

Оптико-микрофизические свойства атмосферного аэрозоля по данным солнечных фотометров SP-6 и CE-318

В.В. Веретенников, С.С. Меньщикова, Д.М. Кабанов, С.М. Сакерин*

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

Поступила в редакцию 22.07.2014 г.

Представлены результаты сравнения синхронных измерений аэрозольной оптической толщины, выполненных с использованием солнечных фотометров SP-6 и CE-318, и параметров микроструктуры, восстановленных с помощью решения обратной задачи. Измерения проводились в Томске на протяжении одного года. В качестве параметров микроструктуры аэрозоля рассматривались проинтегрированная по всей толще атмосферы объемная концентрация и средний радиус частиц. Указанные параметры оценивались как для полного ансамбля частиц, так и для отдельных фракций аэрозоля (субмикронной и грубодисперсной). Показано удовлетворительное согласие сравниваемых параметров. Обсуждаются возможные причины обнаруженных расхождений.

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

Введение

В течение длительного времени в ИОА СО РАН проводятся регулярные исследования спектральной прозрачности атмосферы с использованием двух различных систем наблюдений: автоматизированного аппаратурно-программного комплекса на базе солнечного фотометра типа SP [1–3] и фотометра CE-318 сети AERONET [4]. Оба экспериментальных комплекса расположены на одной измерительной площадке и позволяют синхронно проводить наблюдения аэрозольной оптической толщины (AOT). Для оценки микроструктуры аэрозоля из спектральных измерений AOT по данным фотометра SP разработан программный комплекс, в котором реализован алгоритм решения обратной задачи на основе метода интегральных распределений [5, 6]. Алгоритм обращения эффективен при обработке больших массивов экспериментальных данных в рутинном режиме и применялся при исследовании сезонной изменчивости параметров микроструктуры аэрозоля, на различных временных масштабах [7, 8] и в условиях задымленной атмосферы [9]. Как известно, в сети AERONET также проводится обработка экспериментальных данных для определения дисперсного состава и комплексного показателя преломления аэрозоля [10]. При этом для решения обратной задачи дополнительно привлекается информация о яркости рассеянного атмосферой излучения.

Возможность проведения синхронных измерений с использованием двух различных систем позволяет провести анализ взаимной согласованности экспериментальных данных и оценить степень объективности получаемой информации об оптико-микрофизическом состоянии аэрозоля в вертикальном столбе атмосферы. Необходимость сравнения результатов обусловлена различиями, связанными с конструктивными особенностями и параметрами измерительной аппаратуры, методикой предварительной обработки экспериментальных данных, алгоритмами решения обратной задачи для восстановления микроструктуры атмосферного аэрозоля. В частности, измерительные комплексы различаются по спектральному диапазону и числу длин волн. Кроме того, имеются различия в периодичности измерений, выполняемых двумя комплексами: от нескольких измерений (CE-318) до нескольких десятков измерений (SP-6) в течение 1 ч.

В настоящей статье рассмотрены результаты сравнения спектральных зависимостей AOT по данным двух измерительных систем и соответствующих им микроструктурных параметров аэрозоля, восстановленных при решении обратной задачи. Анализ данных проводился при усреднении на временных масштабах продолжительностью от 1 ч до 1 мес.

1. Общая характеристика массива исходных данных

Для анализа был выбран тестовый интервал наблюдений, продолжительностью один год, с июля 2003 по июнь 2004 г. В течение указанного периода наблюдений с использованием солнечного фотометра

* Виктор Васильевич Веретенников (vuvv@iao.ru); Светлана Сергеевна Меньщикова (mss@iao.ru); Дмитрий Михайлович Кабанов (dkab@iao.ru); Сергей Михайлович Сакерин (sms@iao.ru).

SP-6 проводились регулярные измерения АОТ $\tau(\lambda)$ на 13 длинах волн в спектральном диапазоне 0,37–4 мкм. При решении обратной задачи измеренные спектральные зависимости $\tau(\lambda)$ предварительно усреднялись на часовом интервале.

С помощью фотометра CE-318 измерения выполнялись в указанный период на протяжении 6 мес, с июля по октябрь 2003 г. и в мае–июне 2004 г. Массив данных, полученных с помощью фотометра CE-318, включал спектральные измерения АОТ $\tau(\lambda)$ в диапазоне 0,34–1,02 мкм на 7 длинах волн.

Как показал предварительный анализ, на результаты статистической обработки данных значительное влияние оказывает несинхронность измерений, проводимых двумя приборами, даже на временных масштабах продолжительностью 1 мес. Поэтому для дальнейшего анализа окончательно отбирались только результаты, полученные с помощью двух приборов, расхождение по времени между которыми не превышало 1 ч.

В итоге общий объем данных фотометра SP-6, использованных для сравнительного анализа, составил около 700 среднечасовых спектров $\tau(\lambda)$. На рис. 1, а представлена гистограмма распределения количества среднечасовых спектров АОТ, полученных с помощью фотометра SP-6. Распределение ука-

занных данных на протяжении года неравномерное. Максимальное число среднечасовых спектров получено в летние месяцы (август 2003 г., июнь 2004 г.), минимальное – в мае 2004 г.

Общий объем данных AERONET, синхронизированных с измерениями фотометра SP-6, составил 1670 индивидуальных спектров АОТ и 219 азимутальных распределений частиц по размерам. Гистограмма распределения числа среднечасовых измерений АОТ, выполненных с помощью фотометра CE-318, показана на рис. 1, б.

2. Среднемесячные спектральные зависимости АОТ и параметры микроструктуры

На рис. 2 представлены среднемесячные спектральные зависимости АОТ $\tau(\lambda)$, полученные из синхронизированных данных двух приборов. Видно, что для всех рассмотренных месяцев наблюдается высокая степень согласованности результатов, определенных с помощью различных измерительных систем. В видимой области спектра максимальные среднемесячные значения АОТ отмечены в мае–июне 2004 г., а минимальные – в октябре 2003 г. Разность среднемесячных значений АОТ $\langle \Delta\tau(\lambda) \rangle = \langle \tau(\lambda) \rangle_{CE} - \langle \tau(\lambda) \rangle_{SP}$, полученных двумя приборами, носит знакопеременный характер.

Средние значения АОТ за весь период наблюдений на длине волны $\lambda = 0,5$ мкм равны 0,178 и 0,179 для фотометров SP-6 и CE-318 соответственно. Абсолютная величина разности $\langle \Delta\tau(0,5) \rangle$ при $\lambda = 0,5$ мкм не превышает 0,008 и сопоставима с погрешностью измерений АОТ. Для длин волн $\lambda_{SP} = 1,052$ мкм и $\lambda_{CE} = 1,02$ мкм средние значения АОТ за период наблюдений также близки и составляют 0,067 и 0,070 соответственно. Представленные результаты свидетельствует в пользу достоверности и объективности экспериментальных данных.

Обратимся к анализу микроструктурных параметров аэрозоля, восстановленных из решения обратной задачи. При обращении данных фотометра SP-6 в качестве искомой рассматривалась функция $S(r)$, определяющая суммарное геометрическое сечение частиц радиусом, большим или равным r , которые содержатся в вертикальном столбе атмосферы единичной площади. Устойчивое решение обратной задачи находилось путем минимизации функционала невязки на множестве монотонных ограниченных функций.

