

## ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ ОПТИКИ АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА

УДК 551.501.793

# Годовой цикл в изменчивости микроструктурных параметров аэрозоля по данным солнечной фотометрии

В.В. Веретенников, С.С. Меньщикова\*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 22.07.2014 г.

Рассмотрены особенности годового хода микроструктурных параметров аэрозоля, восстановленных путем решения обратной задачи солнечной фотометрии. В качестве исходных данных для обращения были взяты среднечасовые измерения аэрозольной оптической толщины (АОТ) в спектральном диапазоне 0,37–4 мкм, выполненные в Томске. Обработка экспериментальных спектров проводилась с использованием алгоритма, разработанного на основе метода интегральных распределений. По восстановленным интегральным распределениям были определены такие микроструктурные параметры, как объемная концентрация, геометрическое сечение и средний радиус частиц. В частности, установлено, что объемная концентрация аэрозоля минимальна в ноябре и максимальна в апреле. Также исследованы статистические связи между АОТ и восстановленными микроструктурными параметрами.

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

### Введение

Применение техники измерения спектральной прозрачности атмосферы в сочетании с методами решения обратных задач уже давно стало эффективным инструментом при изучении микрофизических свойств атмосферного аэрозоля [1–4].

С целью получения информации о параметрах микроструктуры аэрозоля в вертикальном столбе атмосферы по данным солнечной спектрометрии авторами [5] создан программный комплекс для решения обратной задачи на основе метода интегральных распределений [6]. В качестве микроструктурных параметров, восстанавливаемых при обращении аэрозольной оптической толщиной (АОТ), рассматриваются проинтегрированные по всей толще атмосферы объемная концентрация, геометрическое сечение и средний радиус аэрозольных частиц. Также предусмотрена возможность раздельной оценки указанных параметров для субмикронной и грубодисперсной фракций аэрозоля.

С использованием разработанного программного комплекса в работе [7] исследована изменчивость параметров микроструктуры аэрозоля в июле–августе 2003 г. Исходными данными для анализа служили измерения АОТ в спектральном диапазоне 0,37–4 мкм, выполненные в ИОА СО РАН С.М. Саке-риным и Д.М. Кабановым с помощью солнечного

фотометра. Анализ полученных данных показал, что полная объемная концентрация аэрозольных частиц составляет в среднем за период наблюдений около  $0,06 \text{ см}^3/\text{м}^2$  при среднем радиусе 0,27 мкм. При этом в большинстве реализаций основной вклад в суммарный объем аэрозоля вносит грубодисперсная фракция частиц при среднем значении ее концентрации, равном  $0,036 \text{ см}^3/\text{м}^2$ , что в 1,44 раза превышает аналогичный параметр для субмикронного аэрозоля. Восстановленные средние радиусы частиц субмикронной и грубодисперсной фракций равны соответственно 0,1 и 2,05 мкм. Также были рассмотрены корреляционные связи между АОТ и микроструктурными параметрами аэрозоля. В частности, установлено, что корреляция между объемной концентрацией отдельных фракций и АОТ имеет выраженную спектральную зависимость.

Представляет интерес вопрос, в какой степени микроструктурные свойства аэрозоля, установленные для летних месяцев, будут трансформироваться на протяжении года. О внутригодовой изменчивости аэрозольного ослабления оптического излучения в атмосфере, которая обусловлена трансформацией микрофизического состава аэрозоля, свидетельствуют многочисленные экспериментальные данные, полученные с использованием методов солнечной фотометрии [8–11], спутниковых измерений [12, 13] и наземных измерений на горизонтальных трассах [14–20].

Развивая исследования [7], в настоящей статье рассмотрим особенности годового хода микроструктурных параметров аэрозоля в Томске, которые выявлены

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

на той же экспериментальной и методической базе в результате решения обратной задачи солнечной спектрофотометрии.

## 1. Исходные данные и метод решения

В качестве исходных данных для решения задачи рассматривались спектральные измерения АОТ  $\tau(\lambda)$  на 13 длинах волн в диапазоне 0,37–4 мкм, полученные на той же площадке, что и в [7], с помощью солнечного спектрофотометра в период с сентября 2003 г. по июнь 2004 г. в ИОА СО РАН С.М. Сакериным и Д.М. Кабановым. При решении обратной задачи экспериментальные спектры предварительно усреднялись на часовом интервале. Общий объем обработанных спектров на протяжении года составил в сумме около 1250 усредненных реализаций.

На рис. 1 представлена гистограмма распределения числа среднечасовых спектров за период с июля 2003 г. по июнь 2004 г., использованных для обращения. Максимальное число реализаций получено в летние месяцы (август 2003 г., июнь 2004 г.), а минимальное – в декабре 2003 г.

