

## Межгодовая изменчивость микроструктурных параметров аэрозоля по данным солнечной фотометрии в Томске

В.В. Веретенников\*

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

Поступила в редакцию 14.07.2016 г.

Представлены результаты исследования временной изменчивости микроструктурных параметров аэрозоля, восстановленных при обращении спектральных измерений аэрозольной оптической толщины. Входные данные получены в ИОА СО РАН с помощью солнечных фотометров типа SP в периоды наблюдений 2003–2006 и 2011–2014 гг. В течение первого периода измерения аэрозольной оптической толщины выполнялись на 13 длинах волн в диапазоне 0,37–4 мкм. Во втором периоде наблюдений верхняя граница спектрального диапазона измерений составляла 2,14 мкм. Общий объем обработанных данных включал свыше 7 тыс. среднечасовых спектров. В качестве анализируемых параметров микроструктуры аэрозоля рассматривались геометрическое сечение, объемная концентрация и средний радиус частиц.

*Ключевые слова:* аэрозольная оптическая толщина, микроструктура аэрозоля, обратные задачи; aerosol optical thickness, aerosol microstructure, inverse problems.

### Введение

Рассмотрение аэрозоля как важного звена климатической системы обуславливает необходимость исследования долговременной изменчивости его характеристик. В числе ключевых параметров аэрозоля, рекомендованных для долговременных наблюдений в глобальной наземной сети по программе WMO/GAW [1], наряду с оптическими параметрами, такими как оптическая толщина, коэффициенты рассеяния и поглощения, указаны также массовые концентрации двух основных фракций аэрозоля.

Наиболее продолжительные и регулярные временные ряды аэрозольных характеристик на территории России получены для приземного аэрозоля [2–8]. В [2] исследована сезонная и межгодовая изменчивость массовой концентрации субмикронного аэрозоля по результатам систематических круглосуточных измерений коэффициента рассеяния сухой основы приземного аэрозоля. Измерения проводились в 1984–1994 гг. в Подмоскowie и г. Кисловодске.

Предметом анализа в [3] являлись долгопериодные вариации трех параметров субмикронного аэрозоля: массовой концентрации, параметра конденсационной активности и параметра Ангстрема — на временных масштабах от нескольких суток до месяцев. Данные для анализа получены в течение 2001–2004 гг. на Звенигородской научной станции (ЗНС) ИФА РАН с использованием спектрополяриметра. По результатам измерений массовой кон-

центрации приземного аэрозоля на ЗНС [5] в 1991–2013 гг. выполнен анализ вариаций концентрации с периодами более 1 мес. Показано, что долгопериодные вариации массовой концентрации аэрозоля связаны с периодичностями повторяемости траекторий атмосферного переноса с определенных траекторий.

Круглосуточные почасовые измерения коэффициента направленного светорассеяния сухой основы субмикронного аэрозоля и массовой концентрации сажи проводятся с 1996 г. на аэрозольной станции ИОА СО РАН [6–8]. В [8] исследованы особенности годового хода, вариации и тренды межгодовой изменчивости среднегодовых и средне-сезонных значений аэрозольных характеристик в 1997–2006 гг. в приземном слое атмосферы региона Западной Сибири.

По измерениям спектральной прозрачности атмосферы в широком диапазоне длин волн (0,44–3,9 мкм) на горизонтальной трассе в Томске методом решения обратной задачи исследована временная трансформация спектра размеров частиц субмикронной и грубодисперсной фракций аэрозоля в условиях короткопериодных наблюдений зимней дымки [9, 10], аномальной спектральной зависимости коэффициента аэрозольного ослабления, возникшей с приходом арктической воздушной массы [11].

В [12] проведены обстоятельные исследования влияния синоптических факторов на изменчивость аэрозольной оптической толщины (АОТ) в условиях Сибири в диапазоне спектра 0,34–4 мкм. На основе анализа средних спектральных зависимостей АОТ в различных синоптических объектах сделаны

\* Виктор Васильевич Веретенников (vuv@iao.ru).

качественные заключения об изменчивости содержания субмикронного и грубодисперсного аэрозоля в атмосфере под влиянием синоптических факторов.

Получение систематических данных об оптических и микрофизических характеристиках аэрозоля по всей толще атмосферы стало доступным с размещением на территории азиатской части России Sun-Sky-радиометров CE-318 [13] глобальной сети AERONET [14, 15].

Исследования АОТ, проводимые в ИОА СО РАН с использованием созданных многоволновых солнечных фотометров типа SP [16, 17], стимулировали разработку методов решения обратных задач аэрозольного светорассеяния, пригодных для массовой автоматизированной обработки больших массивов экспериментальных данных при минимальной априорной информации об искомом решении [18, 19].

Для получения информации о параметрах микроструктуры аэрозоля в вертикальном столбе атмосферы по данным солнечной фотометрии авторами [19] создан программный комплекс, в котором реализован алгоритм решения обратной задачи на основе метода интегральных распределений. Алгоритм эффективен при обработке больших массивов экспериментальных данных в рутинном режиме и применялся при исследовании параметров микроструктуры аэрозоля на различных временных масштабах продолжительностью от одного дня до года [20, 21].

Развивая ранее проведенные исследования, в работе представлены новые данные об изменчивости микроструктурных параметров аэрозоля, восстановленные по результатам регулярных измерений АОТ, которые были выполнены в ИОА СО РАН С.М. Сакериным и Д.М. Кабановым в течение двух периодов наблюдений: в 2003–2006 и 2011–2014 гг.

## 1. Характеристика экспериментальных данных и методика решения обратной задачи

В течение первого периода измерения АОТ  $\tau(\lambda)$  проводились с использованием солнечного фотометра SP-6 [16] в широком спектральном диапазоне 0,37–4 мкм. Исключение составляют измерения, выполненные с января по первую половину июля 2003 г. в более узком диапазоне 0,34–1,02 мкм. Спецификой данных наблюдений во втором периоде являлось уменьшение верхней границы спектрального диапазона до 2,14 мкм в связи с модернизацией измерительного комплекса [17].

В различные периоды наблюдений количество длин волн измерений варьировалось от 10 до 15. При решении обратной задачи измеренные спектральные зависимости  $\tau(\lambda)$  предварительно усреднялись на часовом интервале.

На рис. 1 представлены гистограммы распределения количества среднечасовых реализаций АОТ ( $N$ ) за каждый год наблюдений, использованных для решения обратной задачи. Общий объем обработанных спектров составил около 7400 усредненных реализаций. Видно, что, несмотря на боль-

шой объем данных, они распределены неравномерно как по годам, так и внутри каждого года.

Максимальное количество данных получено в летние сезоны, минимальное – в январе (53) и декабре (27). Имеются интервалы продолжительностью от месяца и больше, для которых данные отсутствовали (январь–апрель 2005 и 2011 гг., май–декабрь 2006 г.)

Решение обратной задачи осуществлялось с использованием модифицированного алгоритма [19], в основе которого лежит метод интегральных распределений. Искомой функцией в алгоритме [19] являлось суммарное геометрическое сечение частиц  $S(r)$  с радиусом, большим или равным  $r$ , которые содержатся в вертикальном столбе атмосферы единичной площади.