В качестве анализируемых параметров микроструктуры аэрозоля рассматривались проинтегрированная по всей толще атмосферы объемная концентрация частиц V , а также их средний радиус $r_s = (3/4)V/S$, где S – суммарное геометрическое сечение частиц. Указанные параметры оценивались как для полного ансамбля частиц, так и для отдельных фракций аэрозоля, субмикронной (fine) и грубодисперсной (coarse). При обращении данных фотометра SP-6 граница между фракциями аэрозоля

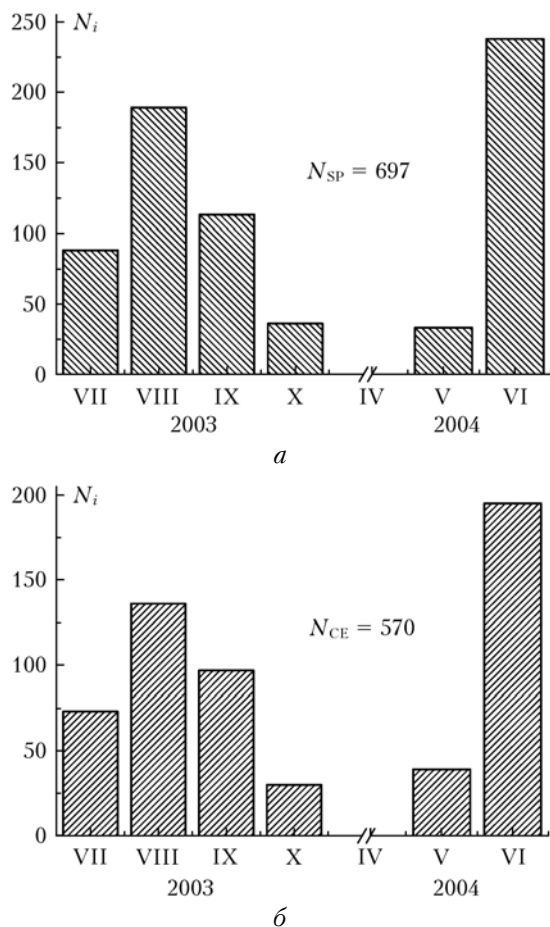


Рис. 1. Гистограмма распределения количества спектров АОТ за период наблюдений фотометрами SP-6 (а) и CE-318 (б)

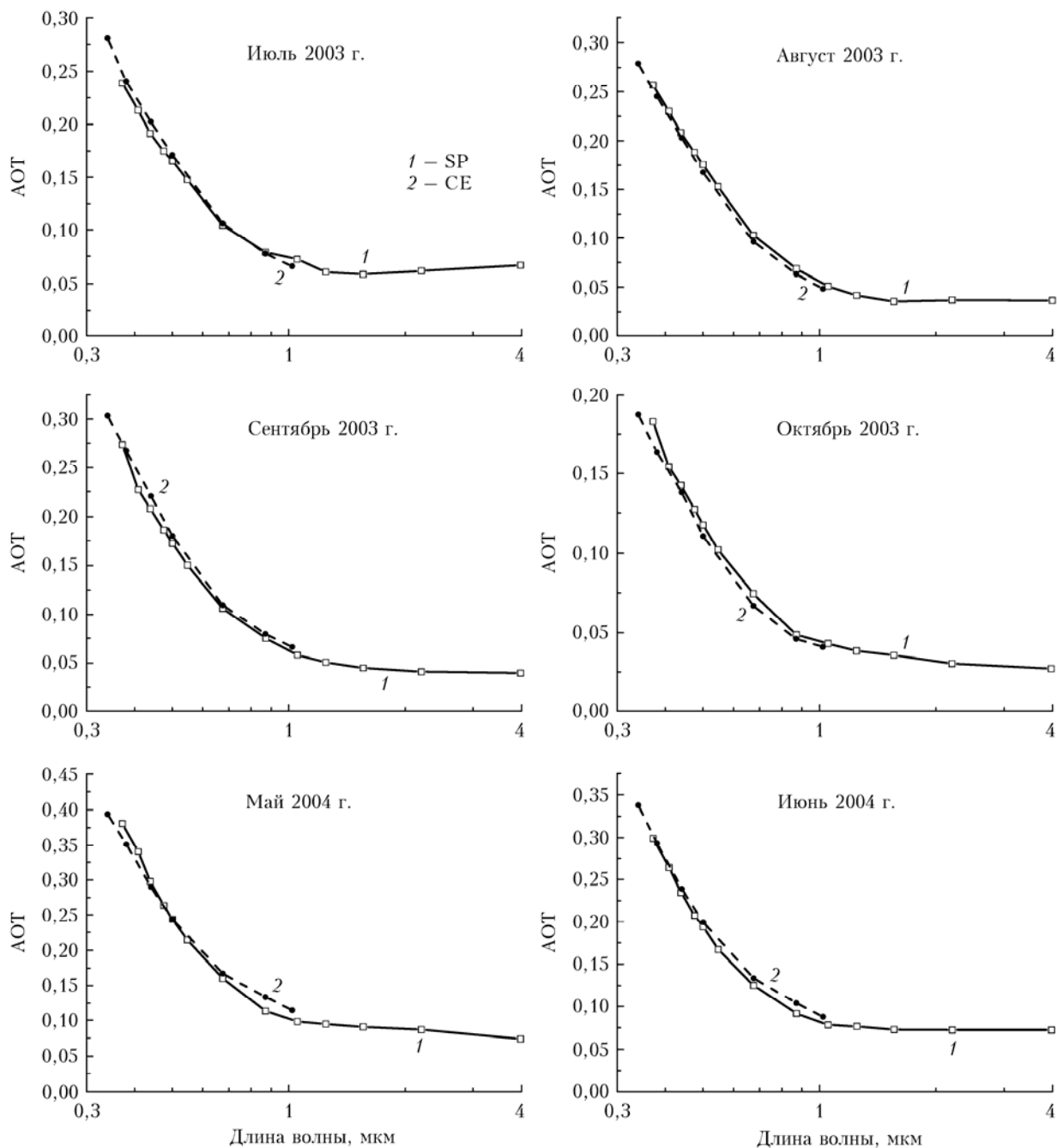


Рис. 2. Спектральные зависимости среднемесячных AOT по данным фотометров SP-6 (кривые 1) и CE-318 (2)

считалась фиксированной и равной, как и в работе [7], 0,55 мкм. Для микроструктурных параметров аэрозоля, представленных в данных сети AERONET, граница между субмикронной и грубодисперсной фракциями установлена несколько выше и составляет 0,6 мкм.

При обращении данных солнечного фотометра SP-6 показатель преломления аэрозоля задавался постоянным по спектру, одинаковым для обеих фракций и равным $1,5 - i \cdot 0$. Процедура обращения данных фотометра CE-318 предполагает восстановление (наряду с дисперсным составом) также и комплекс-

ного показателя преломления. Для всех рассмотренных случаев вещественная часть восстановленного комплексного показателя преломления изменялась от 1,49 до 1,52, а мнимая часть была заключена в интервале 0,027–0,037.

На рис. 3 показаны среднемесячные значения объемной концентрации аэрозоля, восстановленные по данным двух фотометров. Наиболее близкие результаты получены при восстановлении объемной концентрации субмикронного аэрозоля $V^{(f)}$. Максимальное расхождение наблюдается в июле 2003 г. и составляет $0,002 \text{ см}^3/\text{м}^2$, или около 10%.

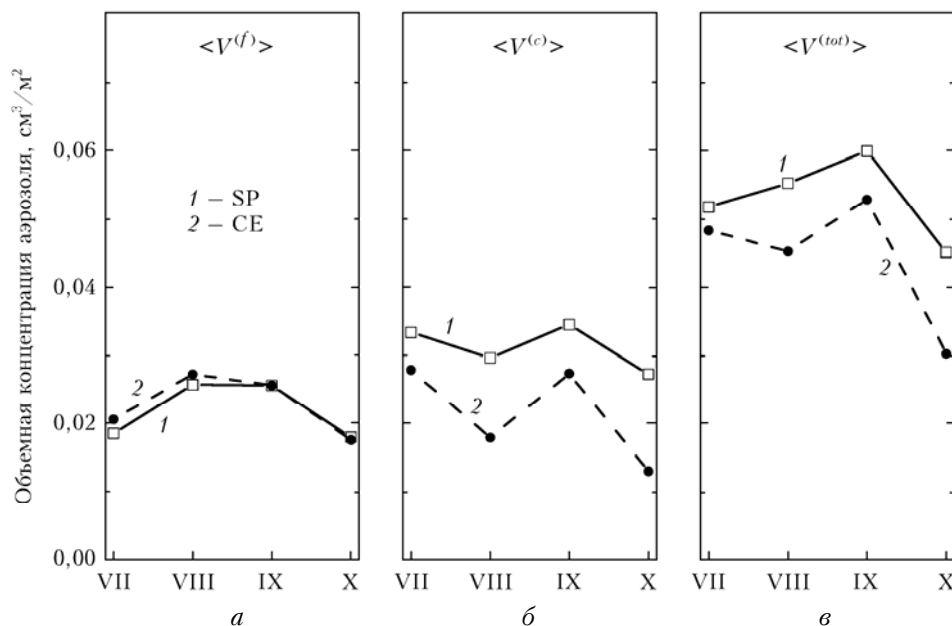


Рис. 3. Среднемесячные значения объемной концентрации субмикронной (а), грубодисперсной (б) фракций аэрозоля и их суммы (в), восстановленные по данным фотометров SP-6 (кривые 1) и CE-318 (2) в период наблюдений