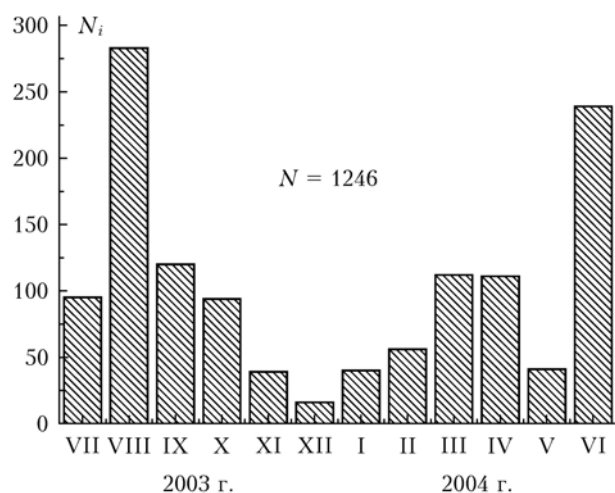


Рис. 1. Гистограмма распределения количества среднечасовых спектров АОТ, полученных в течение годового цикла

В качестве примера на рис. 2 приведены годовой ход среднечасовых значений АОТ и их стандартное отклонение (SD) в спектральном диапазоне 0,371–0,871 мкм. Видно, что на всех длинах волн максимальная прозрачность атмосферы наблюдалась в ноябре ( $\langle \tau(0,5) \rangle = 0,1$ ). Начиная с ноября происходит монотонный рост замутненности атмосферы и достигает максимума к апрелю ( $\langle \tau(0,5) \rangle = 0,26$ ). Затем ближе к летним месяцам прозрачность атмосферы вновь повышается. Примечательно, что средние значения АОТ в начале и конце интервала наблюдений оказались достаточно близки между собой.

Внутримесячная изменчивость АОТ, определяемая стандартным отклонением для каждого месяца, характеризуется невысоким уровнем в холодное время года (с ноября по март). Наибольшие значения стандартного отклонения наблюдаются в августе 2003 г.

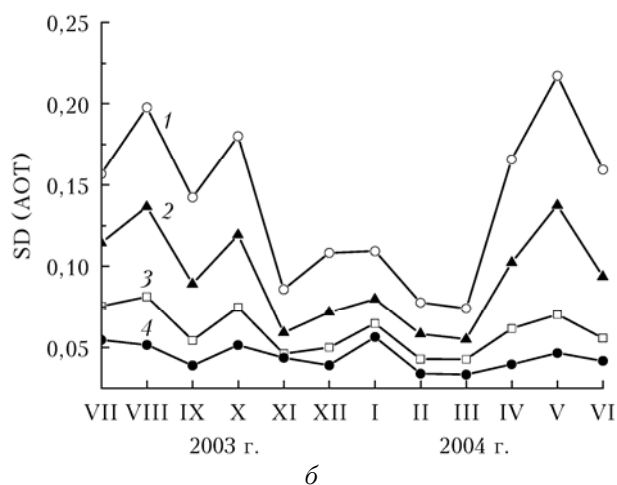
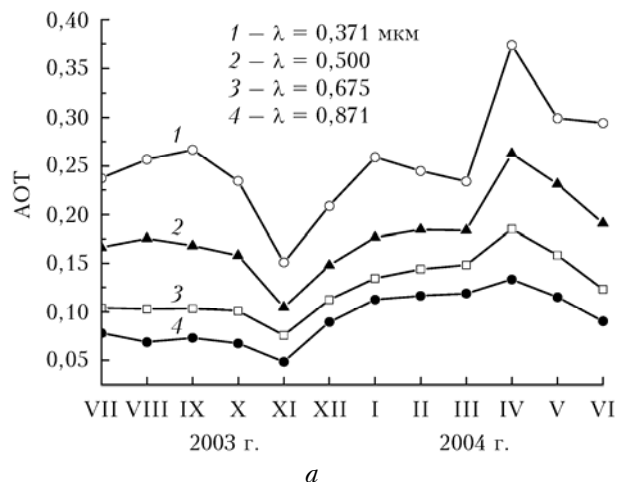


Рис. 2. Временная изменчивость среднечасовых значений АОТ (а) и их стандартных отклонений (б) для различных длин волн

и мае 2004 г. и составляют 75–79% от среднечасовых значений АОТ в зависимости от длины волны. Отмеченные тенденции в целом сохраняются также и в ИК-диапазоне спектра.

Решение обратной задачи осуществлялось с помощью алгоритма [5], разработанного на основе метода интегральных распределений. В качестве искомой функции в алгоритме [5] рассматривается суммарное геометрическое сечение частиц  $S(r)$  радиусом, большим или равным  $r$ , которые содержатся в вертикальном столбе атмосферы единичной площади. Использование интегральных аэрозольных распределений частиц по размерам для описания микроструктуры аэрозоля позволяет восстанавливать приближенное устойчивое решение обратной задачи путем минимизации функционала невязки на множестве монотонных ограниченных функций без каких-либо дополнительных ограничений на искомое решение и привлечения специальных регуляризующих процедур.

По восстановленной при обращении АОТ функции  $S(r)$  легко рассчитываются такие интегральные параметры микроструктуры аэрозоля, как объемная концентрация частиц  $V$  и их средний радиус

$r_s = (3/4)V/S$ , где  $S$  – суммарное геометрическое сечение частиц. Алгоритм удобен при массовой обработке больших объемов экспериментальных данных и не требует от пользователя специальных знаний по решению обратных задач.

## 2. Результаты обращения

Перейдем к рассмотрению результатов решения обратной задачи. На рис. 3 представлено поведение среднемесячных значений функционала невязки по результатам обращения массива экспериментальных данных. Если исключить результаты с максимальной невязкой (декабрь 2003 г. и май 2004 г.), то для остальных случаев диапазон изменения средней невязки составляет от 0,003 до 0,007.