В качестве анализируемых параметров, характеризующих микроструктуру аэрозоля, рассматривались объемная концентрация, геометрическое сечение и средний радиус частиц. Указанные параметры оценивались как для полного ансамбля частиц, так и для отдельных фракций аэрозоля – субмикронной ( $f$ ) и грубодисперсной ( $c$ ). Условная граница между фракциями считалась фиксированной и равной 0,55 мкм по радиусу.

Комплексный показатель преломления был выбран одинаковым для обеих фракций и постоянным по спектру. Допустимость такого приближения была оценена в [19]. Априорно заданное значение показателя преломления равно  $1,5 - i \cdot 0$ . При необходимости оценки параметров микроструктуры для других значений показателя преломления можно воспользоваться соотношениями подобия [19] для рассеивающих сред, эквивалентных по спектральному ослаблению.

Как показано в [22], уменьшение верхней границы спектрального диапазона с 3,973 до 2,14 мкм приводит к искажению решения обратной задачи для грубодисперсных частиц. В связи с этим оценка микроструктурных параметров частиц грубодисперсной фракции из измерений АОТ во втором периоде (2011–2014 гг.) производилась также с использованием статистического подхода, который основан на априорно установленных корреляционных связях между значениями  $\tau(\lambda)$  на длине волны 2,14 мкм и объемной концентрацией и геометрическим сечением грубодисперсного аэрозоля [23].

## 2. Результаты восстановления микроструктурных параметров аэрозоля

По данным среднечасовых спектральных зависимостей АОТ были восстановлены многолетние ряды среднечасовых параметров микроструктуры аэрозоля: объемной концентрации, геометрического сечения и среднего радиуса аэрозольных частиц, рассчитанных для полного ансамбля ( $tot$ ) и двух основных фракций – субмикронной и грубодисперсной. В дальнейшем оценивались среднемесячные и среднегодовые значения указанных параметров.

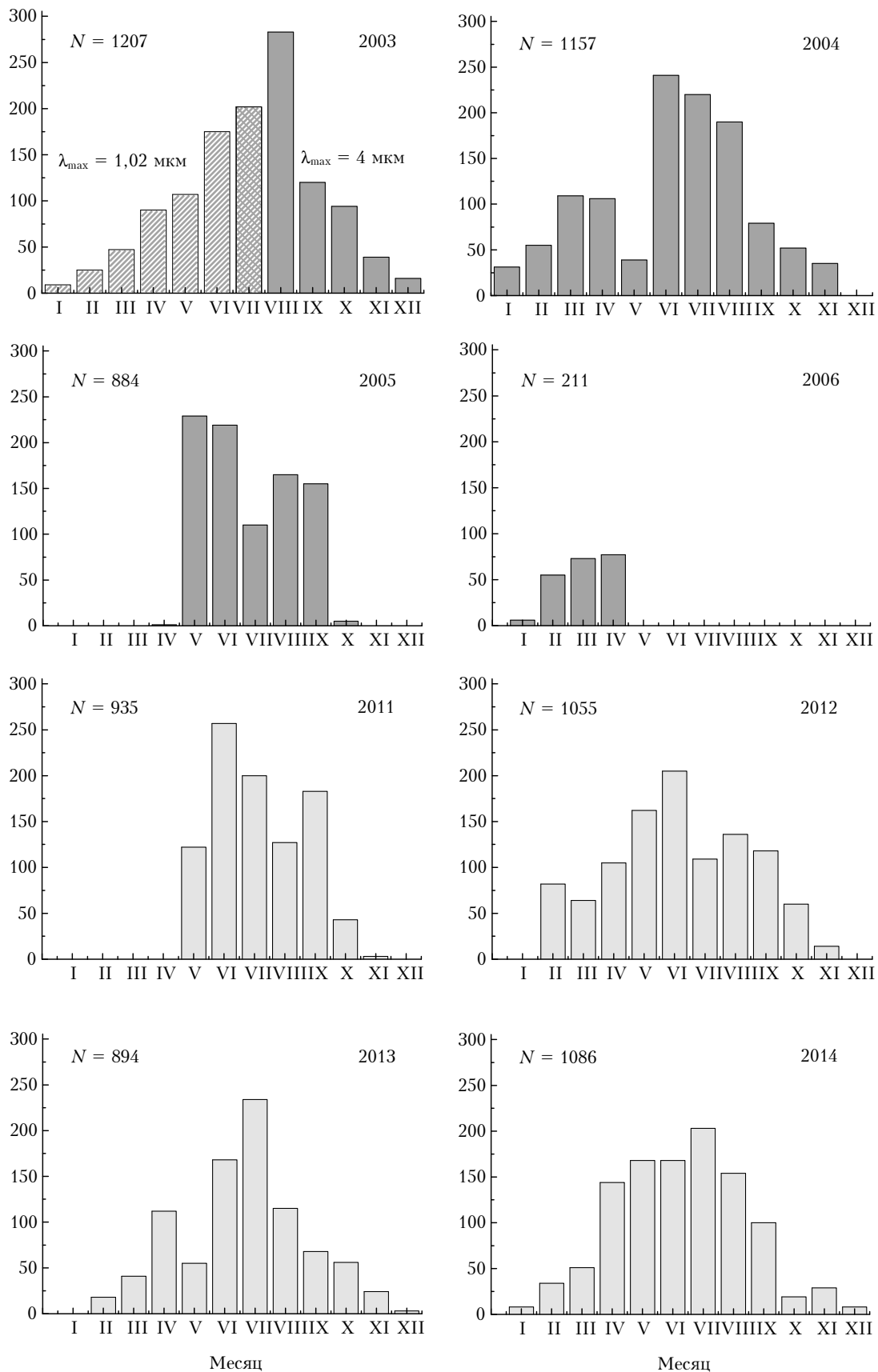


Рис. 1. Гистограммы распределения количества среднечасовых спектров АОТ, использованных для решения обратной задачи

## 2.1. Изменчивость объемной концентрации аэрозоля

На рис. 2 представлена изменчивость среднемесячных значений объемной концентрации субмикронной  $V^{(f)}$ , грубодисперсной  $V^{(c)}$  фракций аэрозоля и их суммы  $V^{(tot)}$  на протяжении периодов 2003–2006 и 2011–2014 гг.

Кривые 1' и 1 на рис. 2, а соответствуют результатам, полученным в разные периоды 2003 г. при обращении АОТ  $\tau(\lambda)$  в узком (0,34–1,02 мкм) и широком (0,37–4 мкм) спектральных диапазонах.

Из представленных данных видно, что даже на усредненных временных зависимостях параметров  $V^{(f)}$ ,  $V^{(c)}$  и  $V^{(tot)}$  наблюдаются вариации в широких пределах как внутри каждого года, так и между разными годами. Имеются также различия в результатах, относящихся к двум основным периодам наблюдений.

