аэрозоля, считалось фиксированным и равным 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. Через поверхность аэрозольных частиц происходит обмен веществом с окружающей средой в таких процессах, как адсорбция и химические реакции, за счет которых происходят удаление из атмосферы загрязняющих веществ и взаимодействие с электрическими зарядами [60]. Информация о поверхности частиц важна для изучения таких процессов.

На рис. 3 представлены диаграммы распределения среднемесячных геометрических сечений аэрозольных частиц. В крайней левой группе столбцов приведены данные, усредненные за весь период наблюдений.

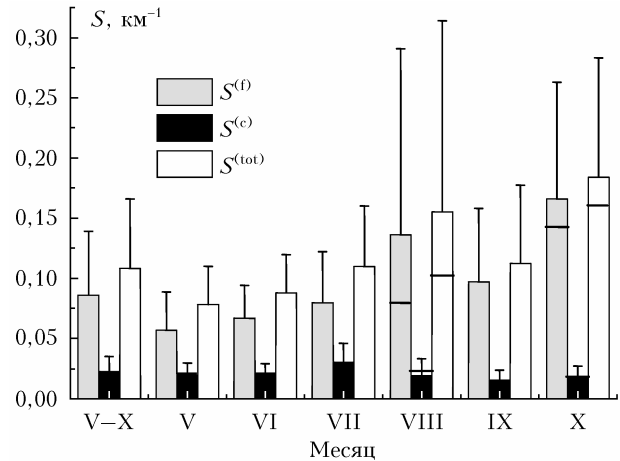


Рис. 3. Диаграммы распределения среднемесячных геометрических сечений субмикронных и грубодисперсных частиц и их суммы в приземном слое атмосферы

В течение августа и октября в атмосфере региона было отмечено появление дымового аэрозоля. Оценки геометрических сечений, полученные без учета периодов задымления атмосферы, показаны в соответствующих столбцах диаграмм горизонтальными линиями.

В августе на $S^{(f)}$ выделяется локальный максимум. При исключении из наблюдений дымовых ситуаций он исчезает и среднемесячные значения $S^{(f)}$ монотонно возрастают. В течение всего рассматриваемого периода $S^{(f)}$ увеличивается почти в три раза. Коэффициент вариации изменяется в меньшей степени, от 41 до 63%.

Видно, что субмикронный аэрозоль вносит основной вклад в суммарное геометрическое сечение частиц. По этой причине наблюдается подобие во временном ходе $S^{(f)}$ и $S^{(tot)}$. В условиях незадымленной атмосферы отношение $S^{(f)}/S^{(tot)}$ изменяется в пределах 73–88% и составляет в среднем 79,3%. В августе и октябре вклад субмикронных частиц еще более повышается вследствие задымления воздуха. В отличие от $S^{(f)}$, $S^{(c)}$ достигает наибольшего значения в июле ($0,03 \text{ км}^{-1}$) и уменьшается вдвое к концу периода наблюдений.

Более содержательный анализ изменчивости распределений геометрического сечения аэрозольных частиц можно провести, используя box-диаграммы на рис. 4. На box-диаграммах распределений, полученных в августе и октябре, не учитывались данные периоды задымления воздуха.

Первые диаграммы на рис. 4 соответствуют распределениям объединенных ансамблей параметров $S^{(f)}$ и $S^{(c)}$, полученных в течение всего периода наблюдений с мая по октябрь. Из анализа box-диаграмм следует, что параметры объединенного распределения $S^{(f)}$ наиболее близки к параметрам

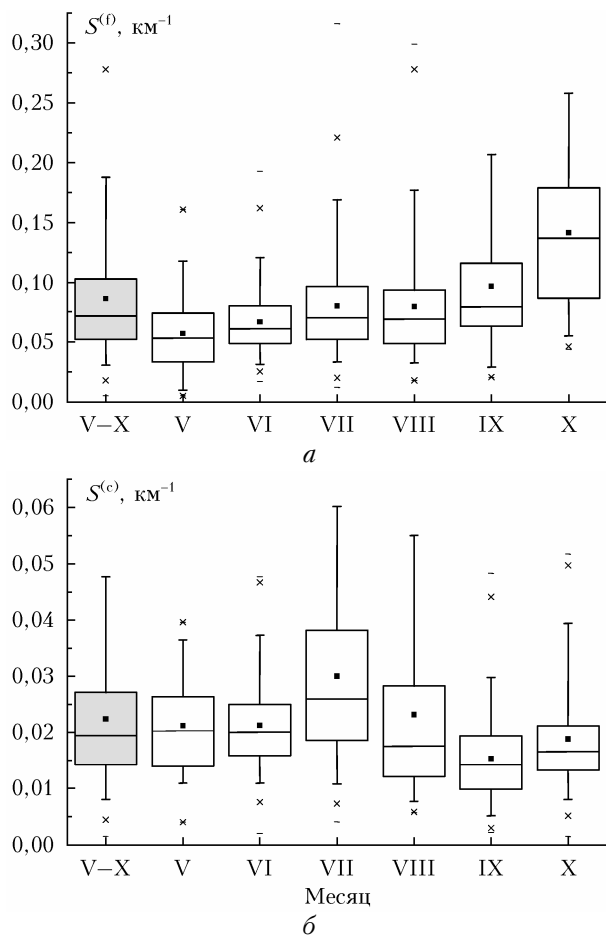


Рис. 4. Вох-диаграммы распределений геометрических сечений частиц субмикронной (а) и грубодисперсной (б) фракций на месячных интервалах

выборочных распределений, полученных в июле-августе. В частности, не выявлено значимых различий между средними значениями указанных распределений, а также их медианами. Среднее значение объединенного распределения $S^{(c)}$ незначимо отличается от среднемесячных значений в мае-июне и августе. Среднемесячные значения $S^{(f)}$ в июле и августе различаются незначительно с доверительной вероятностью 0,95. Аналогичное заключение справедливо для среднемесячных значений $S^{(c)}$, полученных в мае и июне. Распределения геометрических сечений частиц на месячных выборках имеют значительную положительную асимметрию, более выраженную для субмикронной фракции. Коэффициенты асимметрии распределений принимают наименьшие значения в мае: 0,78 ($S^{(f)}$) и 0,37 ($S^{(c)}$), а наибольшие – в августе: 2,25 ($S^{(f)}$) и 1,53 ($S^{(c)}$). Для субмикронной фракции межквартильный размах Q3–Q1 имеет наименьшее значение в июне (0,031 км⁻¹) и возрастает в три раза в октябре (0,093 км⁻¹); в остальные месяцы его значения заключены в узком диапазоне 0,04–0,053 км⁻¹. Межквартильный размах распределений $S^{(c)}$ отличается более высоким уровнем в июле-августе (0,016–0,019 км⁻¹); в остальные месяцы его значения изменяются в пределах 0,008–0,012 км⁻¹.