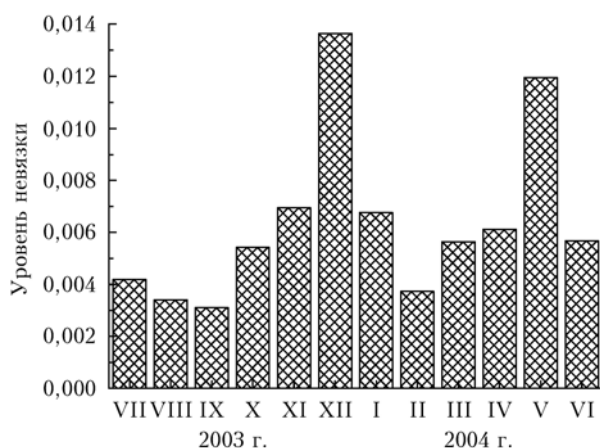


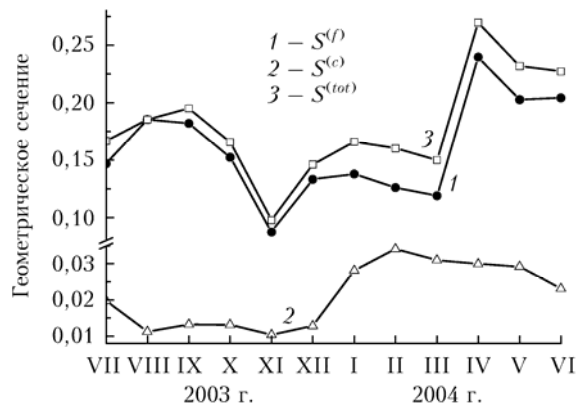
Рис. 3. Среднемесячный уровень невязки по результатам решения обратной задачи на протяжении годового цикла

### 2.1. Анализ временной изменчивости геометрического сечения

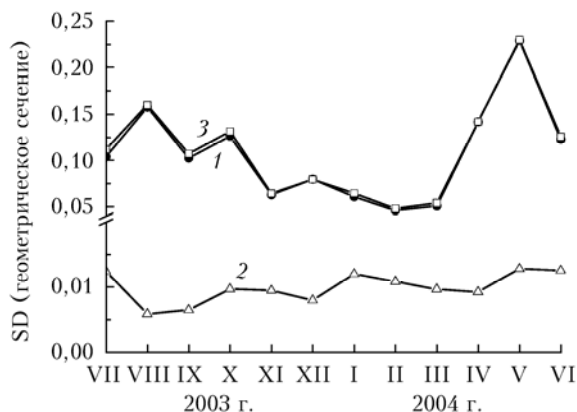
На рис. 4, *a* представлены результаты восстановления геометрического сечения  $S^{(tot)}$  с разделением на субмикронную  $S^{(f)}$  (кривая 1) и грубодисперсную  $S^{(c)}$  (кривая 2) фракции, усредненные для каждого месяца. Граница между фракциями аэрозоля считалась фиксированной и равной, как и в работе [7], 0,55 мкм.

Из сравнения зависимостей, представленных на рис. 2, *a* и 4, *a*, следует, что геометрическое сечение частиц субмикронной фракции  $S^{(f)}$  изменяется синхронно с АОТ в УФ и видимой областях спектра. Параметр  $S^{(f)}$  принимает минимальное значение в ноябре 2003 г. (0,09), а максимальное – в апреле 2004 г. (0,24), изменяясь в течение года в 2,5 раза.

Характер внутригодовой изменчивости параметров  $S^{(f)}$  и  $S^{(c)}$  различен. В августе–ноябре 2003 г. параметр  $S^{(c)}$  принимает низкие значения (0,01–0,013), затем возрастает до 0,034 к февралю 2004 г. и сохраняет стабильный повышенный уровень до летнего сезона 2004 г. Наблюдаемая в течение года динамика параметра  $S^{(c)}$  демонстрирует сходство с временной зависимостью АОТ в ИК-диапазоне. Диапазон изменения сечения грубодисперсных частиц в течение года составляет 3,4 раза.



*a*



*b*

Рис. 4. Годовой ход среднемесячных значений геометрического сечения  $S$  (*a*) и их стандартных отклонений (*b*): 1 – субмикронная фракция; 2 – грубодисперсная фракция; 3 – полный ансамбль

Из представленных на рис. 4 данных видно, что основной вклад в суммарное геометрическое сечение частиц  $S^{(tot)}$  вносит субмикронный аэрозоль. По этой причине наблюдается подобие во временном ходе параметров  $S^{(tot)}$  и  $S^{(f)}$  (рис. 4, *a*). Отношение сечений частиц двух фракций  $S^{(f)}/S^{(c)}$  максимально в августе (16,8) и минимально (3,7) в феврале–марте.