Тем не менее в представленных зависимостях можно выделить некоторые общие черты. Например, общим для восстановленных зависимостей является преобладание в суммарном объеме частиц грубодисперсной фракции. Исключение составляет июль

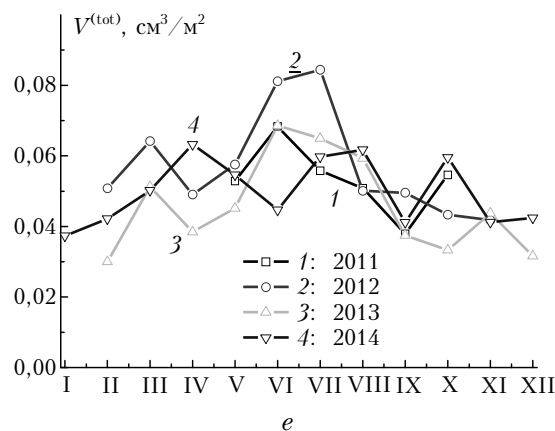
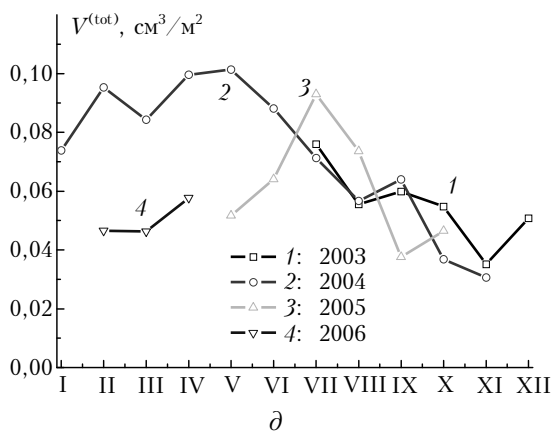
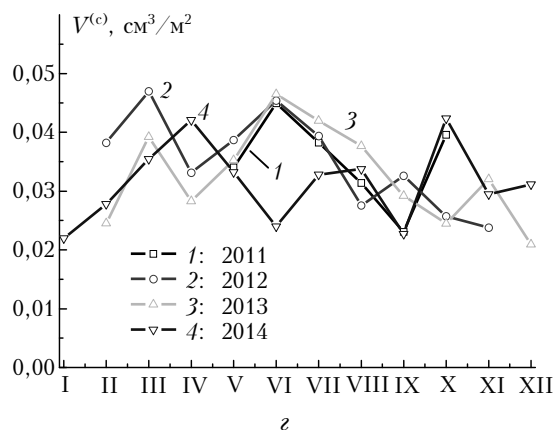
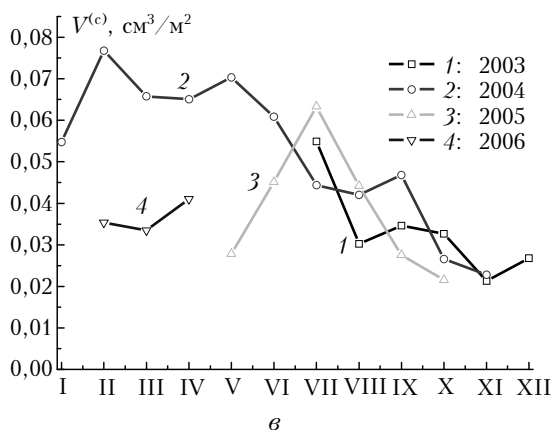
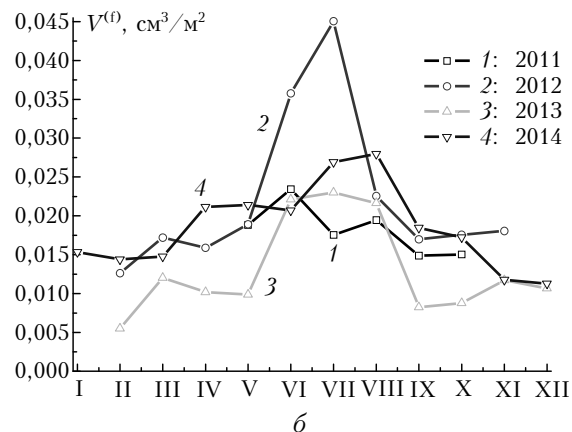
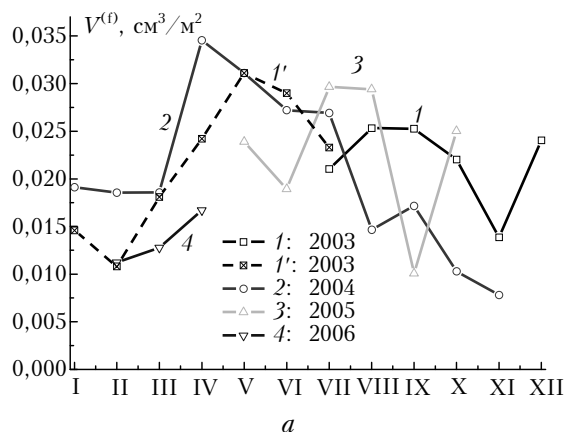


Рис. 2. Годовой ход среднемесячных значений объемной концентрации частиц субмикронной (а, б), грубодисперсной (в, г) фракций аэрозоля и суммарного ансамбля (д, е) в 2003–2006 (а, в, д) и 2011–2014 гг. (б, г, е)

2012 г., когда в результате резкого увеличения содержания субмикронного аэрозоля его концентрация в среднемесячных данных превысила концентрацию грубодисперсного аэрозоля в 1,14 раза.

### 2.1.1. Субмикронная фракция

Объемная концентрация субмикронного аэрозоля (см. рис. 2, *a, б*) достигает более высоких значений в весенне-летние сезоны в периоде наблюдений I и в летние месяцы в периоде II. В осенне-зимние сезоны наблюдается тенденция к спаду  $V^{(f)}$ . Если исключить летний пик на кривой  $V^{(f)}$  в 2012 г., то остальные значения укладываются в интервал от 0,008 до 0,035  $\text{см}^3/\text{м}^2$ , изменяясь почти в четыре раза.

Несмотря на отличия во временной изменчивости  $V^{(f)}$  в разные годы, можно выделить области с близкими среднемесячными значениями концентрации субмикронных частиц в различные годы, особенно заметные в результатах второго периода наблюдений. Близкие значения  $V^{(f)}$  наблюдаются на рис. 2, *б* в мае (2011, 2012, 2014 г.), июне (2011, 2013, 2014 г.) и августе (2011, 2012, 2013 г.). Интересно отметить, что все указанные значения  $V^{(f)}$  заключены в узком интервале 0,019–0,23  $\text{см}^3/\text{м}^2$ .

Наблюдаемая изменчивость в поведении параметра  $V^{(f)}$  находится в тесной связи с временным ходом АОТ  $\tau(\lambda)$  в коротковолновой области спектра. Коэффициент корреляции между временными рядами  $\tau(0,547)$  и  $V^{(f)}$  составляет около 0,98. В свою очередь, результаты анализа, проведенного в [24], показали наличие устойчивой взаимосвязи между спектральной прозрачностью атмосферы и синоптическими условиями.

На основе обзора синоптических процессов, наблюдавшихся в районе Томска в период с 1993 по 2004 г., в работе [25] сделан вывод о том, что синоптические условия не являются постоянными, что выражено в большом разбросе повторяемости различных синоптических ситуаций.

В связи со сказанным, в [25] отмечаются циркуляционные особенности 2003 г., когда повторяемость циклонических условий была минимальной и составила 3,8% от всех синоптических условий. Редкая повторяемость циклонов в рассматриваемый период не способствовала удалению аэрозольных частиц за счет вымывания осадками.