Во временном поведении объемной концентрации грубодисперсного аэрозоля $V^{(c)}$ (рис. 3, б) наблюдается только качественное сходство результатов, полученных по данным двух приборов. Причем результаты обращения данных фотометра SP-6 систематически приводят к более высоким оценкам $\langle V^{(c)} \rangle_{SP}$. Самые близкие значения $\langle V^{(c)} \rangle_{SP}$ и $\langle V^{(c)} \rangle_{CE}$ с разностью $0,005 \text{ см}^3/\text{м}^2$ (15%) отмечены в июле 2003 г.

Возможной причиной, по которой результаты обращения данных фотометра SP-6 приводят к более высоким значениям объемной концентрации грубодисперсных частиц, может являться использование при решении обратной задачи измерений на длинах волн ИК-диапазона (1,246; 1,557; 2,203 и 3,99 мкм), которые отсутствуют в фотометре CE-318. Как показывают численные оценки, расширение спектрального диапазона измерений в ИК-область позволяет более точно учитывать содержание грубодисперсных частиц.

В характере временной изменчивости суммарного объема аэрозольных частиц $\langle V^{(tot)} \rangle$ (рис. 3, в) явно отражается влияние грубодисперсной фракции, изменчивость концентрации которой является основным источником различия в оценках $\langle V^{(tot)} \rangle$. При абсолютной разнице между суммарными концентрациями $\langle V^{(tot)} \rangle_{SP}$ и $\langle V^{(tot)} \rangle_{CE}$, равной в июле 2003 г. $0,0034 \text{ см}^3/\text{м}^2$, их относительное расхождение составило всего 6,6%.

Перейдем к рассмотрению поведения среднего радиуса аэрозольных частиц по результатам обращения данных двух фотометров. На рис. 4 представлены среднемесячные значения среднего по ансамблю радиуса частиц для субмикронной и грубодисперсной фракций, а также для их суммы, восстановленные по данным фотометров SP-6 и CE-318 в период синхронных наблюдений.

Как видно из рис. 4, а, средний радиус $\langle r_s^{(f)} \rangle$ субмикронных частиц является наиболее стабильной величиной по данным каждого прибора. На протяжении всего рассматриваемого периода значение $\langle r_s^{(f)} \rangle_{SP}$ мало меняется в окрестности 0,11 мкм, относительно которого кривая $\langle r_s^{(f)} \rangle_{CE}$ смещена до уровня 0,14–0,15 мкм. Источником наблюдаемого расхождения в оценках среднего радиуса субмикронных частиц может быть особенность алгоритма, использованного при обращении данных фотометра SP-6, в котором для повышения точности восстановления содержания микродисперсных частиц применен метод микрофизической экстраполяции [11]. Подробнее данный вопрос будет рассмотрен в разд. 3.

На рис. 4, в представлены результаты восстановления среднего радиуса $\langle r_s^{(c)} \rangle$ грубодисперсных частиц. Видно, что средний радиус частиц грубодисперсной фракции $\langle r_s^{(c)} \rangle_{CE}$ по данным AERONET превышает соответствующие значения, полученные из измерений фотометра SP-6. Наибольшее расхождение результатов наблюдается в октябре 2003 г. Для остальных результатов разница в оценках $\langle r_s^{(c)} \rangle$ по данным двух приборов не превышает 0,37 мкм при близких среднегодовых значениях в окрестности 2 мкм.

При оценке среднего радиуса частиц полного ансамбля $\langle r_s^{(tot)} \rangle$ достигнуто более удовлетворительное согласие результатов (рис. 4, б). Среднемесячные значения параметра $\langle r_s^{(tot)} \rangle$, восстановленные за период наблюдений по данным двух приборов, заключены в интервале 0,24–0,28 мкм. При исключении результатов с наибольшим расхождением за сентябрь 2003 г. в остальных случаях разница в оценках $\langle r_s^{(tot)} \rangle$ не превышает 0,01 мкм.

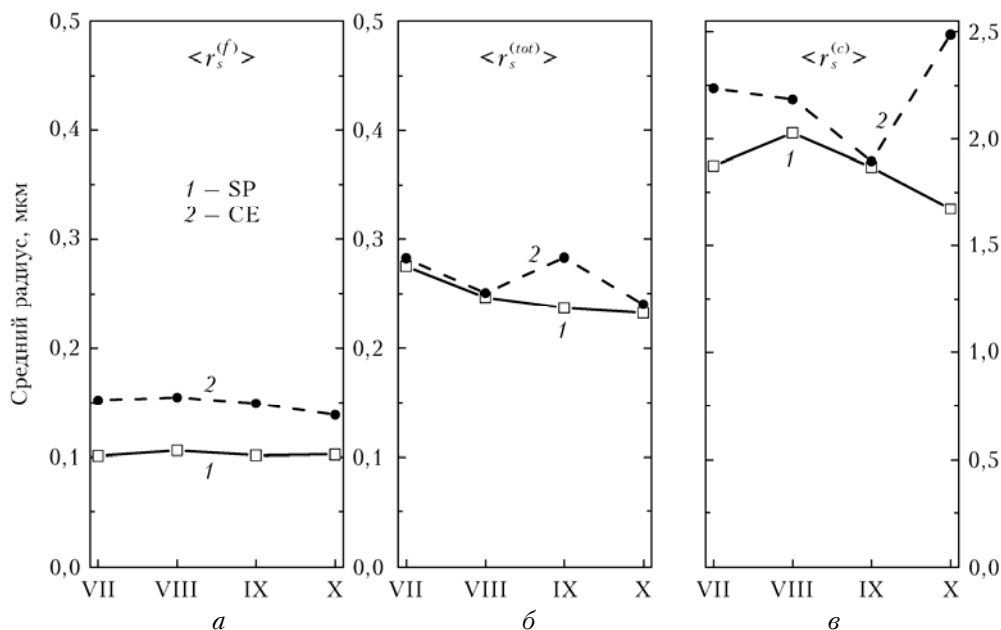


Рис. 4. Среднемесячные значения среднего по ансамблю радиуса частиц субмикронной (а), грубодисперсной (б) фракций аэрозоля и их суммы (в), восстановленные по данным фотометров SP-6 (кривые 1) и CE-318 (2) в период наблюдений

3. Изменчивость АОТ и параметров микроструктуры на среднесуточном масштабе

Результаты, рассмотренные в разд. 2, дают обобщенное представление о соотношении оптических и микроструктурных параметров аэрозоля, усредненных на временных интервалах длительностью 1 мес, и не раскрывают тех особенностей, которые может выявить анализ данных в более крупных масштабах. Целесообразность в разномасштабном рассмотрении обусловлена высокой временной изменчивостью свойств аэрозоля.

В настоящем разделе рассмотрена динамика среднесуточных характеристик аэрозоля в июне 2004 г., для которого имелся статистически обеспеченный массив данных для каждого фотометра, практически равномерно распределенных в анализируемый период. Измерения с помощью солнечного фотометра SP-6 проводились на протяжении 27 дней, в течение которых было получено 238 среднечасовых спектров АОТ. Продолжительность измерительного цикла фотометра CE-318 была меньше на один день. При этом объем данных AERONET за июнь 2004 г. составил 526 индивидуальных спектров АОТ и 79 аэрозольных распределений по размерам.