Параметр  $S^{(f)}$  играет также ведущую роль во внутримесячной изменчивости суммарного геометрического сечения частиц в течение года. Как следует из рис. 4, *b*, минимальное значение стандартного отклонения  $S^{(f)}$  достигается в феврале и составляет 36%, а наибольшие значения наблюдаются в августе 2003 г. (86%) и мае 2004 г. (113%), что хорошо согласуется с временной изменчивостью АОТ в УФ и видимом диапазонах спектра.

### 2.2. Анализ временной изменчивости объемной концентрации

Перейдем к анализу результатов восстановления объемной концентрации частиц  $V$ , представленных на рис. 5.

Как и для геометрического сечения, все параметры  $V^{(f)}$ ,  $V^{(c)}$  и  $V^{(tot)}$  принимают минимальные значения в ноябре, а максимальные – в феврале

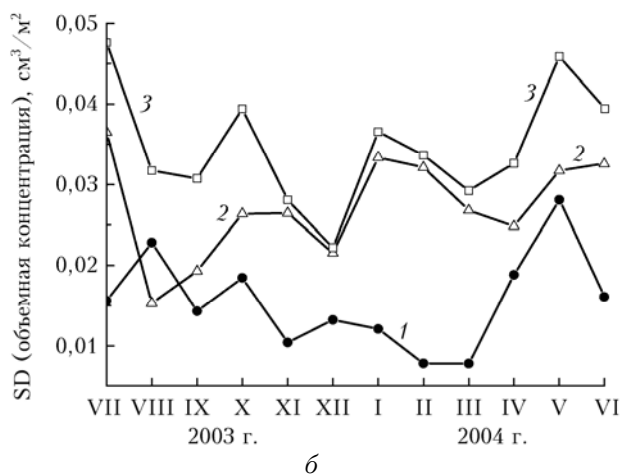
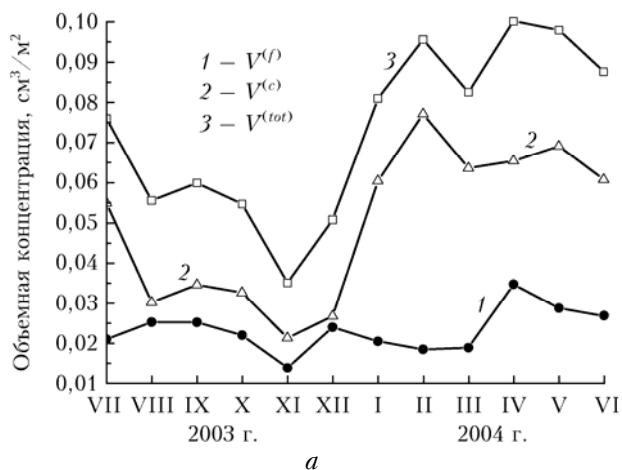


Рис. 5. Годовой ход среднемесячных значений объемной концентрации  $V$  (а) и их стандартных отклонений (б): 1 – субмикронная фракция; 2 – грубодисперсная фракция; 3 – полный ансамбль

( $V^{(c)}$ ) и апреле ( $V^{(f)}$  и  $V^{(tot)}$ ). Объемная концентрация субмикронного аэрозоля  $V^{(f)}$  изменяется в течение года в 2,5 раза, от 0,014 до 0,035  $\text{см}^3/\text{м}^2$ , а концентрация грубодисперсного аэрозоля  $V^{(c)}$  – в 3,7 раза, от 0,021 до 0,077  $\text{см}^3/\text{м}^2$ , что соответствует относительной изменчивости геометрического сечения частиц тех же фракций.

В отличие от геометрического сечения, в суммарном объеме аэрозоля доминируют частицы грубодисперсной фракции. Исключение составляет декабрь, когда указанное преобладание практически исчезает. Кроме того, при детальном рассмотрении среднечасовых зависимостей можно обнаружить отдельные ситуации, когда вклад субмикронных частиц в суммарном объеме становится одного порядка (май–июнь 2004 г.) и даже преобладает (август 2003 г. [7]) по отношению к вкладу частиц грубодисперсной фракции. Как показано в работе [7], повышенное содержание субмикронных частиц в августе 2003 г. связано с поступлением в атмосферу дымового аэрозоля. Отношение объемных концентраций частиц двух фракций  $V^{(c)}/V^{(f)}$  изменяется от 1,12 (декабрь 2003 г.) до 4,3 (февраль 2004 г.). На рис. 5, а можно также отметить сходство во времен-

ных зависимостях микроструктурных параметров  $V^{(tot)}$  и  $V^{(c)}$ .

Рис. 5, б дает представление о внутримесячной изменчивости объемной концентрации частиц, характеризуемой стандартным отклонением параметров  $V^{(f)}$ ,  $V^{(c)}$  и  $V^{(tot)}$ . Из рис. 5, б видно, что в холодное время года, с ноября 2003 г. по март 2004 г., изменчивость объемной концентрации частиц обусловлена преимущественно грубодисперсной фракцией. В остальной период роль частиц микродисперсной фракции во внутримесячной динамике увеличивается, а в августе 2003 г. становится даже преобладающей.