3. Объемная концентрация приземного аэрозоля

Перейдем к анализу изменчивости объемных концентраций частиц приземного аэрозоля, восстановленных при обращении $\varepsilon(\lambda)$. На рис. 5 представлены диаграммы распределения среднемесячных значений параметров $V^{(f)}$, $V^{(c)}$ и $V^{(tot)}$.

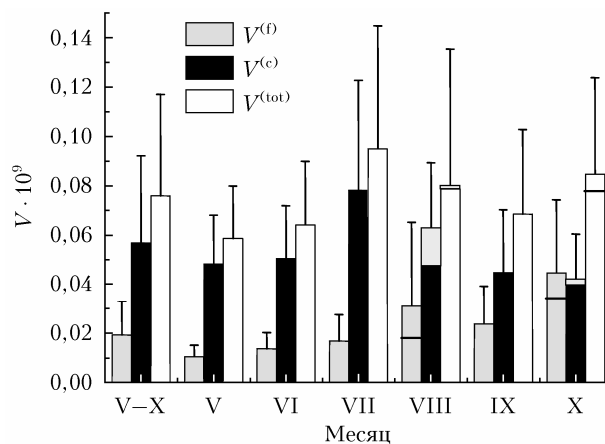


Рис. 5. Диаграммы распределения объемных концентраций субмикронных, грубодисперсных частиц и их суммы на месячных интервалах

Как и при рассмотрении геометрических сечений частиц, в первой группе показаны средние значения, соответствующие объединенным распределениям за период наблюдений. Горизонтальными линиями на столбцах, соответствующих данным за август и октябрь, отмечены результаты, полученные при исключении периодов задымления атмосферы в указанные месяцы. Видно, что в отличие от геометрического сечения в объемном содержании приземного аэрозоля доминирует грубодисперсная фракция, составляя в среднем за весь период наблюдений ~75%. При исключении из рассмотрения периодов задымления атмосферы отношение $V^{(c)}/V^{(tot)}$ монотонно убывает от 82,1 до 55,1%, оставаясь выше 50%. Так же как и геометрическое сечение $S^{(c)}$, среднемесячная концентрация $V^{(c)}$ снижается примерно в два раза, от $0,782 \cdot 10^{-10}$ в июле до $0,40 \cdot 10^{-10}$ в октябре; $V^{(f)}$ достигает наибольших значений в августе (39,2%) и октябре (52,8%), т.е. в те месяцы, когда наблюдался приход дымового аэрозоля. В августе задымление воздуха наблюдалось в течение третьей декады. Для этого периода относительный вклад $V^{(f)}$ в суммарное содержание аэрозоля оказывается еще выше (64,9%). Если не учитывать результаты, полученные в дымовых ситуациях, то среднемесячные значения $V^{(f)}$ будут монотонно возрастать от $0,104 \cdot 10^{-10}$ до $0,447 \cdot 10^{-10}$. Таким образом, в течение рассмотренного периода объемная концентрация субмикронных частиц увеличилась более чем в четыре раза. Накоплению аэрозоля способствовали низкая повторяемость циклонов и значительный дефицит осадков летом и осенью (см. разд. 1).

Другая возможная причина наблюдаемого роста $V^{(f)}$ – сезонная изменчивость высоты слоя перемешивания (ВСП), зависящая в том числе от степени прогрева подстилающей поверхности и прилегающего к ней слоя воздуха за счет приходящей солнечной радиации. На территории Сибирского региона ВСП достигает максимальных значений в мае-июне [61] и убывает при переходе к осенне-зимнему периоду.

В Томске, по данным [53], максимальное поступление суммарной солнечной радиации в 2003 г. наблюдалось в мае-июне. Также в июне достигли максимума среднемесячная температура воздуха в приземном слое [56] и радиационный баланс подстилающей поверхности [62].

Высокая инсоляция приводит к усилению турбулентного перемешивания воздуха и выносу аэрозольных частиц конвективными потоками из приземной атмосферы в верхние слои. Ослабление инсоляции начиная с июля сопровождается снижением слоя перемешивания. Поскольку слой перемешивания служит «резервуаром», в котором происходит накопление атмосферных примесей, то последующее уменьшение ВСП приводит к локализации аэрозоля в слое меньшей толщины и повышению его концентрации в приземном слое. Этот вопрос будет более детально рассмотрен в отдельной работе.

На рис. 6 приведены box-диаграммы распределений объемных концентраций субмикронных и грубодисперсных частиц, полученных в условиях незадымленной атмосферы.

Из представленных диаграмм следует, что среднее и медиана, соответствующие объединенному распределению $V^{(f)}$, равны $0,192 \cdot 10^{-10}$ и $0,152 \cdot 10^{-10}$, а для $V^{(c)}$ – $0,568 \cdot 10^{-10}$ и $0,475 \cdot 10^{-10}$ соответственно.

Медиана объединенного распределения $V^{(f)}$ наиболее близка к медианам распределений, полученным в июле и августе, с которыми не имеет значимого различия. Медиана объединенного распределения $V^{(c)}$ не отличается значимо от медиан распределений, полученных в мае, июне и августе. В течение периода наблюдений половина всех значений $V^{(f)}$ попала в интервал $(0,101–0,233) \cdot 10^{-10}$. Для параметра $V^{(c)}$ аналогичный интервал равен $(0,334–0,712) \cdot 10^{-10}$.

Во всех рассмотренных случаях асимметрия распределения параметров $V^{(f)}$ и $V^{(c)}$ на месячных интервалах положительная. В целом более высокие значения коэффициентов асимметрии у распределения $V^{(f)}$. Коэффициенты асимметрии $V^{(f)}$ и $V^{(c)}$ минимальны в мае (1,08 и 0,38) и максимальны в июле-августе (2,37 и 1,82), что согласуется с результатами, полученными для распределений $S^{(f)}$ и $S^{(c)}$.