На рис. 5 показана временная изменчивость АОТ в видимой (а) и ИК-области спектра (б) на протяжении месяца по данным двух измерительных систем с усреднением на дневном интервале. Среднесуточные зависимости АОТ $\langle \tau \rangle_{SP, CE}$ в видимой области спектра, представленные на рис. 5, а, демонстрируют хорошее совпадение практически в течение всего рассматриваемого периода. Разность среднемесячных значений оптических толщин, полученных

в течение июня двумя приборами на длине волны $\lambda = 0,5$ мкм, составляет всего 0,005.

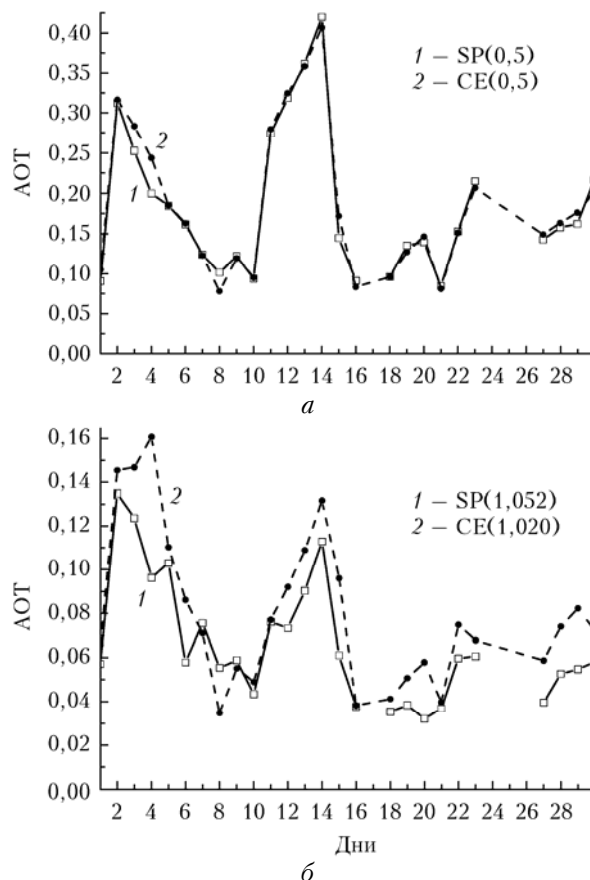


Рис. 5. Среднесуточный ход АОТ в видимой (а) и ближней ИК-области спектра (б) по данным фотометров SP-6 (1) и CE-318 (2) в течение месяца (июнь 2004 г.)

С увеличением длины волны это расхождение несколько возрастает. На рис. 5, б представлены зависимости среднесуточных значений АОТ $\langle \tau \rangle_{SP, CE}$, полученные за июнь 2004 г. на длинах волн 1,02 и 1,052 мкм. Видно, что близкие значения АОТ $\langle \tau \rangle_{SP, CE}$ наблюдаются примерно в половине случаев. В остальные дни более высокие значения определены преимущественно для параметра $\langle \tau \rangle_{CE}$. Это нашло отражение в различии среднемесячных значений АОТ. В июне среднемесячная разность $\langle \tau(1,020) \rangle_{CE} - \langle \tau(1,052) \rangle_{SP}$ составляет 0,015. Тем не менее зависимости $\langle \tau \rangle_{SP, CE}$ демонстрируют в целом взаимную согласованность временного хода, что выражается, например, в положении глобальных пиков в периоды 2–5 и 11–15 июня. Можно также заметить, что наибольшая разница в ИК-области спектра между $\langle \tau \rangle_{SP}$ и $\langle \tau \rangle_{CE}$ имеет место для тех же дней (3 и 4 июня), что и в видимой области (см. рис. 5, а).

Обратимся далее к результатам восстановления микроструктуры аэрозоля. Заметим, что в отличие от измерений АОТ объем данных о микроструктуре аэрозоля в сети AERONET существенно меньше. Для рассматриваемого примера в течение июня 2004 г. по данным фотометра CE-318 получено 79 индивидуальных функций распределения частиц по размерам, которые распределены на протяжении месяца неравномерно и приходятся на 21 день месяца.

На рис. 6 приведена гистограмма числа функций распределения по размерам по данным фотометра CE-318 в июне 2004 г. Видно, что максимальное число (12 индивидуальных распределений) получено 9 июня 2004 г. На остальные дни приходится в среднем около трех распределений в день.

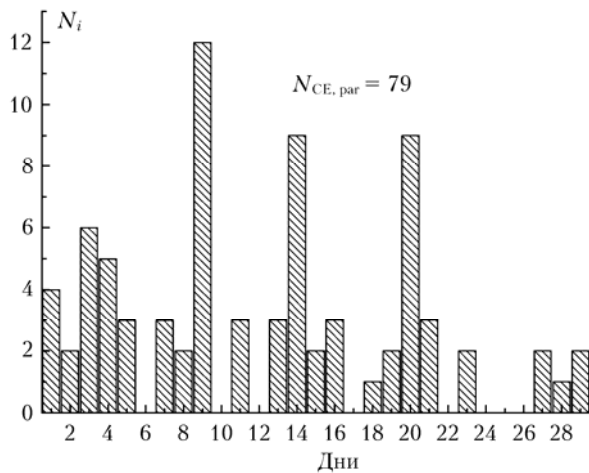


Рис. 6. Гистограмма числа функций распределения частиц по размерам, восстановленных при обращении данных фотометра CE-318 в течение июня 2004 г.

Напротив, параметры микроструктуры, восстановленные по результатам обращения данных фотометра SP-6, статистически более обеспечены и включают в себя для указанного месячного периода около 240 среднечасовых реализаций, из которых было отобрано 79 наборов параметров, синхронизированных с данными AERONET.

Результаты сравнения объемной концентрации $\langle V^{(f)} \rangle$ для субмикронной фракции представлены на рис. 7, а. Временная зависимость $\langle V^{(f)} \rangle$ находится в хорошем согласии с изменчивостью среднесуточных значений оптической толщины $\langle \tau \rangle$ на длине волны $\lambda = 0,5$ мкм (см. рис. 5, а). Несмотря на различия в статистической обеспеченности двух ансамблей, представленные зависимости $\langle V^{(f)} \rangle$ имеют