Также аномальным 2003 г. является по появлению антициклонов, повторяемость которых в апреле была максимальной (83,3%), а в январе, мае и сентябре составила около 71%. В свою очередь, условия антициклона могут быть фактором, благоприятным для накопления аэрозоля [24]. Высокое содержание субмикронного аэрозоля в мае и сентябре 2003 г., которое наблюдается на рис. 2, *a*, согласуется с отмеченными особенностями синоптических условий в 2003 г. Кроме того, в сентябре 2003 г. наблюдается локальное повышение концентрации грубодисперсных частиц и общего объемно-го содержания аэрозоля (рис. 2, *в, д*).

Важным фактором, влияющим на временную изменчивость концентрации аэрозоля в атмосфере, который становится существенным в первую очередь в весенне-летний период, является дымовой аэрозоль, образующийся при лесных пожарах, горении торфяников, сельскохозяйственных палах. Значительное задымление атмосферы Томска отмечалось в период 2003–2005 гг. и в 2012 г. [26–33], что находит отражение в поведении параметра  $V^{(f)}$  для этих периодов.

В [29] представлены обобщенные статистические данные о параметрах микроструктуры аэрозоля при наличии дымов в сравнении с фоновыми условиями по результатам обработки измерений АОТ, выполненных в Томске в период 1999–2008 гг. Некоторые результаты исследования динамики микроструктуры аэрозоля в условиях задымления атмосферы в Томске в летние сезоны 1999, 2003 и 2004 гг. по данным солнечной фотометрии приведены в [20, 27].

В частности, по данным [20] среднедневная концентрация субмикронного аэрозоля изменялась в течение августа 2003 г. почти в 9 раз — от минимального уровня 0,011  $\text{см}^3/\text{м}^2$  в отсутствие дыма до 0,098  $\text{см}^3/\text{м}^2$  при максимальном задымлении атмосферы. При этом в августе 2003 г. среднемесячное значение  $V^{(f)}$  составляло 0,025  $\text{см}^3/\text{м}^2$  (рис. 2, *a*).

Оценка вклада дымового аэрозоля в фоновую составляющую не входила в задачи проводимого исследования. Однако для рассмотренного примера исключение дымовых ситуаций при усреднении  $V^{(f)}$  в течение августа 2003 г. дает почти вдвое меньшую величину 0,013  $\text{см}^3/\text{м}^2$ , близкую к уровню августа 2004 г. Как видно из рис. 2, *a*, до указанного уровня кривая 1 монотонно опустилась к ноябрю 2003 г.

При задымлении атмосферы объемная концентрация грубодисперсного аэрозоля также увеличивается, хотя и с меньшей скоростью [20]. В результате субмикронная фракция аэрозоля в условиях задымленной атмосферы становится доминирующей. Согласно [20] такое превышение для среднесуточных реализаций  $V^{(f)}$  и  $V^{(c)}$  может достигать 2,7 раза. При переходе к среднедневным данным соотношение между объемными концентрациями субмикронной и грубодисперсной фракций дымового аэрозоля уменьшается до 2 раз. Наконец, в среднемесячных данных  $V^{(f)} = 0,025 \text{ см}^3/\text{м}^2$ ,  $V^{(c)} = 0,03 \text{ см}^3/\text{м}^2$  в августе 2003 г. вновь наблюдается преобладание частиц грубодисперсной фракции.

На рис. 3, *a* представлена временная изменчивость среднегодовых значений объемной концентрации субмикронных частиц  $V^{(f)}$ . Видно, что если исключить «провал» 2006 г., то, несмотря на сильные внутригодовые вариации  $V^{(f)}$ , среднегодовая концентрация субмикронных частиц в течение периода I будет заключена в узких границах 0,022–0,024  $\text{см}^3/\text{м}^2$ . На протяжении периода II среднегодовые значения  $V^{(f)}$  испытывают регулярные колебания в пределах 0,017–0,024  $\text{см}^3/\text{м}^2$ .

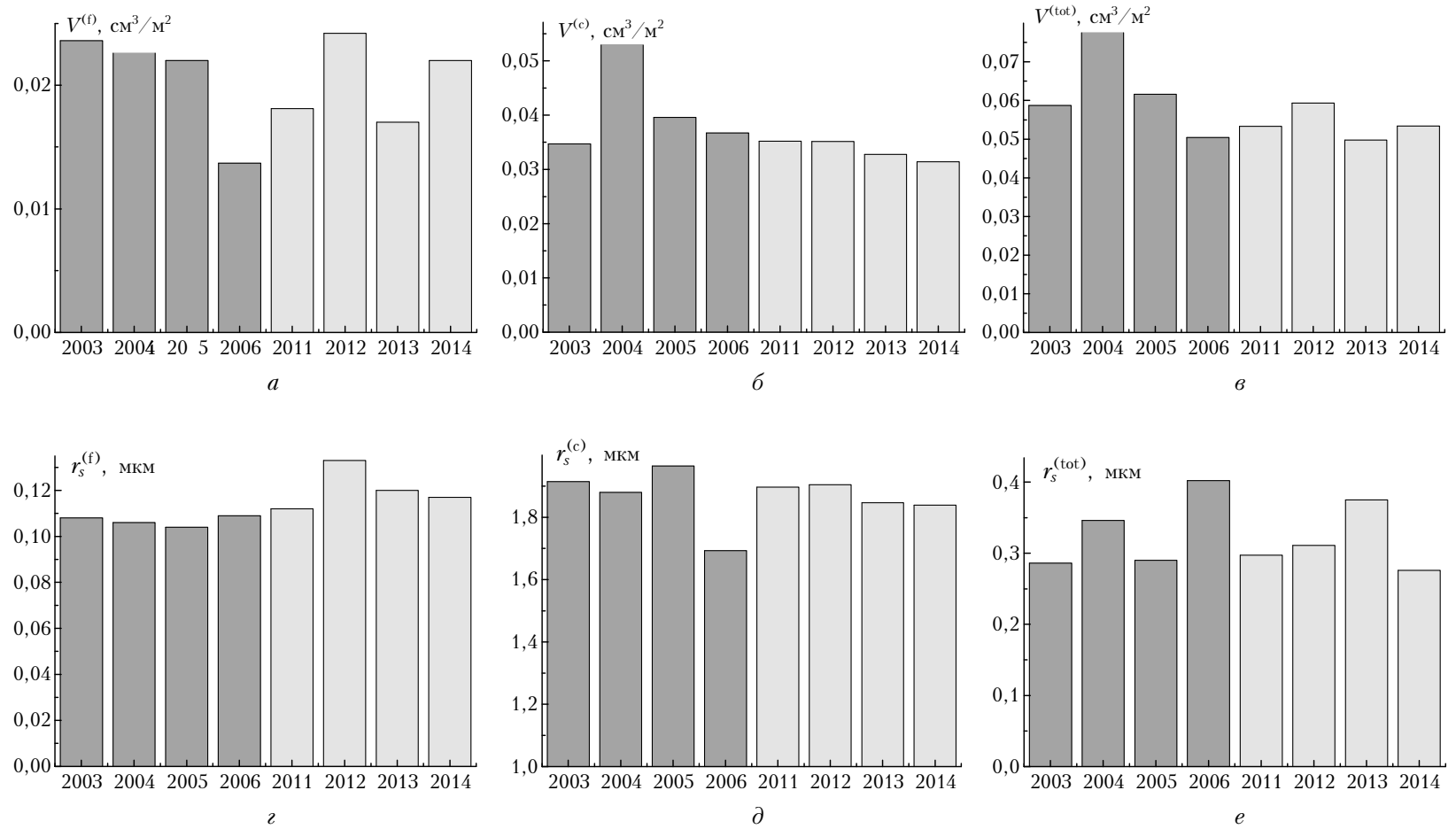


Рис. 3. Гистограммы распределения среднегодовых значений объемной концентрации (*a* – *в*) и среднего радиуса (*г* – *е*) частиц субмикронной (*a*, *г*), грубодисперсной (*б*, *д*) фракций аэрозоля и полного ансамбля (*в*, *е*)