Как и средние значения и медианы распределений $V^{(f)}$, межквартильный размах Q3–Q1 растет монотонно, увеличиваясь почти в четыре раза, от $0,055 \cdot 10^{-10}$ до $0,210 \cdot 10^{-10}$. В июле и августе не выявлено значимого расхождения между средними значениями распределений $V^{(f)}$ и между их медианами; для распределений $V^{(f)}$ значения квартилей Q1 ($0,099$ и $0,104$) $\cdot 10^{-10}$ и Q3 ($0,206$ и $0,204$) $\cdot 10^{-10}$ близки. Среднемесячные значения $V^{(c)}$ незначимо

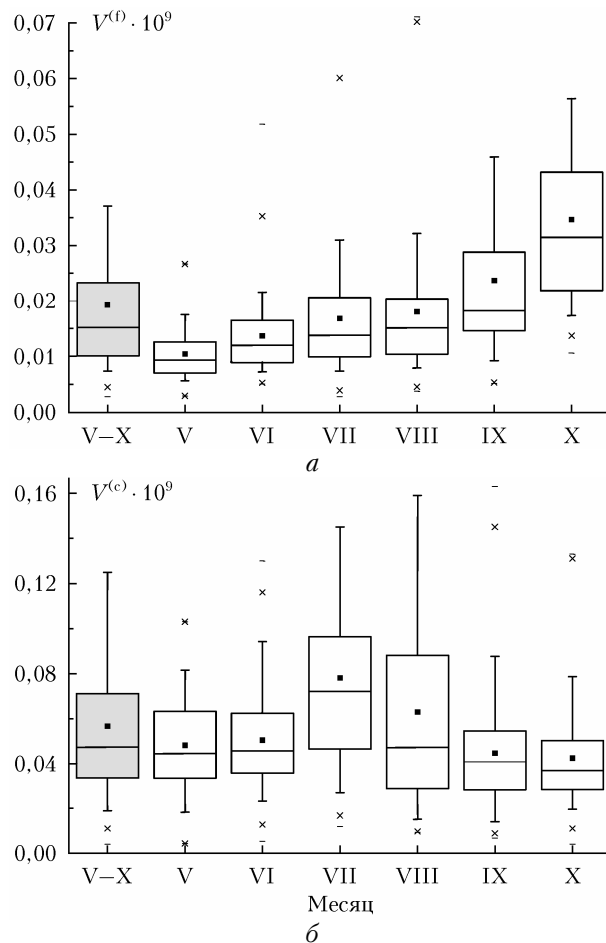


Рис. 6. Box-диаграммы распределений объемных концентраций частиц субмикронной (а) и грубодисперсной (б) фракций на месячных интервалах

различаются в мае-июне, как и в случае распределений $S^{(c)}$ (см. рис. 4). Если исключить экстремально высокое значение медианы распределения $V^{(c)}$ в июле, то в остальные месяцы значимые различия между медианами не наблюдаются. Распределения $V^{(c)}$ имеют наибольший межквартильный размах в июле-августе $(0,50–0,59) \cdot 10^{-10}$, т.е. в период, когда были достигнуты их максимальные средние значения. В остальные месяцы межквартильный размах менялся в узком интервале $(0,22–0,30) \cdot 10^{-10}$.

Исследования статистических связей между спектральными измерениями аэрозольного коэффициента ослабления света в приземном слое атмосферы в летний период и объемной концентрацией частиц [44] показали существование высокой корреляции между $V^{(f)}$ и измерениями $\epsilon(\lambda)$ в коротковолновой области спектра. Для $V^{(c)}$ высокая корреляция с измерениями $\epsilon(\lambda)$ наблюдается в ИК-диапазоне.

Обобщая результаты [44], рассмотрим временную изменчивость корреляционных связей между спектральными измерениями $\epsilon(\lambda)$ и объемной концентрацией аэрозоля по данным более длительных рядов наблюдений.

На рис. 7, а, б представлены спектральные зависимости коэффициентов корреляции ρ между восстановленной объемной концентрацией аэрозоля

и измеренным коэффициентом ослабления $\epsilon(\lambda)$; они имеют монотонный вид. Для субмикронных частиц (рис. 7, а) ρ убывает с ростом λ ; в наибольшей степени это проявляется для данных, полученных в мае, когда при $\lambda = 0,69$ мкм $\rho = 0,41$. В остальные месяцы ρ изменяется в интервале 0,795–0,983 при $\lambda \leq 0,69$ мкм (рис. 7, в).

Для грубодисперсных частиц (рис. 7, б) наблюдается противоположная картина: ρ увеличивается с длиной волны. Например, в июле ρ монотонно возрастает от 0,62 при $\lambda = 0,45$ мкм до 0,936 при $\lambda = 3,91$ мкм. Из рис. 7, г следует, что в период с мая по октябрь при $\lambda \geq 1,6$ мкм значения ρ не выходят за пределы 0,826–0,971.

4. Средний радиус частиц

На рис. 8 показаны распределения среднемесячных значений параметров $r_s^{(f)}$, $r_s^{(c)}$ и $r_s^{(tot)}$. Усредненные за весь период наблюдений радиусы частиц (первая группа столбцов) равны 0,166; 1,898 и 0,557 мкм соответственно.

Среди рассматриваемых микроструктурных параметров средние радиусы частиц отличаются наибольшей стабильностью. Например, $r_s^{(f)}$ изменяются в узком диапазоне 0,154–0,186 мкм, монотонно увеличиваясь начиная с июня. При этом коэффициенты вариации распределений $r_s^{(f)}$ на месячных интервалах, за исключением мая, имеют относительно невысокие близкие значения в пределах 15–22%; диапазон изменения $r_s^{(c)}$ еще более узкий (18–21%) при изменении среднемесячных значений параметра в интервале 1,70–2,20 мкм. Так же как и в случае субмикронного аэрозоля, временная изменчивость $r_s^{(c)}$ характеризуется положительным трендом, который прерывается в октябре.