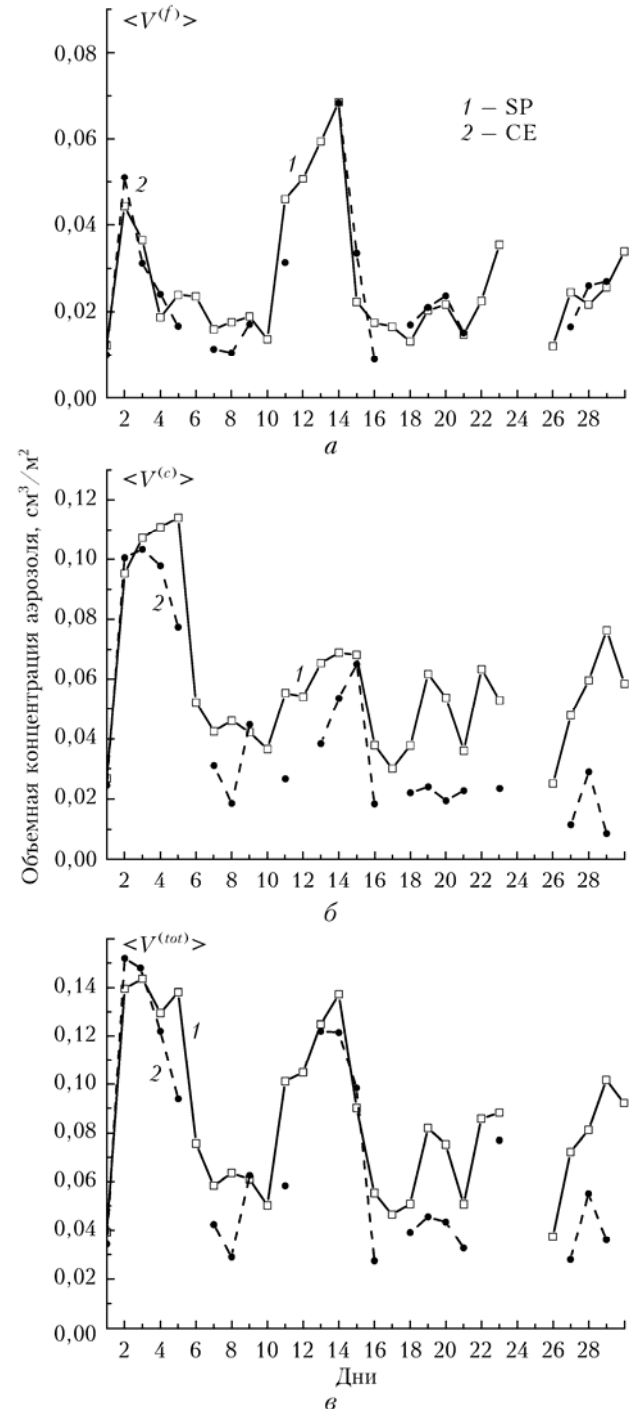


Рис. 7. Среднесуточный ход объемной концентрации субмикронной (а), грубодисперсной (б) фракций аэрозоля и их суммы (в) в течение месяца (июнь 2004 г.) по данным фотометров SP-6 (кривые 1) и CE-318 (2)

близкий временной ход при практическом совпадении среднемесячных значений, разность между которыми составляет $0,002 \text{ см}^3/\text{м}^2$. Расхождения, наблюдаемые в отдельные дни (например, 3 и 8 июня), отражают отличия, которые проявляются между среднесуточными значениями $\langle \tau \rangle_{\text{SP}}$ и $\langle \tau \rangle_{\text{CE}}$ в видимой области спектра для тех же дней.

По объемной концентрации грубодисперсного аэрозоля столь хорошего согласия уже не наблюдается. На рис. 7, б можно отметить близкие результаты лишь в отдельные дни. Здесь в более детальном виде наблюдается тенденция, которая ранее была отмечена для среднемесячных значений $\langle V^{(c)} \rangle$. В большинстве случаев среднесуточная объемная концентрация $\langle V^{(c)} \rangle_{\text{SP}}$ больше, чем $\langle V^{(c)} \rangle_{\text{CE}}$. Разность между их среднемесячными значениями составляет $0,017 \text{ см}^3/\text{м}^2$. О возможной причине такого результата говорилось в разд. 2 при сравнении среднемесячных оценок $\langle V^{(c)} \rangle$.

Как следует из данных, приведенных на рис. 7, в рассматриваемый период в суммарном объеме частиц преобладает грубодисперсная фракция аэрозоля. Отношение между объемными концентрациями двух фракций составляет 1,5–2 раза. Поэтому в поведении кривых на рис. 7, в, описывающих изменение суммарного среднесуточного объема аэрозольных частиц, в большей степени нашли отражение особенности, выявленные для частиц грубодисперсной фракции. Здесь, как и в предыдущем случае, обращение данных фотометра SP-6 приводит к более высоким значениям $\langle V^{(tot)} \rangle_{\text{SP}}$. При этом разность между среднемесячными значениями $\langle V^{(tot)} \rangle_{\text{SP}}$ и $\langle V^{(tot)} \rangle_{\text{CE}}$ составляет $0,015 \text{ см}^3/\text{м}^2$, или 17%.

Рис. 8 иллюстрирует результаты восстановления среднего радиуса аэрозольных частиц за рассматриваемый период для субмикронной (а), грубодисперсной (б) фракций и полного ансамбля частиц (в). В зависимостях, изображенных на рис. 8, находят подтверждение отличительные особенности, которые были выявлены в разд. 2 при анализе среднемесячных данных.

Наиболее характерные различия в представленных результатах наблюдаются при восстановлении среднего радиуса $\langle r_s^{(f)} \rangle$ частиц субмикронной фракции. Поведение кривой 1 на рис. 8, а для зависимости $\langle r_s^{(f)} \rangle_{\text{SP}}$ демонстрирует в целом стабильность на протяжении месяца на уровне около $0,1 \text{ мкм}$. Значения $\langle r_s^{(f)} \rangle_{\text{CE}}$ (кривая 2) сдвинуты вверх относительно зависимости $\langle r_s^{(f)} \rangle_{\text{SP}}$ и имеют больший разброс в интервале $0,13\text{--}0,16 \text{ мкм}$.

Одним из источников такого расхождения является различный выбор нижней границы диапазона размеров субмикронных частиц r_{min} , задаваемой при решении обратной задачи. При обращении данных фотометра SP-6 величина r_{min} была выбрана равной $0,01 \text{ мкм}$, а в алгоритме обращения данных AERONET $r_{\text{min}} = 0,05 \text{ мкм}$.

Для сравнения на рис. 8, а приведена кривая 3, которая получена по данным фотометра SP-6 из тех же аэрозольных распределений, что и кривая 1, при исключении из функции распределения микродисперсных частиц радиусом меньше $0,1 \text{ мкм}$. Это

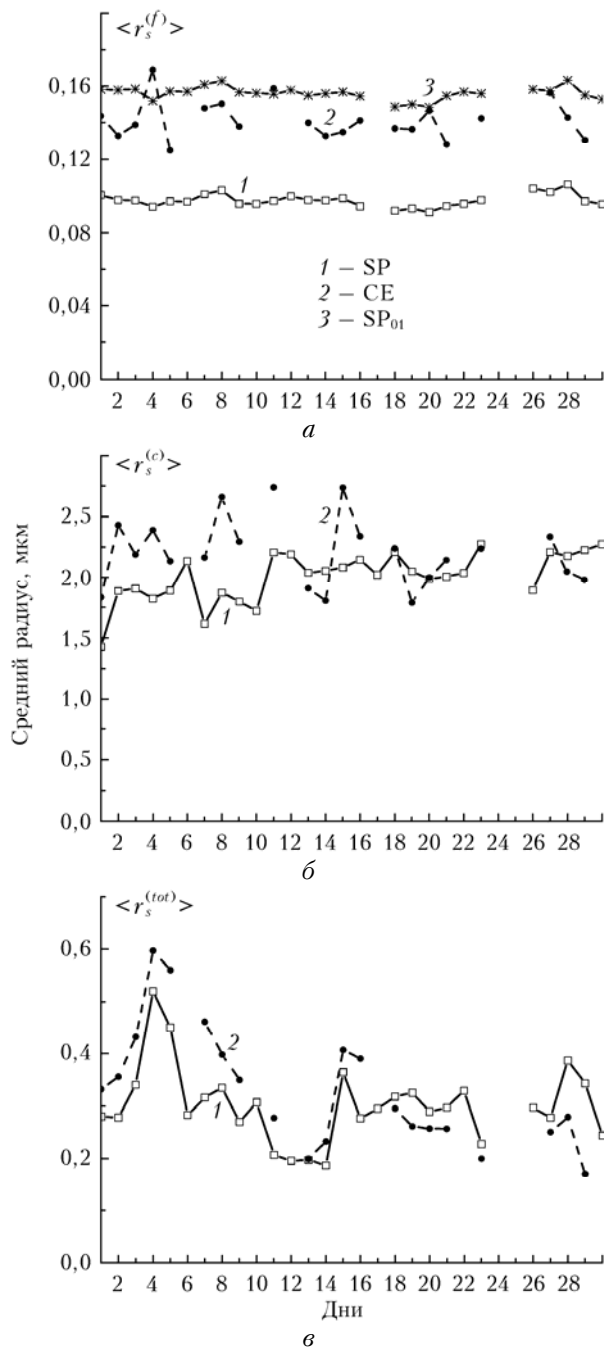


Рис. 8. Среднесуточный ход среднего по ансамблю радиуса частиц субмикронной (а), грубодисперсной (б) фракций аэрозоля и их суммы (в) в течение месяца (июнь 2004 г.) по результатам обращения данных фотометра SP-6 (1) и CE-318 (2); результаты обращения данных фотометра SP-6 без учета содержания частиц радиусом менее $0,1 \text{ мкм}$ (3)

влечет за собой рост среднего радиуса частиц, что и наблюдается при переходе от кривой 1 к кривой 3. Близость кривых 2 и 3 указывает на пониженное содержание микродисперсных частиц в аэрозольных распределениях, восстановленных по данным фотометра CE-318.