### 2.1.2. Грубодисперсная фракция

На рис. 2, *в*, *з* представлена внутригодовая изменчивость объемной концентрации  $V^{(c)}$  грубодисперсных частиц. Между  $V^{(c)}$  и АОТ  $\tau(\lambda)$  наблюдается высокая корреляция в ИК-диапазоне. Коэффициент корреляции между  $V^{(c)}$  и  $\tau(2,203)$  составляет 0,96.

Особенностью временной зависимости параметра  $V^{(c)}$  в периоде I наблюдений является квазимоноотонное уменьшение  $V^{(c)}$  в течение второго полугодия до общего для всех кривых минимального уровня  $0,021 \text{ см}^3/\text{м}^2$ . Большие ошибки в оценке концентрации грубодисперсных частиц, обусловленные ограниченностью спектрального диапазона измерений АОТ  $\tau(\lambda)$  в первой половине 2003 г. ( $\lambda_{\text{max}} = 1,02 \text{ мкм}$ ), не позволили корректно восстановить временную зависимость  $V^{(c)}$  в указанный период.

Ограниченный объем наблюдений в течение первого полугодия не дает возможности однозначно выделить общие для этого периода тенденции во временной изменчивости  $V^{(c)}$ . Единственная кривая, которая определена практически на всем годовом интервале, относится к данным 2004 г. Ее отличают высокий уровень в первом полугодии, в целом превышающий среднемесячные значения  $V^{(c)}$ , полученные за все время наблюдений. В феврале 2004 г. достигнут абсолютный максимум среднемесячных значений  $V^{(c)} = 0,077 \text{ см}^3/\text{м}^2$ . Следствием этого явилось достижение максимума среднегодовых значений  $V^{(c)}$  в 2004 г. (рис. 3, *б*).

Более низкие среднемесячные значения  $V^{(c)}$ , полученные по ограниченному массиву измерений в феврале—апреле 2006 г., тем не менее не выделяют указанный год по уровню среднегодовых значений концентрации грубодисперсного аэрозоля, в отличие от среднегодовых значений концентрации  $V^{(f)}$  субмикронных частиц.

В течение второго периода наблюдений (см. рис. 2, *з*) изменчивость  $V^{(c)}$  носит квазипериодический характер и изменяется вдвое в диапазоне  $0,023\text{--}0,046 \text{ см}^3/\text{м}^2$ . На рис. 2, *з* прослеживается синхронность изменения параметра  $V^{(c)}$  в разные годы на отдельных временных отрезках. Дольше всего синхронность сохраняется между среднемесячными значениями  $V^{(c)}$  в 2012 и 2013 гг. (см. рис. 2, *з*, кривые 2, 3), с максимумами в марте и июне и минимумами в апреле. Кроме того, как и в первом периоде, объемная концентрация грубодисперсных частиц почти монотонно убывает во второй половине 2012 и 2013 гг.

Похожий характер имеет зависимость  $V^{(c)}$  в период с мая по сентябрь 2011 г. (см. рис. 2, *з*, кривая 1). Интересно отметить, что все три кривые в июне 2011—2013 гг. достигают максимальных значений, расположенных в близкой окрестности  $0,045 \text{ см}^3/\text{м}^2$ . Высокая степень близости между кривыми 1—3 сохраняется в мае, где к ним приближается кривая 4, отображающая временную изменчивость  $V^{(c)}$  в 2014 г., а также в июле.

Поведение кривой 4 (2014 г.) отличается от остальных зависимостей  $V^{(c)}$  во втором периоде. С марта по август 2014 г. зависимость  $V^{(c)}$  изменяется в противофазе по отношению к остальным данным. Минимуму кривых 2, 3 в апреле соответствует максимум кривой 4, и наоборот, минимуму  $V^{(c)}$  в июне 2014 г. соответствуют максимальные среднемесячные значения  $V^{(c)}$  в июне в остальные годы.

Обращаясь к среднегодовым значениям объемной концентрации грубодисперсных частиц, представленным на рис. 3, *б*, можно отметить, что в 2011—2012 гг. значения  $V^{(c)}$  сохраняются на одном уровне ( $0,035 \text{ см}^3/\text{м}^2$ ) и слегка понижаются к концу наблюдений ( $0,031 \text{ см}^3/\text{м}^2$ ), оставаясь близкими к данным, полученным в первом периоде (за исключением 2004 г.).

В поведении среднемесячных значений суммарной концентрации аэрозоля  $V^{(\text{tot})}$  (см. рис. 2, *д*, *е*) отражаются характерные временные особенности ее составляющих  $V^{(f)}$  и  $V^{(c)}$ . Например, наиболее высокие за весь период наблюдений значения  $V^{(\text{tot})}$  в первой половине 2004 г. (до  $0,1 \text{ см}^3/\text{м}^2$ ) являются следствием максимальной концентрации как субмикронного, так и грубодисперсного аэрозоля в указанный период. А квазимоноотонное убывание  $V^{(\text{tot})}$  начиная с мая 2004 г. с локальным максимумом в сентябре происходит синхронно с изменением концентраций  $V^{(f)}$  и  $V^{(c)}$ . К 2004 г. относится также достижение в ноябре абсолютного минимума ( $0,031 \text{ см}^3/\text{м}^2$ ) суммарной концентрации  $V^{(\text{tot})}$ .

Близкое расположение зависимостей  $V^{(\text{tot})}$  наблюдается во второй половине 2003—2004 гг., за исключением октября, что, в целом, отличается от поведения концентраций  $V^{(f)}$  и  $V^{(c)}$  в это же время. Особенностью изменения общей концентрации  $V^{(\text{tot})}$  в 2005 г. является ее преимущественное соответствие временному ходу концентрации грубодисперсных частиц (см. рис. 2, *в* и *д*, кривые 3).

Во втором периоде максимальные значения  $V^{(\text{tot})}$  составляют  $0,069 \text{ см}^3/\text{м}^2$  без учета данных 2012 г. и увеличиваются до  $0,086 \text{ см}^3/\text{м}^2$  с учетом пика концентрации субмикронных частиц в июне и июле 2012 г. Во временной изменчивости  $V^{(\text{tot})}$  прослеживается синхронность с вариациями концентраций субмикронных и грубодисперсных частиц.

На протяжении 2012 и 2013 гг. сохраняется синхронность во внутригодовом изменении суммарной концентрации  $V^{(\text{tot})}$ , которая была ранее отмечена в отношении концентрации грубодисперсного аэрозоля, с выраженным летним максимумом.