На рис. 9 изображены box-диаграммы распределений средних радиусов субмикронных и грубодисперсных частиц. Из представленных данных следует, что в течение всего цикла наблюдений в 99% случаев значения $r_s^{(f)}$ и $r_s^{(c)}$ не превышали 0,286 и 2,842 мкм соответственно.

Медианы распределений $r_s^{(f)}$ на месячных интервалах монотонно возрастают в диапазоне

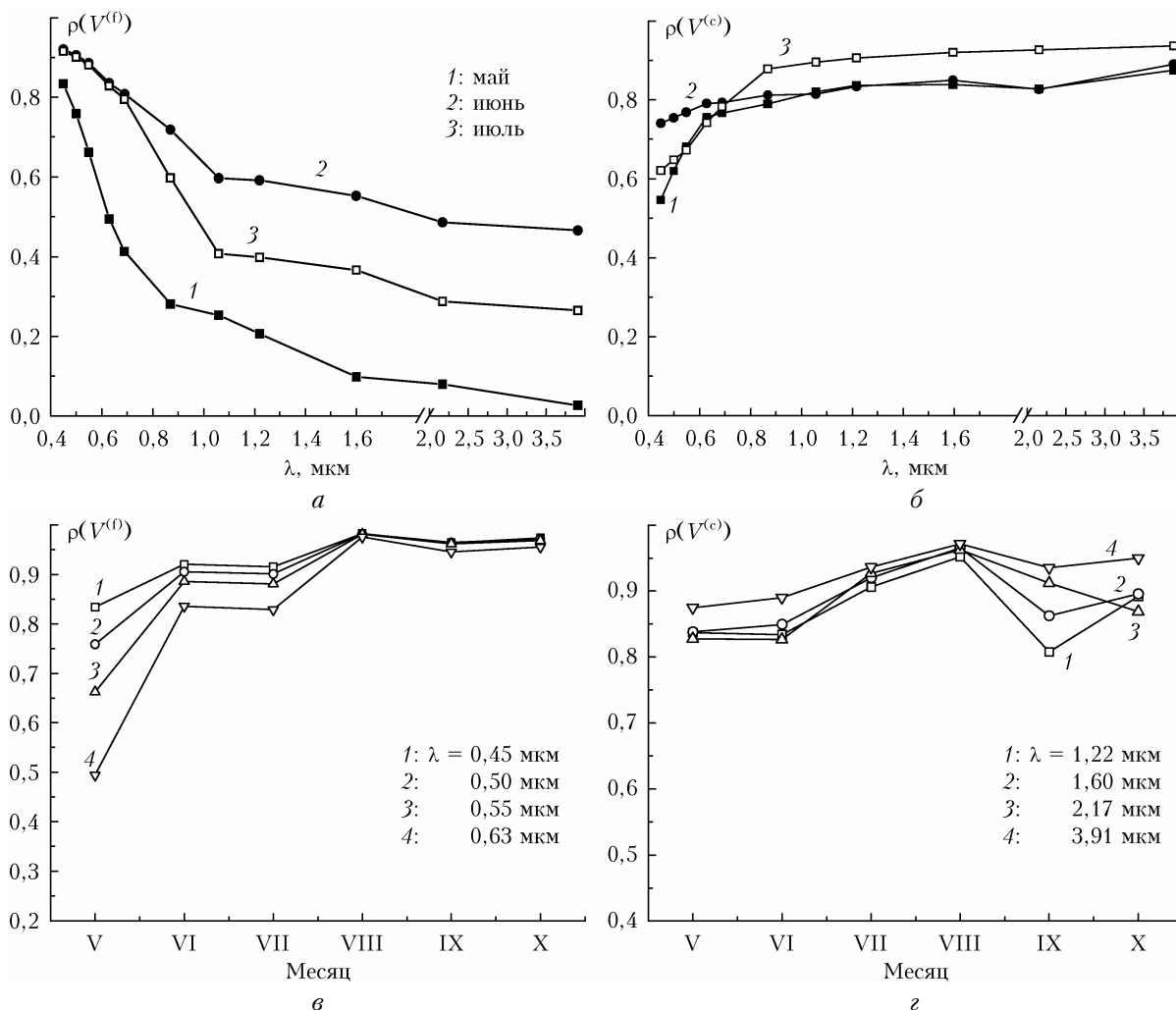


Рис. 7. Спектральная (а, б) и временная (в, г) изменчивость коэффициента корреляции между восстановленной объемной концентрацией аэрозоля и измеренным коэффициентом ослабления $\epsilon(\lambda)$: а, в – субмикронные; б, г – грубодисперсные частицы

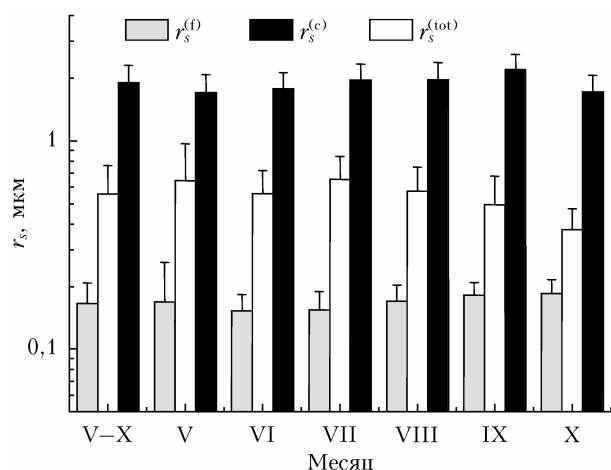


Рис. 8. Диаграммы изменчивости среднемесячных значений радиусов частиц субмикронной, грубодисперсной фракций и их суммы