### 2.3. Анализ временной изменчивости среднего радиуса частиц

На рис. 6 изображено поведение среднего радиуса частиц на протяжении года для отдельных фракций и полного ансамбля с усреднением по каждому месяцу. В отличие от других микроструктурных параметров средний радиус частиц является относительно стабильной величиной. В течение года параметр  $r_s^{(f)}$  незначительно меняется в окрестности

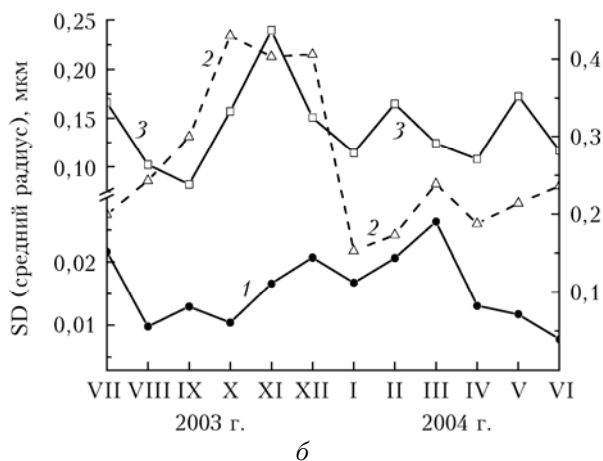
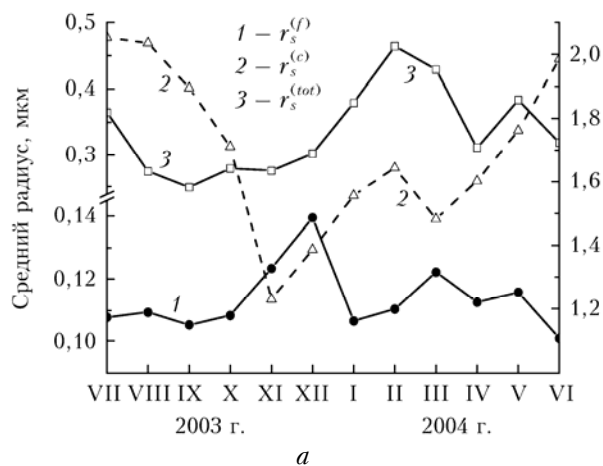


Рис. 6. Годовой ход среднемесячных значений среднего по ансамблю радиуса частиц (а) и их стандартных отклонений (б): 1 – субмикронная фракция (левая шкала); 2 – грубодисперсная фракция (правая шкала); 3 – полный ансамбль (левая шкала)

0,11 мкм (кривая 1 на рис. 6, а, левая шкала) со слабым максимумом, равным 0,14 мкм, в декабре. Внутримесячная изменчивость параметра  $r_s^{(f)}$  также невелика; стандартное отклонение составляет в среднем около 0,016 мкм.

В поведении среднего радиуса частиц грубодисперсной фракции  $r_s^{(c)}$  (кривая 2 на рис. 6, а, правая шкала) можно проследить годовой цикл с глобальным минимумом, равным 1,22 мкм, который достигается в ноябре, т.е. в условиях максимальной прозрачности атмосферы. В этот же период были отмечены минимальные значения геометрического сечения и объемной концентрации аэрозольных частиц. В летний сезон наблюдается укрупнение частиц грубодисперсной фракции. При этом максимальное значение  $r_s^{(c)}$  достигает 2,05 мкм. Стандартное отклонение параметра  $r_s^{(c)}$  в течение года изменяется в диапазоне от 0,15 до 0,43 мкм.

Средний радиус частиц полного ансамбля  $r_s^{(tot)}$  (кривая 3 на рис. 6, а, левая шкала) в течение года изменяется в диапазоне от 0,25 до 0,46 мкм. На кривой 3 можно выделить область монотонного роста параметра  $r_s^{(tot)}$  с сентября 2003 г. по февраль 2004 г. Наблюдаемое увеличение параметра  $r_s^{(tot)}$  обусловлено не только увеличением среднего радиуса грубодисперсных частиц  $r_s^{(c)}$  (кривая 2), но также повышением объемной доли частиц этой фракции, которая достигает 80% к февралю 2004 г. (см. рис. 5, а). Стандартное отклонение среднемесячных значений  $r_s^{(tot)}$  в течение года колеблется около среднего значения 0,14 мкм.

### 3. Корреляционные связи

Как показали результаты исследования статистических связей между измерениями АОТ в летний период 2003 г. и параметрами микроструктуры аэрозоля, восстановленными при решении обратной задачи [7], существует высокая корреляция между АОТ  $\tau(0,55)$  на длине волны  $\lambda = 0,55$  мкм и объемной концентрацией субмикронного аэрозоля  $V^{(f)}$ , коэффициент корреляции  $\rho = 0,97$ . С увеличением длины волны коэффициент корреляции между  $\tau(0,55)$  и  $V^{(f)}$  уменьшается и при  $\lambda = 1,052$  мкм равен 0,72. Для грубодисперсного аэрозоля наблюдается противоположная тенденция. При изменении  $\lambda$  от 0,55 до 1,052 мкм между АОТ  $\tau(\lambda)$  и параметром  $V^{(c)}$  отмечено увеличение коэффициента корреляции от 0,43 до 0,73.

Обобщая результаты [7], рассмотрим изменчивость корреляционных связей между измерениями АОТ и микроструктурными параметрами аэрозоля в течение года. На рис. 7 представлена временная зависимость коэффициента корреляции  $\rho$  между АОТ  $\tau(\lambda)$  для разных длин волн и параметрами  $V^{(f)}$  (а),  $V^{(c)}$  (б) и  $V^{(tot)}$  (в).