К настоящему времени накопились многочисленные данные, свидетельствующие об относительно высоком содержании в аэрозоле очень мелких

частиц [12–19]. В связи с этим в алгоритме [11] предусмотрены специальные меры, которые позволяют повысить точность определения вклада в аэрозольное распределение микродисперсных частиц.

Так же как и в случае субмикронной фракции, поведение среднего радиуса $\langle r_s^{(c)} \rangle_{SP}$ частиц грубодисперсной фракции (рис. 8, б; кривая 1) демонстрирует более стабильный временной ход по сравнению с данными AERONET (кривая 2). Расхождение между зависимостями $\langle r_s^{(c)} \rangle_{SP}$ и $\langle r_s^{(c)} \rangle_{CE}$ имеет знакопеременный характер при их близких среднемесячных значениях, равных 2,0 и 2,2 мкм соответственно.

Знакопеременный характер имеет также различие между средними радиусами $\langle r_s^{(tot)} \rangle$ для полного ансамбля частиц, наблюдаемое на рис. 8, в. Среднемесячные значения $\langle r_s^{(tot)} \rangle$ также близки и равны 0,32 мкм (SP-6) и 0,36 мкм (CE-318). Изменчивость среднего радиуса $\langle r_s^{(tot)} \rangle$ полного ансамбля на протяжении рассмотренного периода во многом обусловлена изменением соотношения между объемной концентрацией субмикронной и грубодисперсной фракций частиц. Например, пик на зависимости $\langle r_s^{(tot)} \rangle$ 4 июня связан с провалом объемной концентрации субмикронного аэрозоля, наблюдаемым в то же время на рис. 7, а, при высоком содержании грубодисперсного аэрозоля. И наоборот, резкое падение $\langle r_s^{(tot)} \rangle$ до 0,2 мкм в период 11–14 июня обусловлено, как это видно из рис. 7, а, значительным увеличением концентрации субмикронных частиц.

4. Изменчивость АОТ и параметров микроструктуры на среднечасовом масштабе

В заключение сравним изменение характеристик аэрозоля в течение одного дня, 9 июня 2004 г. За время наблюдений с использованием фотометра CE-318 в течение дня было получено 63 индивидуальных спектра АОТ, или около 4 циклов измерений в час. При этом было восстановлено 12 распределений частиц по размерам, что является самым высоким показателем в течение месяца (см. гистограмму на рис. 6).

На рис. 9 представлен дневной ход среднечасовых значений АОТ по данным двух приборов в видимом (а) и ближнем ИК-диапазоне спектра (б). Все приведенные зависимости имеют подобный вид с плавным возрастанием до полудня и более крутым подъемом после 16 ч. Между кривыми на рис. 9 наблюдается почти систематическое смещение при более высоких значениях для данных, полученных с помощью фотометра SP-6. Величина смещения для обеих длин волн составляет в среднем около 0,01 и находится на уровне погрешности измерений.

Рис. 10 и 11 дают представление об изменчивости объемной концентрации и среднего радиуса частиц в течение дня. В отличие от данных, рассмотренных в предыдущих разделах, указанные зависи-

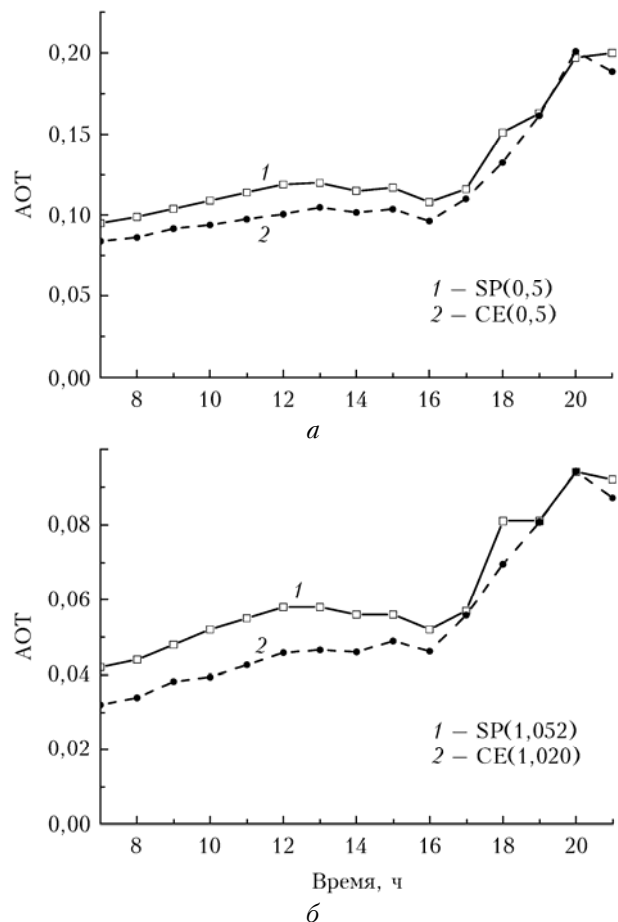


Рис. 9. Дневной ход среднечасовых измерений АОТ в видимой (а) и ближней ИК-области спектра (б) по данным фотометров SP-6 (кривые 1) и CE-318 (2) в течение 9 июня 2004 г.

мости носят, главным образом, иллюстративный характер, поскольку статистически обеспеченными являются только параметры микроструктуры, восстановленные по среднечасовым спектрам фотометра SP-6. Данным фотометра CE-318 на рис. 10 и 11 соответствуют единичные измерения, которые, в отличие от результатов, полученных из измерений фотометра SP-6, в большей степени подвержены нерегулярным флуктуациям.

В наиболее выраженной форме это наблюдается при восстановлении объемной концентрации субмикронного аэрозоля. Кривая 1 на рис. 10, а, соответствующая зависимости $\langle V^{(f)} \rangle_{SP}$, имеет плавный дневной ход, в котором отражается временная изменчивость АОТ $\langle \tau(0,5) \rangle_{SP}$, изображенная на рис. 9, а. Значения $V_{CE}^{(f)}$, соответствующие индивидуальным данным фотометра CE-318 (кривая 2), в течение дня претерпевают нерегулярные отклонения относительно кривой $\langle V^{(f)} \rangle_{SP}$.