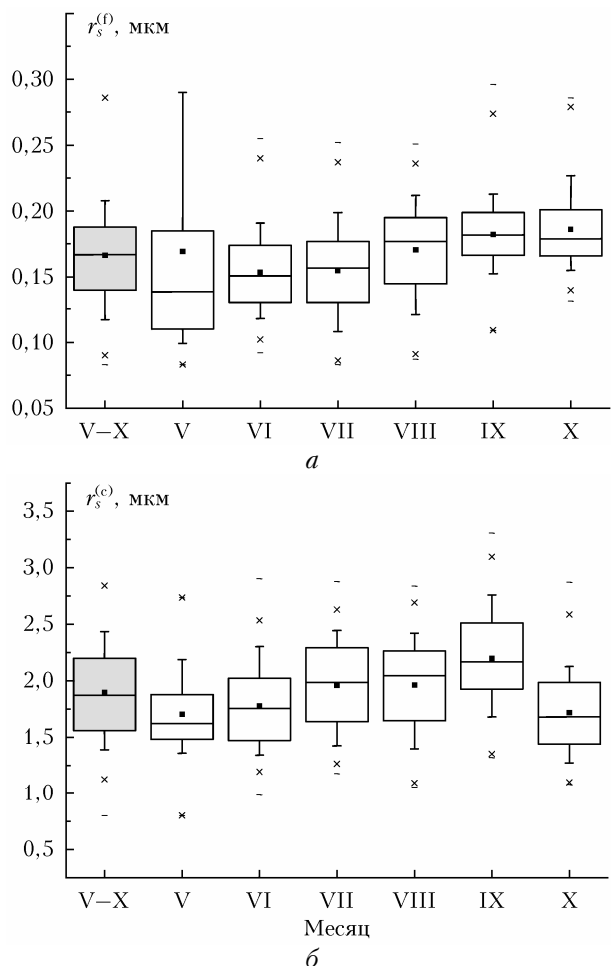


Рис. 9. Вох-диаграммы распределений средних радиусов частиц субмикронной (а) и грубодисперсной (б) фракций на месячных интервалах

0,139–0,182 мкм. Наибольший рост медианных значений $r_s^{(f)}$ происходил в мае-июне и июле-августе. В осенние месяцы наблюдается стабилизация значе-

ний медиан на уровне 0,179–0,182 мкм. Распределения $r_s^{(f)}$ имеют положительную асимметрию на всех месячных интервалах за исключением августа, когда коэффициент асимметрии $\gamma_1 = -0,30$. В остальных случаях степень асимметрии варьируется в широких пределах, от слабой в июне ($\gamma_1 = 0,09$) до крайне высокой в мае ($\gamma_1 = 2,07$). Распределения $r_s^{(f)}$ различаются также по межквартильному размаху Q3 – Q1, высокому в летние месяцы (0,044–0,050 мкм) и более низкому осенью (0,033–0,035 мкм).

Медианы распределений $r_s^{(c)}$, как и в случае с $r_s^{(f)}$, на месячных интервалах монотонно растут с мая по сентябрь с 1,62 до 2,17 мкм. В октябре медиана распределения $r_s^{(c)}$ резко опускается до 1,68 мкм. В июле распределение $r_s^{(c)}$ близко к симметричному с отрицательным коэффициентом $\gamma_1 = -0,041$. Коэффициент асимметрии распределения $r_s^{(c)}$ также отрицательный в августе ($-0,33$). В остальные месяцы наблюдается умеренная асимметрия с коэффициентами $\gamma_1 = 0,19–0,45$. С июля по октябрь межквартильный размах сохраняется в узком интервале 0,55–0,65 мкм. В отличие от субмикронных частиц в мае наблюдается минимальное значение IQR = 0,40 мкм.

В заключение рассмотрим особенности изменчивости $r_s^{(tot)}$ полного ансамбля частиц, представленной на рис. 8. Средний радиус $r_s^{(tot)}$ с учетом его разделения на субмикронную и грубодисперсную фракции может быть представлен в виде

$$r_s^{(tot)} = pr_s^{(f)} + (1-p)r_s^{(c)}, \quad p = S^{(f)}/S^{(tot)}, \quad (1)$$

где весовыми коэффициентами служат относительные вклады соответствующих фракций в суммарное геометрическое сечение. Слагаемые в (1) пропорциональны объемным концентрациям частиц каждой фракции.

Диапазон изменения среднемесячных значений $r_s^{(tot)}$ сравнительно широкий и составляет 0,38–0,65 мкм при среднем 0,53 мкм за весь период наблюдений. Также увеличенные значения имеет коэффициент вариации параметра $r_s^{(tot)}$, изменяясь на месячных интервалах от 26 до 37%.

Соотношение (1) позволяет оценить роль параметров микроструктуры отдельных фракций в изменчивости $r_s^{(tot)}$. Например, уменьшение $r_s^{(tot)}$ с 0,65 мкм в мае до 0,56 мкм в июне обусловлено уменьшением $r_s^{(f)}$ при одновременном увеличении их веса p (0,73–0,76) в разложении (1) и уменьшением вклада грубодисперсных частиц $(1-p)$ в суммарном сечении несмотря на рост $r_s^{(c)}$ (1,70–1,78 мкм). При этом также произошло относительное уменьшение объемной концентрации грубодисперсных частиц $V^{(c)}/V^{(tot)}$ (0,82–0,79).

Из рис. 8 видно, что начиная с июля $r_s^{(tot)}$ монотонно убывает. В этот же период монотонно увеличиваются среднемесячные значения $r_s^{(f)}$ и $r_s^{(c)}$. Ведущим фактором наблюдаемой временной изменчивости $r_s^{(c)}$ служит монотонное уменьшение отношения $S^{(c)}/S^{(tot)}$ более чем в два раза, с 0,27 до 0,12.

Одновременно происходило уменьшение вклада грубодисперсного аэрозоля в объемном содержании $V^{(c)}/V^{(tot)}$ с 0,82 до 0,55. На уменьшении $r_s^{(tot)}$ в октябре отразилось также существенное уменьшение размеров частиц грубодисперсного аэрозоля.

Заключение

В работе рассмотрены особенности временной изменчивости микроструктурных параметров аэрозоля на месячных интервалах с мая по октябрь 2003 г. в приземном слое атмосферы в районе г. Томска. Микроструктура аэрозоля была восстановлена из решения обратной задачи для спектральных измерений коэффициента аэрозольного ослабления света на горизонтальной трассе. В качестве анализируемых параметров были взяты геометрическое сечение, объемная концентрация и средний радиус частиц аэрозоля. Оценка параметров микроструктуры проводилась для субмикронной и грубодисперсной фракций аэрозоля и объединенного ансамбля частиц.

Для месячных интервалов наблюдений получены оценки статистических характеристик, таких как среднее значение и стандартное отклонение, коэффициенты вариации и асимметрии, медиана распределений микроструктурных параметров аэрозоля.