Как видно из рис. 7, а, корреляция между объемной концентрацией субмикронных частиц  $V^{(f)}$  и АОТ  $\tau(\lambda)$  в УФ и видимой областях спектра сохраняется на высоком уровне в течение всего года, не опускаясь ниже 0,88. При переходе в ИК-диапазон

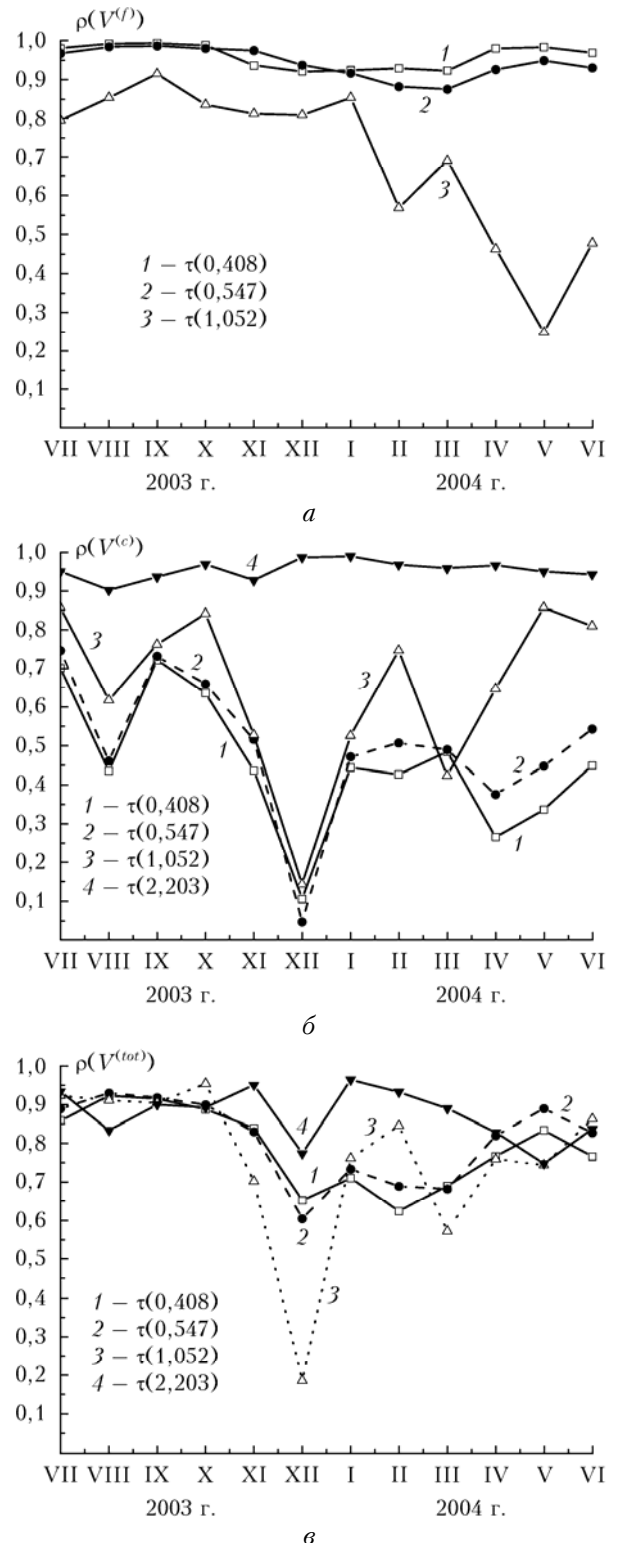


Рис. 7. Изменчивость в течение года коэффициента корреляции между АОТ  $\tau(\lambda)$  для различных длин волн и объемной концентрацией аэрозоля: а – субмикронная фракция; б – грубодисперсная фракция; в – полный ансамбль

(кривая 3) наблюдаемая картина меняется. В первой половине рассматриваемого периода коэффициент корреляции между  $\tau(1,052)$  и  $V^{(f)}$  достаточно

высокий и составляет более 0,8. Начиная с января 2004 г. эта корреляционная связь значительно ослабевает, опускаясь в мае до 0,25.

Отметим характерные черты в поведении коэффициента корреляции между объемной концентрацией грубодисперсных частиц  $V^{(c)}$  и АОТ  $\tau(\lambda)$  (рис. 7, б). Общей тенденцией для всех кривых является повышение  $\rho$  при увеличении длины волны. Причем, если в УФ и видимом диапазонах корреляция  $\tau(\lambda)$  с  $V^{(c)}$  ниже, чем с  $V^{(f)}$ , то при  $\lambda = 2,203$  мкм значение  $\rho$  составляет более 0,9 в течение всего года. При меньших длинах волн значения коэффициента корреляции, во-первых, опускаются заметно ниже, а во-вторых, испытывают в течение года «квазисинхронные» колебания с выраженным провалом в декабре 2003 г. Последнее, возможно, связано с недостаточной статистической обеспеченностью данных в указанный период (всего 16 среднесезонных спектров, для которых получены согласованные по невязке результаты решения обратной задачи). Также определенную роль сыграл тот факт, что в декабре было минимальным относительное содержание грубодисперсных частиц в суммарном объеме аэрозоля (см. рис. 5, а). Если исключить декабрьский минимум, то для УФ и видимого диапазонов размах таких колебаний составляет от 0,27 до 0,75.