Изменение  $V^{(\text{tot})}$  в 2014 г. носит осциллирующий характер в противофазе с временным ходом в другие годы, что отражает влияние частиц грубодисперсной фракции. В апреле, июле, августе и октябре суммарная концентрация частиц достигает максимальных значений, которые близки по амплитуде. Наименьшие значения  $V^{(\text{tot})}$  принимает в июне и сентябре, а также в зимний период.

Из сравнения среднегодовых значений суммарной концентрации аэрозоля  $V^{(tot)}$ , представленных на рис. 3, *в*, с аналогичными зависимостями  $V^{(f)}$  и  $V^{(c)}$  следует, что объединение двух фракций частиц в единый ансамбль привело к сглаживанию осцилляций, наблюдаемых в первую очередь в концентрации микродисперсного аэрозоля. Если исключить экстремально высокий уровень  $V^{(tot)}$  в 2004 г., обусловленный высокой концентрацией грубодисперсных частиц, то остальные значения  $V^{(tot)}$  будут варьировать в диапазоне  $0,05-0,062 \text{ см}^3/\text{м}^2$ .

## 2.2. Изменчивость среднего радиуса частиц

На рис. 4 показан временной ход среднемесячных значений среднего по ансамблю радиуса частиц для субмикронной и грубодисперсной фракций, а также для их суммы. В течение первого периода наблюдений средний радиус субмикронных частиц  $r_s^{(f)}$  сохраняет более высокую стабильность по сравнению с их объемной концентрацией. Из рис. 4, *а* видно, что в отдельные годы среднемесячные значения

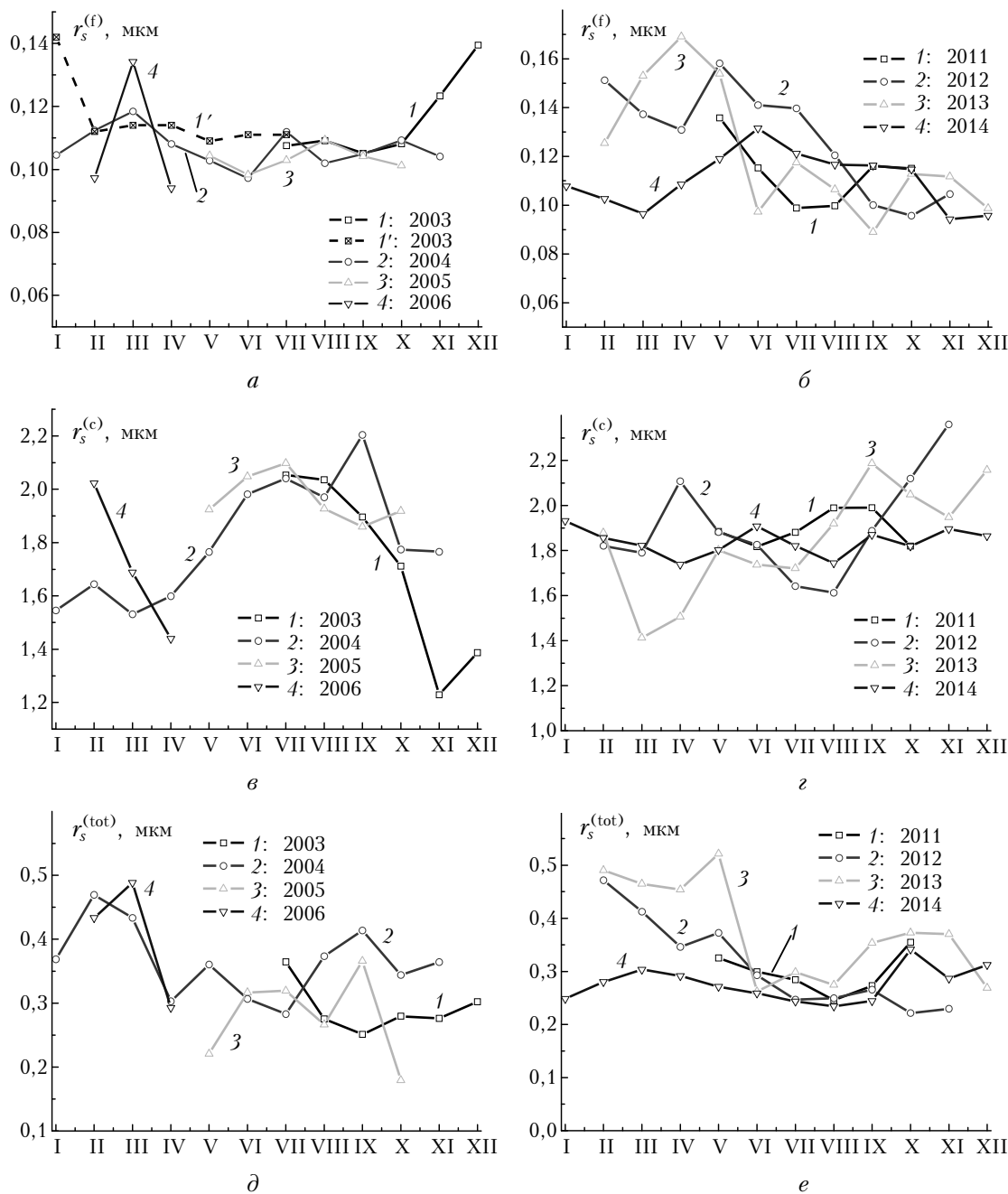


Рис. 4. Годовой ход среднемесячных значений среднего по ансамблю радиуса частиц субмикронной (*а*, *б*), грубодисперсной (*в*, *г*) фракций аэрозоля и суммарного ансамбля (*д*, *е*) в 2003–2006 (*а*, *в*, *д*) и 2011–2014 гг. (*б*, *г*, *е*)



параметра  $r_s^{(f)}$  частично перекрываются. Если исключить из рассмотрения точки с нетипичными (крайними) значениями  $r_s^{(f)}$ , то остальные значения параметра  $r_s^{(f)}$  попадают в узкий интервал 0,1–0,12 мкм.

Во втором периоде (см. рис. 4, б) в вариациях параметра  $r_s^{(f)}$  наблюдается большее разнообразие. Диапазон изменения  $r_s^{(f)}$  расширился за счет более высоких значений, которые наблюдаются в первой половине 2012–2013 гг. и достигают уровня 0,16–0,17 мкм. В целом, для всех кривых характерна тенденция к убыванию начиная с мая–июня до минимального уровня к концу года.

В отличие от почти монотонного убывания  $r_s^{(f)}$  с мая в 2012 г., в 2013 г. кривая  $r_s^{(f)}$  после глобального максимума в апреле в течение года испытывает колебания с локальными максимумами в июле и октябре. В первой половине 2014 г.  $r_s^{(f)}$  (кривая 4) плавно возрастает от минимального уровня (0,1 мкм) до максимума в июне (0,13 мкм) и затем также постепенно убывает до минимума к концу года.

В первом периоде наблюдений общей чертой в поведении среднего радиуса грубодисперсных частиц  $r_s^{(c)}$  (рис. 4, в) для всех кривых, за исключением 2006 г., является наличие устойчивого летнего максимума: в июле все значения  $r_s^{(c)}$  заключены в интервале 2,04–2,1 мкм. В осенне-зимний период средний радиус грубодисперсных частиц опускается до 1,4 мкм.