Было показано, что субмикронные частицы вносят основной вклад в суммарное геометрическое сечение аэрозоля, который изменяется в пределах 73–88% и составляет в среднем 79,3%. В отличие от геометрического сечения в объемном содержании приземного аэрозоля доминирует грубодисперсная фракция, составляя в среднем за весь период наблюдений ~75%.

В условиях незадымленной атмосферы среднемесячные значения геометрического сечения и объемной концентрации субмикронного аэрозоля монотонно возрастали. В период наблюдений объемная концентрация субмикронных частиц увеличилась более чем в четыре раза. Среднемесячные значения концентрации грубодисперсных частиц снизились примерно в два раза.

Средние радиусы частиц характеризуются меньшей изменчивостью по сравнению с другими микроструктурными параметрами. Средние радиусы субмикронных частиц изменяются на месячных интервалах в пределах 0,154–0,186 мкм, грубодисперсных – от 1,7 до 2,2 мкм, суммарного ансамбля – в диапазоне 0,38–0,65 мкм. В изменчивости среднего радиуса суммарного ансамбля частиц ведущую роль играет соотношение между геометрическими сечениями его фракций.

Также исследована изменчивость корреляционных связей между коэффициентами аэрозольного ослабления света и объемной концентрацией частиц. Для объемной концентрации субмикронных частиц коэффициент корреляции убывает с ростом длины волны, оставаясь на месячных интервалах в пределах 0,795–0,983 при $\lambda \leq 0,69$ мкм. В случае грубодисперсных частиц увеличение длины волны приводит к возрастанию коэффициента корреляции,

значения которого при $\lambda \geq 1,6$ мкм не выходят за пределы 0,826–0,971.

В отличие от объемной концентрации средний радиус частиц является более стабильной по времени характеристикой. Среднемесячные значения $r_s^{(f)}$ в приземной атмосфере находятся в интервале 0,15–0,20 мкм, достигая минимума в июне, и существенно превышают соответствующие значения для всей толщи атмосферы (0,10–0,11 мкм). В изменчивости параметра $r_s^{(c)}$ в приземном слое наблюдаются нерегулярные осцилляции, диапазон которых для среднемесячных значений составляет 1,71–2,20 мкм, близкий диапазону вариаций $r_s^{(c)}$ в вертикальном столбе атмосферы (1,75–2,05 мкм).

Авторы признательны В.Н. Ужегову за предоставленные для анализа экспериментальные данные. Работа выполнена в рамках государственного задания ИОА СО РАН.