В заключение рассмотрим особенности временной зависимости коэффициента корреляции между АОТ  $\tau(\lambda)$  и суммарной концентрацией аэрозоля  $V^{(tot)}$ , представленной на рис. 7, в. Так же как и в случае корреляции между  $\tau(\lambda)$  и параметром  $V^{(c)}$ , на кривых, изображенных на рис. 7, в, в течение года наблюдаются нерегулярные колебания, с минимумом в декабре 2003 г. Колебания на всех кривых, за исключением кривой 3, имеют близкую амплитуду. Наиболее высокие значения (0,75–0,96) получены для коэффициента корреляции  $\rho$  между суммарной концентрацией аэрозоля  $V^{(tot)}$  и АОТ  $\tau(\lambda)$  на длине волны  $\lambda = 2,203$  мкм (кривая 4).

При анализе корреляционных связей между АОТ  $\tau(\lambda)$  и средним радиусом частиц в работе [7] были получены невысокие значения  $\rho$  (менее 0,34) как для полного ансамбля частиц, так и для отдельных фракций. Переход к годовому циклу также не выявил увеличения коэффициента корреляции между указанными параметрами аэрозоля.

## Заключение

Нами рассмотрена годовая изменчивость микроструктурных параметров атмосферного аэрозоля по результатам решения обратной задачи солнечной спектрофотометрии. В качестве анализируемых параметров были взяты геометрическое сечение, объемная концентрация и средний радиус частиц, усредненные по каждому месяцу года. Оценка параметров микроструктуры проводилась для субмикронной и грубодисперсной фракций аэрозоля и их суммы. Также были исследованы статистические связи между аэрозольной оптической толщиной и восстановленными микроструктурными параметрами. В ре-

зультате проведенного исследования было установлено следующее.

Основной вклад в суммарное геометрическое сечение частиц вносит субмикронная фракция аэрозоля. Отношение сечений двух фракций изменяется от 3,7 в феврале до 17 в августе. В суммарный объем аэрозоля основной вклад вносит грубодисперсная фракция частиц. Отношение объемов двух фракций изменяется от 1,1 в декабре до 4,3 в феврале.

Среднемесячные значения сечения, объема частиц субмикронной фракции и АОТ в коротковолновой области спектра изменяются синхронно, принимая минимальные значения в ноябре и максимальные – в апреле. Среднемесячные значения сечения, объема частиц грубодисперсной фракции и АОТ в длинноволновой области спектра изменяются синхронно, с минимальными значениями в ноябре и максимальными – в феврале.

Средние радиусы субмикронных частиц изменяются от 0,1 до 0,14 мкм, грубодисперсных – в диапазоне 1,2–2,05 мкм. Изменение среднего радиуса полного ансамбля обусловлено, в основном, изменением соотношения между объемами двух фракций.

Корреляция между объемной концентрацией отдельных фракций частиц и АОТ имеет выраженную спектральную зависимость. Коэффициент корреляции между концентрацией субмикронных частиц и АОТ в коротковолновой области изменяется в диапазоне 0,88–0,99 в течение всего периода наблюдений. Коэффициент корреляции между концентрацией грубодисперсных частиц и АОТ растет с ростом длины волны, достигая значений 0,9–0,99 в длинноволновой области.

Авторы признательны С.М. Сакерину и Д.М. Кабанову за предоставленные для анализа экспериментальные данные.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ по поддержке ведущих научных школ НШ-4714.2014.5.

1. Шифрин К.С., Перельман А.Я. Определение спектра частиц дисперсной системы по данным о ее прозрачности // Оптика и спектроскопия. 1963. Т. 15, вып. 4–6. С. 533–542.
2. Yamamoto G., Tanaka M. Determination of aerosol size distribution from spectral attenuation measurements // App. Opt. 1969. V. 8, N 2. P. 447–453.
3. Наац И.Э. Теория многочастотного лазерного зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1980. 158 с.
4. Dubovik O., King M.D. A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements // J. Geophys. Res. D. 2000. V. 105, N 16. P. 20,673–20,696.
5. Веретенников В.В., Меньщикова С.С. Особенности восстановления микроструктурных параметров аэрозоля из измерений аэрозольной оптической толщины. I. Методика решения обратной задачи // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 4. С. 306–312.
6. Веретенников В.В., Яушева Е.П. О применении интегралов Стильеса в обратных задачах аэрозольного светорассеяния // Оптика атмосф. и океана. 1992. Т. 5, № 3. С. 273–284.
7. Веретенников В.В., Меньщикова С.С. Особенности восстановления микроструктурных параметров аэрозоля из измерений аэрозольной оптической толщины. II. Ре-