Во втором периоде наблюдений (см. рис. 4, з) диапазон изменения среднего радиуса  $r_s^{(c)}$  остается прежним. Однако внутригодовые особенности поведения  $r_s^{(c)}$  становятся более разнообразными. В частности, в весенне-летний период 2012 г. (кривая 2) наблюдается монотонное уменьшение среднего радиуса грубодисперсных частиц с 2,1 до 1,6 мкм, а примерно в тот же период 2013 г. (кривая 3) происходит изменение  $r_s^{(c)}$  в противоположном направлении – увеличение с 1,4 до 2,19 мкм. Этим отличается поведение среднего радиуса грубодисперсных частиц в указанные годы от синхронного изменения их объемной концентрации.

Зависимости  $r_s^{(c)}$  в 2011 и 2014 гг. плавно изменяются в более узких пределах 1,7–2,0 мкм и не достигают крайних значений. В 2014 г. вариации среднего радиуса  $r_s^{(c)}$  происходят в противофазе с поведением объемной концентрации  $V^{(c)}$ .

В поведении среднего радиуса полного ансамбля частиц на рис. 4, д, е отражается баланс между изменчивостью средних радиусов субмикронных и грубодисперсных частиц, с одной стороны, и вариациями соотношения между их объемными концентрациями, с другой стороны.

На рис. 3, г–е представлены среднегодовые значения параметров  $r_s^{(f)}$ ,  $r_s^{(c)}$  и  $r_s^{(tot)}$ . Наибольший уровень  $r_s^{(f)} = 0,133$  мкм достигнут в 2012 г., вследствие высоких среднемесячных значений  $r_s^{(f)}$  в весенне-летний период. При этом в 2012 г. среднегодовая объемная концентрация  $V^{(f)}$  была также мак-

симальной. Для остальных лет среднегодовые значения  $r_s^{(f)}$  принадлежат достаточно узкому интервалу 0,104–0,117 мкм. Что касается грубодисперсных частиц, то здесь из общего ряда выделяется 2006 г., в котором значение параметра  $r_s^{(c)}$  было нетипично низкое (1,69 мкм). Диапазон изменения  $r_s^{(c)}$  для остальных лет равен 1,84–1,96 мкм. В высоких значениях  $r_s^{(tot)}$  в 2006 и 2013 гг. нашло отражение более низкое в эти годы объемное содержание субмикронных частиц. В остальные годы параметр  $r_s^{(tot)}$  варьирует в пределах 0,28–0,37 мкм.

## Заключение

В результате обработки более 7 тыс. среднечасовых спектров АОТ были восстановлены долговременные ряды микроструктурных параметров аэрозоля: объемной концентрации, геометрического сечения и среднего радиуса частиц с разделением на субмикронную и грубодисперсную фракции. Спектральные зависимости АОТ получены в ИОА СО РАН по данным солнечной фотометрии в течение двух периодов – 2003–2006 и 2011–2014 гг. в Томске.

Анализ среднемесячных и среднегодовых зависимостей микроструктурных параметров аэрозоля показал, что среднемесячные значения варьируют в широких пределах как внутри каждого года, так и между разными годами. Имеются также различия в результатах, относящихся к двум основным периодам наблюдений. При переходе к среднегодовым значениям вариации параметров существенно сглаживаются.

Объемная концентрация полного ансамбля аэрозоля и двух его фракций достигает наибольших значений преимущественно в весенне-летний период и убывает к осенне-зимнему сезону. Основной вклад в суммарный объем частиц вносит грубодисперсная фракция аэрозоля. Увеличение относительного вклада субмикронного аэрозоля в суммарный объем происходит при поступлении в атмосферу дымового аэрозоля.

Среднегодовые значения объемной концентрации частиц субмикронных фракций варьируют без выраженного тренда в диапазоне 0,017–0,024 см<sup>3</sup>/м<sup>2</sup> (за исключением минимума 2006 г.), а грубодисперсной фракции – в диапазоне 0,031–0,04 см<sup>3</sup>/м<sup>2</sup> (исключая максимум 2004 г.).

Среднегодовые значения среднего по ансамблю радиуса субмикронных частиц плавно меняются в узких границах от 0,10 до 0,13 мкм. Для грубодисперсной фракции диапазон изменения среднего радиуса составляет 1,69–1,97 мкм.

В поведении среднего радиуса полного ансамбля частиц отражается баланс между изменчивостью средних радиусов субмикронных и грубодисперсных частиц и вариациями соотношения между их объемными концентрациями.

Автор выражает признательность С.М. Сакерину и Д.М. Кабанову за предоставленные для анализа экспериментальные данные.