1. *Belov V.V., Juwiler I., Blaunstein N., Tarasenkov M.V., Poznakharev E.S.* NLOS Communication: Theory and experiments in the atmosphere and underwater // Atmosphere. 2020. V. 11, N 10. URL: 10.3390/atmos11101122 (last access: 27.06.2021).
2. *Тарасенков М.В., Белов В.В., Познахарев Е.С.* Моделирование процесса передачи информации по атмосферным каналам распространения рассеянного лазерного излучения // Оптика атмосфер. и океана. 2017. Т. 30, № 5. С. 371–376; *Tarasenkov M.V., Belov V.V., Poznakharev E.S.* Simulation of information transfer through atmospheric channels of scattered laser radiation propagation // Atmos. Ocean. Opt. 2017. V. 30, N 5. P. 412–416.
3. *Тарасенков М.В., Белов В.В.* Сравнение трудоемкости алгоритмов статистического моделирования импульсной реакции канала бистатистической лазерной связи на рассеянном излучении и бистатистического лазерного зондирования // Вычислительные технологии. 2017. Т. 22, № 3. С. 91–102.
4. *Калошин Г.А., Матвиенко Г.Г., Шишкин С.А., Анисимов В.И., Бутузов В.В., Жуков В.В., Столяр Г.В., Пасюк В.П.* Потенциал лазерной системы посадки самолетов // Оптика атмосфер. и океана. 2016. Т. 29, № 3. С. 232–242; *Kaloshin G.A., Matvienko G.G., Shishkin S.A., Anisimov V.I., Butuzov V.V., Zhukov V.V., Stolyarov G.V., Pasyuk V.P.* Potential of an aircraft landing laser system // Atmos. Ocean. Opt. 2016. V. 29, N 4. P. 353–364.
5. *Kaloshin G.A., Shishkin S.A.* Detectable distance calculations for a visual navigation system using a scanning semiconductor laser with electronic pumping // Appl. Opt. 2011. V. 50, N 20. P. 3442–3448.
6. URL: <https://www.ipcc.ch/> (last access: 27.06.2021).
7. URL: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_all_final.pdf (last access: 27.06.2021).
8. *Intergovernmental Panel on Climate Change.* Climate Change 2013 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / 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: Cambridge University Press, 2014. 1535 p.
9. *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. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / 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. P. 571–657.
10. *Satellite aerosol remote sensing over land* / A.A. Kokhanovsky, G. de Leeuw (eds.). UK, Chichester: Springer, Praxis, 2009. 398 p. DOI: 10.1007/978-3-540-69397-0.
 11. *Von Hoyningen-Huene W., Yoon J., Vountas M., Istomina L.G., Rohen G., Dinter T., Kokhanovsky A.A., Burrows J.P.* Retrieval of spectral aerosol optical thickness over land using ocean color sensors MERIS and SeaWiFS // *Atmos. Meas. Tech.* 2011. V. 4, N 2. P. 151–171.
 12. *Белов В.В., Тарасенков М.В., Энгель М.В., Гриднев Ю.В., Зимовая А.В., Познахарев Е.С., Абрамочкин В.Н., Федосов А.В., Кудрявцев А.Н.* Атмосферная коррекция спутниковых изображений земной поверхности в оптическом диапазоне длин волн. Оптическая связь на рассеянном излучении // *Оптика атмосф. и океана.* 2019. Т. 32, № 9. С. 753–757; *Belov V.V., Tarasenkov M.V., Engel M.V., Gridnev Yu.V., Zimovaya A.V., Abramochkin V.N., Poznakharev E.S., Fedosov A.V., Kudryavtsev A.N.* Atmospheric correction of satellite images of the earth's surface in the optical wavelength range. Optical communication based on scattered radiation // *Atmos. Ocean. Opt.* 2020. V. 33, N 1. P. 80–84.
 13. *Тарасенков М.В., Зимовая А.В., Белов В.В., Энгель М.В.* Восстановление коэффициентов отражения земной поверхности по спутниковым измерениям MODIS с учетом поляризации излучения // *Оптика атмосф. и океана.* 2019. Т. 32, № 8. С. 641–649; *Tarasenkov M.V., Zimovaya A.V., Belov V.V., Engel M.V.* Retrieval of reflection coefficients of the earth's surface from modis satellite measurements considering radiation polarization // *Atmos. Ocean. Opt.* 2020. V. 33, N 2. P. 179–187.
 14. *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., Gilardoni S.* Particulate matter, air quality and climate: lessons learned and future needs // *Atmos. Chem. Phys.* 2015. V. 15, P. 8217–8299. URL: <https://doi.org/10.5194/acp-15-8217-2015> (last access: 27.06.2021).
 15. *WHO: Air quality guidelines. Global update 2005.* Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. WHO, 2006. URL: https://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0005/78638/E90038.pdf (last access: 27.06.2021).
 16. *WHO: Health effects of particulate matter. Policy implications for countries in Eastern Europe, Caucasus and central Asia.* WHO, 2013. URL: https://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0006/189051/Health-effects-of-particulate-matter-final-Eng.pdf (last access: 27.06.2021).
 17. *WMO/GAW Aerosol Measurement Procedures: Guidelines and Recommendations.* Geneva: WMO, 2003. N 153. 67 p.
 18. *WMO/GAW Aerosol Measurement Procedures, Guidelines and Recommendations.* Geneva: WMO, 2016. N 227. 103 p.
 19. *WMO Global Atmosphere Watch (GAW) Implementation Plan: 2016–2023.* Geneva: WMO, 2017. N 228. 84 p.
 20. *Holben B.N., Eck T.F., Slutsker I., Tanre D., Buis J.P., Setzer A., Vermote E., Reagan J.A., Kaufman Y.J., Nakajima T., Lavenu F., Jankowiak I., Smirnov A.* AERONET – a federated instrument network and data archive for aerosol characterization // *Remote Sens. Environ.* 1998. V. 66, N 1. P. 1–16.
 21. URL: <http://aeronet.gsfc.nasa.gov/> (last access: 27.06.2021).
 22. *Wehrli C.* GAW–PFR: A Network of Aerosol Optical Depth Observations with Precision Filter // WMO / U. Baltensperger, L. Barrie, C. Wehrli (eds.). Davos: WHO, 2004. N 162. 148 p. URL: https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=11094 (last access: 27.06.2021).
 23. *McArthur L.J.B., Halliwell D.H., Niebergall O.J., O'Neill N.T., Slusser J.R., Wehrli C.* Field comparison of network Sun photometers // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108, N D19. P. 4596. DOI: 10.1029/2002JD002964.
 24. *Takamura T., Nakajima T.* Overview of SKYNET and its activities // *Opt. Pura Apl.* 2004. V. 37. P. 3303–3308.
 25. URL: <http://www.euroskyrad.net/> (last access: 27.06.2021).
 26. *Remer L.A., Kaufman Y.J., Tanre D., Mattoo S., Chu D.A., Martins J.V., Li R.-R., Ichoku C., Levy R.C., Kleidman R.G., Eck T.F., Vermote E., Holben B.N.* The MODIS aerosol algorithm, products, and validation // *J. Atmos. Sci.* 2005. V. 62, N 4. P. 947–973.
 27. *Levy R.C., Mattoo S., Munchak L.A., Remer L.A., Sayer A.M., Patadia F., Hsu N.C.* The Collection 6 MODIS aerosol products over land and ocean // *Atmos. Meas. Tech.* 2013. V. 6. P. 2989–3034. DOI: 10.5194/amt-6-2989-2013.
 28. *Liu H., Remer L.A., Huang J., Huang H.-C., Kondragunta S., Laszlo I., Oo M., Jackson J.M.* Preliminary evaluation of S-NPP VIIRS aerosol optical thickness // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2014. V. 119. P. 3942–3962. DOI: 10.1002/2013JD020360.
 29. *Levy R.C., Munchak L.A., Mattoo S., Patadia F., Remer L.A., Holz R.E.* Towards a long-term global aerosol optical depth record: Applying a consistent aerosol retrieval algorithm to MODIS and VIIRS-observed reflectance // *Atmos. Meas. Tech.* 2015. V. 8. P. 4083–4110. DOI: 10.5194/amt-8-4083-2015.
 30. *Torres O., Tanskanen A., Veihelmann B., Ahn C., Braak R., Bhartia P.K., Veeffkind P., Levelt P.* Aerosols and surface UV products from Ozone Monitoring Instrument observations: An overview // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. P. D24S47. DOI: 10.1029/2007JD008809.
 31. *Ahn C., Torres O., Jethva H.* Assessment of OMI near-UV aerosol optical depth over land // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2014. V. 119. P. 2457–2473. DOI: 10.1002/2013JD020188.
 32. URL: <https://gawsis.meteoswiss.ch/GAWSIS//index.html#/> (last access: 27.06.2021).
 33. *Горчаков Г.И.* Матрица рассеяния света и типы оптической погоды // *Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана.* 1973. Т. 9, № 2. С. 204–209.
 34. *Горчаков Г.И., Емиленко А.С., Свириденков М.А.* Однопараметрическая модель приземного аэрозоля // *Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана.* 1981. Т. 17, № 1. С. 39–49.
 35. *Кабанов М.В., Панченко М.В., Пхалагов Ю.А., Веретенников В.В., Ужегов В.Н., Фадеев В.Я.* Оптические свойства прибрежных атмосферных дымок. Новосибирск: Наука, 1988. 201 с.