Как видно из сравнения кривых на рис. 9, б и 10, б, дневной ход концентрации частиц грубодисперсной фракции $V^{(c)}$ хорошо согласуется с поведением АОТ $\langle \tau(\lambda) \rangle$ в ИК-области спектра. Причем, как и в предыдущих случаях, при рассмотрении среднемесячных и среднесуточных зависимостей, данным

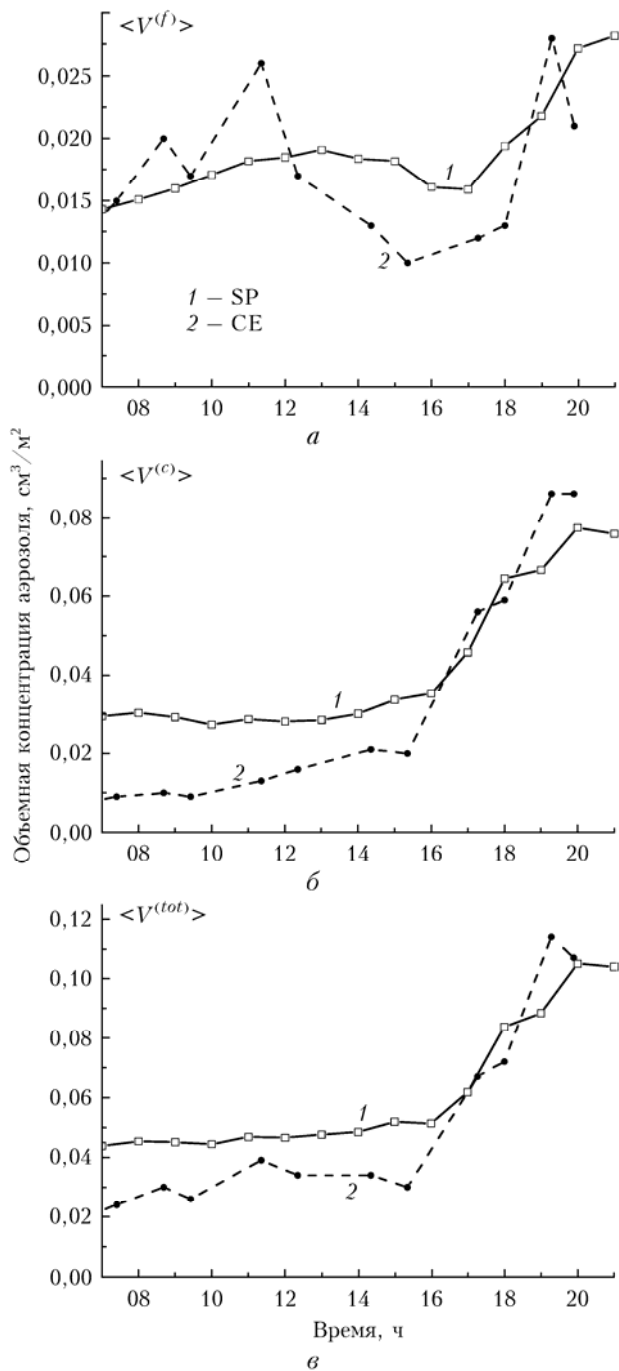


Рис. 10. Дневной ход среднечасовой объемной концентрации субмикронной (а), грубодисперсной (б) фракций аэрозоля и их суммы (в) по результатам обращения среднечасовых данных SP-6 (кривые 1) и CE-318 (2) в течение 9 июня 2004 г.

фотометра CE-318 соответствуют меньшие значения объемной концентрации $V^{(c)}$, особенно в утренние часы. Во второй половине дня результаты, полученные двумя приборами, сблизились.

Данные, приведенные на рис. 10, свидетельствуют в целом о преобладании грубодисперсного аэрозоля в суммарном объеме частиц $V^{(tot)}$, в поведении которого отразился характер временной изменчивости параметра $V^{(c)}$.

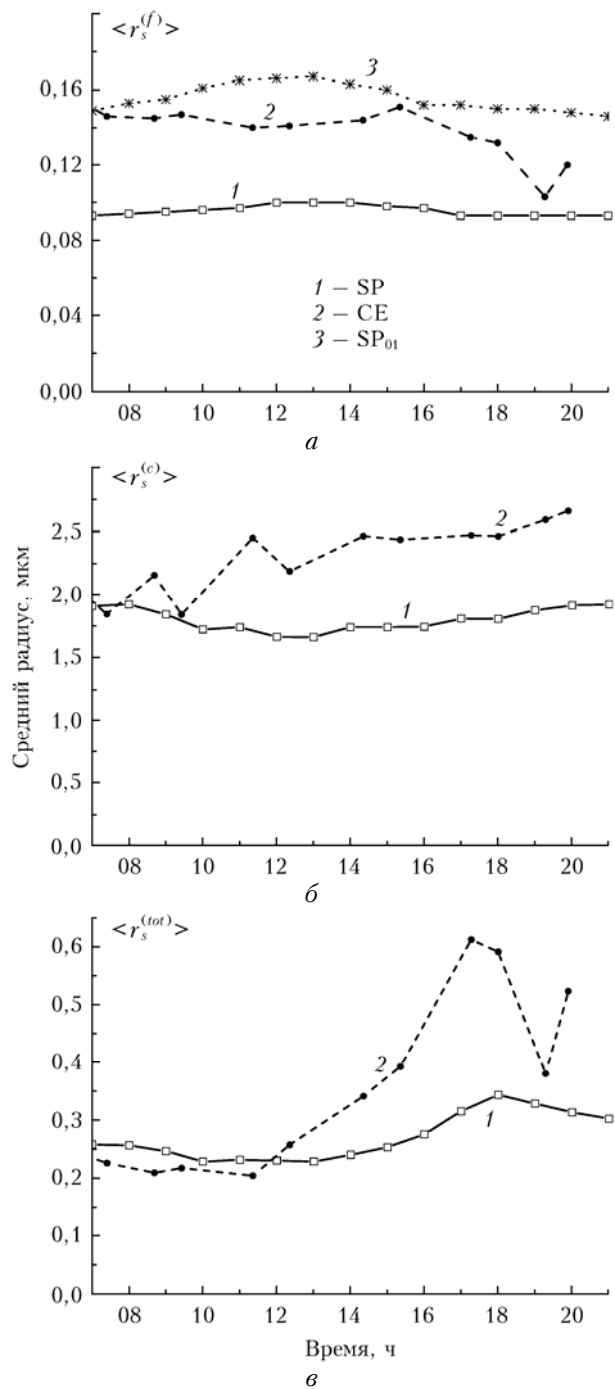


Рис. 11. Дневной ход среднего радиуса частиц субмикронной (а), грубодисперсной (б) фракций аэрозоля и их суммы (в) по результатам обращения среднечасовых данных фотометров SP-6 (кривые 1) и CE-318 (2) в течение 9 июня 2004 г.; результаты обращения данных фотометра SP-6 без учета содержания частиц радиусом менее 0,1 мкм (3)

Согласуются с ранее полученными результатами данные о поведении среднего радиуса частиц (рис. 11). Значения $\langle r_s^{(f)} \rangle_{\text{CE}}$ на рис. 11, а (кривая 2) заключены между двумя кривыми $\langle r_s^{(f)} \rangle_{\text{SP}}$, полученными по данным фотометра SP-6 при учете частиц радиусом менее 0,1 мкм (кривая 1) и при их исключении (кривая 3).

Более высокие значения имеют оценки среднего радиуса грубодисперсных частиц по данным фотометра CE-318, особенно во второй половине дня (рис. 11, б).

Для среднего радиуса $\langle r_s^{(tot)} \rangle$ полного ансамбля (рис. 11, в) по данным двух приборов в первой половине дня получены близкие значения, заключенные в диапазоне 0,2–0,26 мкм. Небольшое превышение параметра $\langle r_s^{(tot)} \rangle_{SP}$ над величиной $\langle r_s^{(tot)} \rangle_{CE}$ в указанный период определяется более высокими значениями объемной концентрации грубодисперсных частиц $\langle V^{(c)} \rangle_{SP}$, полученными из измерений фотометра SP-6 (см. рис. 10, б, кривая 1).

На временной зависимости среднего радиуса $\langle r_s^{(tot)} \rangle_{CE}$ (кривая 2 на рис. 11) после 12 ч наблюдается выраженный пик, который привел к расхождению оценок $\langle r_s^{(tot)} \rangle_{SP}$ и $\langle r_s^{(tot)} \rangle_{CE}$, полученных по данным двух приборов. Отмеченный пик в поведении среднего радиуса $\langle r_s^{(tot)} \rangle_{CE}$ обусловлен значительным провалом на кривой 2 (см. рис. 10, а), описывающей зависимость параметра $V_{CE}^{(f)}$. Это привело к увеличению относительного вклада частиц грубодисперсной фракции в суммарном объеме аэрозоля и смещению среднего радиуса $\langle r_s^{(tot)} \rangle_{CE}$ в область более крупных размеров.