- зультаты обращения // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 4. С. 313–324.
8. *Holben B.N., Eck T.F., Slutsker I., Tanre D., Buis J.P., Setzer A., Vermote E., Reagan J.A., Kaufman Y.J., Nakad-jima 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.
  9. *Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Панченко М.В., Польшкин В.В., Холбен Б.Н., Смирнов А.В., Береснев С.А., Горда С.Ю., Корниенко Г.И., Николашкин С.В., Поддубный В.А., Тацillin М.А.* Результаты мониторинга атмосферного аэрозоля в азиатской части России по программе AEROSIBNET в 2004 г. // *Оптика атмосф. и океана.* 2005. Т. 18, № 11. С. 968–975.
  10. *Сакерин С.М., Береснев С.А., Горда С.Ю., Кабанов Д.М., Корниенко Г.И., Маркелов Ю.И., Михалев А.В., Николашкин С.В., Панченко М.В., Поддубный В.А., Польшкин В.В., Смирнов А.В., Тацillin М.А., Турчинович С.А., Турчинович Ю.С., Холбен Б.Н., Еремина Т.А.* Характеристики годового хода спектральной аэрозольной оптической толщи атмосферы в условиях Сибири // *Оптика атмосф. и океана.* 2009. Т. 22, № 6. С. 566–574.
  11. *Сакерин С.М., Андреев С.Ю., Бедарева Т.В., Кабанов Д.М., Поддубный В.А., Лужецкая А.П.* Пространственно-временная изменчивость аэрозольной оптической толщи атмосферы на территории Поволжья, Урала и Западной Сибири // *Оптика атмосф. и океана.* 2012. Т. 25, № 11. С. 958–962.
  12. *Сакерин С.М., Афонин С.В., Энгель М.В., Кабанов Д.М., Польшкин В.В., Турчинович Ю.С., Букин О.А., Павлов А.Н.* Пространственно-временная изменчивость аэрозольной оптической толщи атмосферы в Приморье и прилегающих морях в августе 2010 г. // *Оптика атмосф. и океана.* 2011. Т. 24, № 9. С. 731–736.
  13. *Афонин С.В., Энгель М.В., Майор А.Ю., Павлов А.Н., Столярчук С.Ю., Шмирко К.А., Букин О.А.* Результаты комплексного аэрозольного эксперимента в переходной зоне «материк–океан» (Приморье и Японское море). Часть 2. Анализ пространственной и временной изменчивости характеристик аэрозоля по спутниковым данным и лидарным измерениям // *Оптика атмосф. и океана.* 2010. Т. 23, № 9. С. 811–819.
  14. *Панченко М.В., Польшкин В.В., Пхалагов Ю.А., Щелканов Н.Н.* Статистические связи оптических и микрофизических характеристик аэрозоля аридной зоны // *Оптика атмосф. и океана.* 1993. Т. 6, № 8. С. 905–912.
  15. *Пхалагов Ю.А., Ужegov В.Н., Щелканов Н.Н.* Аэрозольное ослабление оптического излучения в атмосфере аридной зоны // *Оптика атмосф. и океана.* 1994. Т. 7, № 10. С. 1318–1329.
  16. *Пхалагов Ю.А., Ужegov В.Н., Щелканов Н.Н.* О роли дисперсных фракций приземной дымки в ослаблении видимого и инфракрасного излучения // *Оптика атмосф. и океана.* 1999. Т. 12, № 1. С. 19–22.
  17. *Ужegov В.Н., Пхалагов Ю.А., Кабанов Д.М., Сакерин С.М.* Грубодисперсный аэрозоль и его роль в формировании высоты однородной аэрозольной атмосферы // *Оптика атмосф. и океана.* 2012. Т. 25, № 12. С. 1023–1027.
  18. *Пхалагов Ю.А., Ужegov В.Н., Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Одинцов С.Л.* Особенности дневной динамики аэрозольной оптической толщи атмосферы в инфракрасном диапазоне длин волн // *Оптика атмосф. и океана.* 2009. Т. 22, № 9. С. 838–843.
  19. *Ужegov В.Н., Кабанов Д.М., Пхалагов Ю.А., Сакерин С.М.* Взаимосвязь вариаций аэрозольного ослабления видимой и ИК-радиации приземного слоя воздуха и всей атмосферной толщи // *Оптика атмосф. и океана.* 2009. Т. 22, № 4. С. 386–391.
  20. *Панченко М.В., Свириденков М.А., Емиленко А.С., Козлов В.С., Терпугова С.А., Ужegov В.Н., Докукина Т.А.* Сопоставление оптических и микрофизических характеристик аэрозоля в локальном объеме и на протяженной трассе // *Оптика атмосф. и океана.* 2007. Т. 20, № 6. С. 491–496.

*V.V. Veretennikov, S.S. Men'shchikova. Annual cycle in variability of aerosol microstructure parameters determined from solar photometry data.*

Special features of the annual behavior of aerosol microstructure parameters are considered. The aerosol parameters are retrieved by solving the solar photometry inverse problem. Average hourly measurements of aerosol optical depth in the spectral range 0.37–4 μm in Tomsk are used as the input data for the inversion. The experimental spectra are processed using the algorithm based on the integral distribution method. The volume concentration, total geometric cross-section, and mean particle radius are calculated using the retrieved integral size distribution function. In particular, it is established that the volume concentration is minimal in November and maximal in April. Statistical relationships between the aerosol optical depth and retrieved microstructure parameters were also studied.