36. *Веретенников В.В., Наац И.Э., Панченко М.В., Фадеев В.Я.* К определению микроструктуры и показателя преломления атмосферных дымок из поляризационных характеристик светорассеяния // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. 1978. Т. 14, № 12. С. 1313–1317.
37. *Веретенников В.В., Кабанов М.В., Панченко М.В.* Микрофизическая интерпретация однопараметрической модели поляризационных индикатрис (дымка прибрежного района) // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. 1986. Т. 22, № 10. С. 1042–1049.
38. *Веретенников В.В.* Интерпретация модели спектрального ослабления дымки морского прибрежного района // Оптика атмосфер. и океана. 1990. Т. 3, № 10. С. 1026–1033.
39. *Макиенко Э.В., Пхалагов Ю.А., Рахимов Р.Ф., Ужегов В.Н., Щелканов Н.Н.* Исследование динамики развития оптически плотных зимних дымок методом обращения измерений спектральной прозрачности атмосферы // Оптика атмосфер. и океана. 1994. Т. 7, № 11–12. С. 1504–1507.
40. *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.
41. *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.
42. *Рахимов Р.Ф., Ужегов В.Н., Макиенко Э.В., Пхалагов Ю.А.* Микрофизическая интерпретация сезонной и суточной изменчивости спектральной зависимости коэффициента аэрозольного ослабления на приземных трассах // Оптика атмосфер. и океана. 2004. Т. 17, № 5–6. С. 386–404.
43. *Веретенников В.В., Меньщикова С.С., Ужегов В.Н.* 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 // Оптика атмосфер. и океана. 2018. Т. 31, № 11. С. 857–866. DOI: 10.15372/AOO20181101; *Veretennikov V.V., Men'shchikova S.S., Uzhegov V.N.* Variability in parameters of the near-surface aerosol microstructure in summer according to results of inversion of measurements of spectral extinction of light on a horizontal path in Tomsk: Part I – geometrical cross section of fine and coarse particles // Atmos. Ocean. Opt. 2019. V. 32, N. 2. P. 128–137. DOI: 10.1134/S1024856019020155.
44. *Веретенников В.В., Меньщикова С.С., Ужегов В.Н.* 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 // Оптика атмосфер. и океана. 2018. Т. 31, № 11. С. 867–875. DOI: 10.15372/AOO20181102; *Veretennikov V.V., Men'shchikova S.S., Uzhegov V.N.* Variability in parameters of the near-surface aerosol microstructure in summer according to results of inversion of measurements of spectral extinction of light on a horizontal path in Tomsk: Part II – volume concentration and mean radius of particles // Atmos. Ocean. Opt. 2019. V. 32, N 2. P. 138–146. DOI: 10.1134/S1024856019020167.
45. *Исаков А.А., Груздев А.Н., Тихонов А.В.* О долгопериодных вариациях оптических и микрофизических параметров приземного аэрозоля // Оптика атмосфер. и океана. 2005. Т. 18, № 5–6. С. 393–399.
46. *Исаков А.А., Груздев А.Н.* Долгопериодные вариации оптических и микрофизических параметров приземного аэрозоля на Звенигородской научной станции // Изв. РАН. Физика атмосфер. и океана. 2009. Т. 45, № 2. С. 245–254.
47. *Kozlov V.S., Panchenko M.V., Tumakov A.G., Shmargunov V.P., Yaushева 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.
48. *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.
49. *Панченко М.В., Тертугова С.А., Козлов В.С., Полькин В.В., Яушева Е.П.* Годовой ход конденсационной активности субмикронного аэрозоля в приземном слое атмосферы Западной Сибири // Оптика атмосфер. и океана. 2005. Т. 18, № 8. С. 678–683.
50. *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. М., 2004. 19 с.
51. URL: http://thermograph.ru/mon/st_29430-y_2003.htm (last access: 24.04.2018).
52. *Белан Б.Д., Рассказчикова Т.М., Складнева Т.К.* Синоптический режим Томска за 1993–2004 гг. // Оптика атмосфер. и океана. 2005. Т. 18, № 10. С. 887–892.
53. *Белан Б.Д., Ивлев Г.А., Складнева Т.К.* Многолетний мониторинг суммарной и ультрафиолетовой (В) радиации в районе г. Томска // Оптика атмосфер. и океана. 2012. Т. 25, № 1. С. 61–65.
54. *Складнева Т.К., Рассказчикова Т.М., Аришинова В.Г., Аришинов М.Ю.* Изменение радиационных и метеорологических параметров атмосферы по данным наблюдений в Томске // Оптика атмосфер. и океана. 2018. Т. 31, № 4. С. 288–293.
55. *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.
56. URL: <http://lop.iao.ru/RU/tor/MeteoandGas/> (last access: 24.04.2018).
57. *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. DOI: 10.1134/S1024856013060134.
58. *Зуев В.Е., Креков Г.М.* Оптические модели атмосферы. Л.: Гидрометеониздат, 1986. 256 с.
59. *Креков Г.М., Рахимов Р.Ф.* Опτικο-локационная модель континентального аэрозоля. Новосибирск: Наука, 1982. 198 с.
60. *Райсм П.* Аэрозоли. Введение в теорию. М.: Мир, 1987. 280 с.
61. *Климатические характеристики условий распространения примесей в атмосфере* / под ред. Э.Ю. Безуглой, М.Е. Берлянда. Л.: Гидрометеониздат, 1983. 328 с.

62. Дудорова Н.В., Белан Б.Д. Радиационный баланс подстилающей поверхности г. Томска в 2004–2005 гг. // Оптика атмосф. и океана. 2015. Т. 28, № 3. С. 223–

228; Dudorova N.V., Belan B.D. Radiation balance of underlying surface in Tomsk during 2004–2005 // Atmos. Ocean. Opt. 2015. V. 28, N 4. P. 312–317.

V.V. Veretennikov, S.S. Men'shchikova. Annual variability of aerosol microstructure according to the data of horizontal transparency of the atmosphere in Tomsk.

The annual variability of aerosol microstructure of the near-surface aerosol has been studied based on solving the inverse problem for spectral measurements of aerosol extinction coefficient. The numerical algorithm based on the method of integral distributions was used to solve the inverse problem. The geometrical section, volume concentration, and mean radius of aerosol particles are considered. Aerosol microstructure parameters were estimated for the fine and coarse fractions and the total ensemble of particles. Estimates of the statistical characteristics of the distributions of aerosol microstructure parameters on monthly intervals are obtained. It has been shown that the fine particles make the main contribution to the total geometrical cross section of the near-surface aerosol, which varies within 73–88%. The coarse fraction predominates in the volume content of the near-surface aerosol, averaging about 75% over the entire observation period. During the observation period, the dependences of the monthly mean values of the geometrical cross section and the volume concentration of the fine aerosol had a monotonically increasing character. The volume concentration of fine particles has increased more than four times. The monthly average values of the volume concentration of coarse particles have changed twice.