1. WMO/GAW aerosol measurement procedures: Guidelines and recommendations. GAW Report N 153. Geneva: WMO, 2003.
2. Горчаков Г.И., Емиленко А.С., Свириденков М.А., Сидоров В.Н. Исследование долгопериодной временной изменчивости концентрации субмикронного аэрозоля // Оптика атмосф. и океана. 1998. Т. 11, № 6. С. 613–614.
3. Исаков А.А., Груздев А.Н., Тихонов А.В. О долгопериодных вариациях оптических и микрофизических параметров приземного аэрозоля // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18, № 5–6. С. 393–399.
4. Исаков А.А., Груздев А.Н. Долгопериодные вариации оптических и микрофизических параметров приземного аэрозоля на Звенигородской научной станции // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2009. Т. 45, № 2. С. 245–254.
5. Груздев А.Н., Исаков А.А. О природе долгопериодных вариаций массовой концентрации приземного аэрозоля // Оптика атмосф. и океана. 2015. Т. 28, № 9. С. 810–815; *Gruzdev A.N., Isakov A.A.* On the nature of long-period variations in mass concentration of near-ground aerosol // Atmos. Ocean. Opt. 2016. V. 29, N 1. P. 73–78.
6. *Kozlov V.S., Panchenko M.V., Tumakov A.G., Shmarginov V.P., Yaushcheva 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.
7. 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.
8. Козлов В.С., Панченко М.В., Яушева Е.П. Временная изменчивость содержания субмикронного аэрозоля и сажи в приземном слое атмосферы Западной Сибири // Оптика атмосф. и океана. 2007. Т. 20, № 12. С. 1082–1085.
9. 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 атмосф. и океана. 1994. Т. 7, № 11–12. С. 1504–1507.
10. 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 атмосф. и океана. 1995. Т. 8, № 9. С. 1272–1279.
11. Макиенко Э.В., Рахимов Р.Ф., Пхалагов Ю.А., Ужегов В.Н. Микрофизическая интерпретация аномальной спектральной зависимости аэрозольного ослабления излучения на приземной трассе // Оптика атмосф. и океана. 2003. Т. 16, № 12. С. 1102–1106.
12. Кабанов Д.М., Курбаналиев Т.Р., Рассказчикова Т.М., Сакерин С.М., Хуторова О.Г. Влияние синоптических факторов на вариации аэрозольной оптической толщи атмосферы в условиях Сибири // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 8. С. 665–674; *Kabanov D.M., Kurbanaliev T.R., Rasskazchikova T.M., Sakerin S.M., Khutorova O.G.* The influence of synoptic factors of variations of atmospheric aerosol optical depth under Siberian conditions // Atmos. Ocean. Opt. 2011. V. 24, N 6. 543–553.
13. URL: <http://www.cimel.fr/>
14. *Holben B.N., Eck T.F., Slutsker I., Tanre D., Buis J.P., Setzer A., Vermote E., Reagan J.A., Kaufman Y.J., Nakadjima 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.
15. URL: <http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>
16. Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Ростов А.П., Турчинович С.А., Турчинович Ю.С. Система сетевого мониторинга радиационно-активных компонентов атмосферы. Часть I. Солнечные фотометры // Оптика атмосф. и океана. 2004. Т. 17, № 4. С. 354–360.
17. Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Ростов А.П., Турчинович С.А., Князев В.В. Солнечные фотометры для измерений спектральной прозрачности атмосферы в стационарных и мобильных условиях // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 12. С. 1112–1117; *Sakerin S.M., Kabanov D.M., Rostov A.P., Turchinovich S.A., Knyazev V.V.* Sun photometers for measuring spectral air transparency in stationary and mobile conditions // Atmos. Ocean. Opt. 2013. V. 26, N 4. P. 352–356.
18. Веретенников В.В. Обратные задачи солнечной фотометрии для интегральных аэрозольных распределений. I. Теория и численный эксперимент в субмикронной области размеров частиц // Оптика атмосф. и океана. 2006. Т. 19, № 4. С. 294–300.
19. Веретенников В.В., Меньщикова С.С. Особенности восстановления микроструктурных параметров аэрозоля из измерений аэрозольной оптической толщины. Часть I. Методика решения обратной задачи // Оптика атмосф. 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.
20. Веретенников В.В., Меньщикова С.С. Особенности восстановления микроструктурных параметров аэрозоля из измерений аэрозольной оптической толщины. Часть II. Результаты обращения // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 4. С. 313–324; *Veretennikov V.V., Men'shchikova S.S.* Features of retrieval of microstructural parameters of aerosol from measurements of aerosol optical depth. Part II. Inversion results // Atmos. Ocean. Opt. 2013. V. 26, N 6. P. 480–491.
21. Веретенников В.В., Меньщикова С.С. Годовой цикл в изменчивости микроструктурных параметров аэрозоля по данным солнечной фотометрии // Оптика атмосф. и океана. 2014. Т. 27, № 12. С. 1035–1041; *Veretennikov V.V., Men'shchikova S.S.* Annual cycle in the variability of aerosol microstructure parameters according to solar photometry data // Atmos. Ocean. Opt. 2015. V. 28, N 2. P. 126–132.
22. Веретенников В.В., Меньщикова С.С. Восстановление микроструктуры аэрозоля из измерений ослабления света в атмосфере при ограничении спектрального диапазона // Оптика атмосф. и океана. 2015. Т. 28, № 10. С. 883–891; *Veretennikov V.V., Men'shchikova S.S.* Reconstruction of the aerosol microstructure from measurements of light extinction in the atmosphere under restriction of the spectral range // Atmos. Ocean. Opt. 2016. V. 29, N 1. P. 18–26.
23. *Veretennikov V.V.* Estimation of microstructure parameters of the coarsely dispersed aerosol based on their statistical relationships with spectral measurements of

- the aerosol optical thickness // Proc. SPIE. 2016. V. 10035. P. 1003541. DOI: 10.1117/12.2249140.
24. 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.
  25. 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.
  26. Козлов В.С., Панченко М.В., Яушева Е.П. Относительное содержание сажи в субмикронном аэрозоле как индикатор влияния дымов удаленных лесных пожаров // Оптика атмосфер. и океана. 2006. Т. 19, № 6. С. 484–491.
  27. Макиенко Э.В., Кабанов Д.М., Рахимов Р.Ф., Сакерин С.М. Изменения микроструктуры аэрозоля под воздействием дымов по результатам обращения данных спектральных оптических измерений // Оптика атмосфер. и океана. 2007. Т. 20, № 4. С. 321–327.
  28. Сакерин С.М., Горбаренко Е.В., Кабанов Д.М. Особенности многолетней изменчивости аэрозольной оптической толщины атмосферы и оценки влияния различных факторов // Оптика атмосфер. и океана. 2008. Т. 21, № 7. С. 625–631.
  29. Сакерин С.М., Веретенников В.В., Журавлева Т.Б., Кабанов Д.М., Насртдинов И.М. Сравнительный анализ радиационных характеристик аэрозоля в ситуациях дымов пожаров и обычных условиях // Оптика атмосфер. и океана. 2010. Т. 23, № 6. С. 451–461.
  30. Бизин М.А., Попова С.А., Чанкина О.В., Макаров В.И., Шинкоренко М.П., Смоляков Б.С., Куценогий К.П. Влияние лесных пожаров на массовую концентрацию, дисперсный и химический состав атмосферного аэрозоля в региональном масштабе // Оптика атмосфер. и океана. 2013. Т. 26, № 6. С. 484–489.
  31. Kozlov V.S., Yausheva E.P., Terpugova S.A., Panchenko M.V., Chernov D.G., Shmargunov V.P. Optical-microphysical properties of smoke haze from Siberia forest fires in summer 2012 // Int. J. Remote Sens. 2014. V. 35, N 15. P. 5722–5741.
  32. Gorchakov G.I., Sitnov S.A., Sviridenkov M.A., Semoutnikova E.G., Emilenko A.S., Isakov A.A., Kopeikin V.M., Karov A.V., Gorchakova I.A., Verichev K.S., Kurbatov G.A., Ponomareva T.Ya. Satellite and ground-based monitoring of smoke in the atmosphere during the summer wildfires in European Russia in 2010 and Siberia in 2012 // Int. J. Remote Sens. 2014. V. 35, N 15. P. 5698–5721.
  33. Рахимов Р.Ф., Козлов В.С., Панченко М.В., Тумаков А.Г., Шмаргунов В.П. Свойства атмосферного аэрозоля в дымовых шлейфах лесных пожаров по данным спектронефелометрических измерений // Оптика атмосфер. и океана. 2014. Т. 27, № 2. С. 126–133; Rakhimov R.F., Kozlov V.S., Panchenko M.V., Tumafov A.G., Shmargunov V.P. Properties of atmospheric aerosol in smoke plumes from forest fires according to spectronephelometer measurements // Atmos. Ocean. Opt. 2014. V. 27, N 3. P. 275–282.

**V.V. Veretennikov. Interannual variability of aerosol microstructure parameters retrieved from the data of solar photometry in Tomsk.**

Results of investigations of the time variability of aerosol microstructure parameters retrieved by inversion of spectral measurements of the aerosol optical depth (AOD) are presented. The input data were obtained at the IAO SB RAS using solar photometers of SP type in the observation periods 2003–2006 and 2011–2014. During the first period of measurement, the AOD was measured at 13 wavelengths in the range 0.37–4  $\mu\text{m}$ . In the second observation period, the upper limit of the spectral range of measurements was 2.14  $\mu\text{m}$ . The total volume of the data processed included over 7000 hourly average spectra. The geometric aerosol cross section, volume concentration, and average particle radius are analyzed.