Заключение

Нами проведено сравнение спектральных зависимостей АОТ и параметров микроструктуры аэрозоля, восстановленных из решения обратной задачи по данным, полученным с помощью солнечных фотометров SP-6 и CE-318. В качестве анализируемых микроструктурных параметров были рассмотрены объемная концентрация и средний радиус частиц с разделением на субмикронную и грубодисперсную фракции. Измерительная аппаратура располагалась на одной площадке. Совместные наблюдения проводились в июле–октябре 2003 г. и мае–июне 2004 г.

При сравнении результатов выполнялось их предварительное усреднение на часовом, суточном и месячном интервалах. Продолжительность анализируемого периода для среднесуточных данных составила 1 мес. Сравнение среднечасовых данных проводилось в течение дня.

Для соблюдения синхронности при обработке результатов рассматривались только те данные, полученные с помощью двух приборов, расхождение по времени между которыми не превышало 1 ч. В итоге была достигнута высокая степень взаимной согласованности спектральных измерений АОТ. В частности, разность среднесуточных значений АОТ на длине волны 0,5 мкм за весь период наблюдений, проводимых двумя приборами, не превышала 0,008.

Наилучшее согласие результатов обращения установлено при оценке объемной концентрации субмикронного аэрозоля. При изменении среднесуточных значений $V^{(f)}$ в диапазоне от 0,017 до 0,027 см³/м² максимальное расхождение составляет 0,002 см³/м², или около 10%.

Обращение данных фотометра SP-6 приводит к более высоким значениям суммарной объемной концентрации аэрозоля, а также его грубодисперсной фракции. Отношение среднесуточных значений $\langle V^{(c)} \rangle_{SP} / \langle V^{(c)} \rangle_{CE}$ изменяется в диапазоне от 1,2 до 2,1 раза. При этом наблюдается синхронность в изменчивости среднесуточных значений $\langle V^{(tot)} \rangle_{SP}$ ($\langle V^{(c)} \rangle_{SP}$) и $\langle V^{(tot)} \rangle_{CE}$ ($\langle V^{(c)} \rangle_{CE}$). Возможной причиной наблюдаемых различий может быть использование измерений на длинах волн ИК-диапазона (до 4 мкм) при обращении данных фотометра SP-6, которые отсутствуют во втором фотометре.

Отличительной особенностью результатов, полученных на всех масштабах усреднения, являются более высокие значения среднего радиуса субмикронных частиц, восстановленные по данным фотометра CE-318. Для среднесуточных данных сдвиг составляет от 0,11 до 0,14–0,15 мкм, что указывает на более высокую долю частиц радиусом менее 0,1 мкм в результатах, восстановленных при обращении данных фотометра SP-6.

Оценки среднего радиуса частиц для грубодисперсной фракции и для полного ансамбля по данным двух приборов различаются незначительно. Расхождение между среднесуточными значениями $\langle r_s^{(c)} \rangle_{SP}$ и $\langle r_s^{(c)} \rangle_{CE}$ в течение одного рассматриваемого месяца (июль 2004 г.) носит знакопеременный характер при их близких среднесуточных величинах, равных 2,0 и 2,2 мкм. Восстановленные значения среднего радиуса частиц для полного ансамбля отличаются не более чем на 0,04 мкм при изменении среднесуточных величин в пределах 0,24–0,28 мкм.

С учетом различий в характере и объеме данных, получаемых с помощью фотометров SP-6 и CE-318, используемых алгоритмов решения обратной задачи, неполной синхронности при проведении наблюдений результаты сравнения оптических и микроструктурных параметров в целом свидетельствуют об их удовлетворительном согласии и непротиворечивости.

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

1. Кабанов Д.М., Сакерин С.М., Турчинович С.А. Солнечный фотометр для научного мониторинга (аппаратура, методики, алгоритмы) // Оптика атмосф. и океана. 2001. Т. 14, № 12. С. 1162–1169.
2. 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.
3. Кабанов Д.М., Веретенников В.В., Воронина Ю.В., Сакерин С.М., Турчинович Ю.С. Информационная система для сетевых солнечных фотометров // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 1. С. 61–67.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
 7. Веретенников В.В., Меньщикова С.С. Особенности восстановления микроструктурных параметров аэрозоля из измерений аэрозольной оптической толщины. II. Результаты обращения // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 4. С. 313–324.
 8. Веретенников В.В., Меньщикова С.С. Изменчивость микроструктурных параметров аэрозоля в течение года по результатам обращения спектральных измерений аэрозольной оптической толщины // Оптика атмосф. и океана. Физ. атмосферы: Сб. докл. XIX Междунар. симпоз. [Электронный ресурс]. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2013. С. 62–65. 1CD-ROM.
 9. Сакерин С.М., Веретенников В.В., Журавлева Т.Б., Кабанов Д.М., Насрtdинов И.М. Сравнительный анализ радиационных характеристик аэрозоля в ситуациях дымов пожаров и обычных условиях // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 6. С. 451–461.
 10. 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.
 11. Веретенников В.В., Меньщикова С.С. Микрофизическая экстраполяция в задаче обращения аэрозольной оптической толщины // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 4. С. 880–886.
 12. Смеркалов В.А. Прикладная оптика атмосферы. СПб.: Гидрометеониздат, 1997. 334 с.
 13. Tunved P., Hansson H.-C., Kulmala M., Aalto P., Viisanen Y., Karlsson H., Kristensson A., Swietlicki E., Dal Maso M., Ström J., Komppula M. One year boundary layer aerosol size distribution data from five nordic background stations // Atmos. Chem. Phys. 2003. V. 3, N 6. P. 2183–2205.
 14. Hussein T., Puustinen A., Aalto P.P., Mäkelä J.M., Hämeri K., Kulmala M. Urban aerosol number size distributions // Atmos. Chem. Phys. 2004. V. 4, N 2. P. 391–411.
 15. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д. Суточный ход концентрации микродисперсной фракции аэрозоля // Оптика атмосф. и океана. 2000. Т. 13, № 11. С. 983–990.
 16. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д. Исследование дисперсного состава аэрозоля в периоды весенней дымки и лесных пожаров // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 6. С. 468–477.
 17. Asmi A., Wiedensohler A., Laj P., Fjaeraa A.-M., Sellegri K., Birmili W., Weingartner E., Baltensperger U., Zdimal V., Zikova N., Putaud J.-P., Marinoni A., Tunved P., Hansson H.-C., Fiebig M., Kivekäs N., Lihavainen H., Asmi E., Ulevicius V., Aalto P.P., Swietlicki E., Kristensson A., Mihalopoulos N., Kalivitis N., Kalapou I., Kiss G., de Leeuw G., Henzing B., Harrison R.M., Beddows D., O'Dowd C., Jennings S.G., Flentje H., Weinhold K., Meinhardt F., Ries L., Kulmala M. Number size distributions and seasonality of submicron particles in Europe 2008–2009 // Atmos. Chem. Phys. 2011. V. 11, N 11. P. 5505–5538.
 18. Рахимов Р.Ф., Козлов В.С., Тумаков А.Г., Шмаргунов В.П. Оптические и микрофизические свойства смешанного дыма по данным поляризационных спектро-нефелометрических измерений // Оптика атмосф. и океана. 2014. Т. 27, № 1. С. 59–68.
 19. 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 спектро-нефелометрических измерений // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27, № 2. С. 126–133.

V.V. Veretennikov, S.S. Men'shchikova, D.M. Kabanov, S.M. Sakerin. Optical-microphysical properties of atmospheric aerosol from SP-6 and CE-318 sun photometers data.

The results of comparisons of synchronous aerosol optical depth measurements made using sun photometers SP-6 and CE-318 and microstructure parameters recovered by solution of the inverse problem are presented. Measurements were carried out in Tomsk during a year. The volume concentration integrated over the whole depth of the atmosphere, and mean particle radius are considered as microstructure parameters. These parameters are evaluated for the total ensemble of particles and for fine and coarse aerosol fractions separately. We have shown satisfactory agreement between the compared parameters. Possible reasons for discovered discrepancies are discussed.