

УДК 551.501.793

Восстановление микроструктуры аэрозоля из измерений ослабления света в атмосфере при ограничении спектрального диапазона

В.В. Веретенников, С.С. Меньщикова*

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

Поступила в редакцию 7.07.2015 г.

Исследовано влияние верхней границы спектрального диапазона λ_{\max} , в котором проводятся измерения пропускания атмосферы, на результаты восстановления параметров микроструктуры аэрозоля при решении обратной задачи солнечной фотометрии по данным численного моделирования и натурных экспериментов. В численном эксперименте использована модель аэрозоля, образованного субмикронной (f) и грубодисперсной (c) фракциями частиц. Величина λ_{\max} выбиралась в интервале от 1,052 до 3,973 мкм. Для решения обратной задачи применялся метод интегральных распределений. Показано, что при ограничении спектрального интервала происходит недооценка вклада больших частиц в аэрозольном распределении. В частности, при $\lambda_{\max} = 1,246$ мкм на фоне уменьшения объемной концентрации аэрозоля (до 18% при $\lambda_{\max} = 1,246$ мкм) потери при восстановлении концентрации частиц c -фракции могут достигать 42%.

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

Введение

Согласно современным представлениям атмосферный аэрозоль является суперпозицией отдельных фракций, которые различаются по способу образования, размеру, форме и химическому составу частиц, их роли в физических процессах, происходящих в атмосфере, путям удаления из атмосферы. В реальной атмосфере размеры аэрозольных частиц могут варьировать в широком диапазоне: от нанометрового до субмиллиметрового. Массовая (объемная) концентрация атмосферного аэрозоля с разделением на две основные фракции указана в числе ключевых параметров аэрозоля, выделенных в качестве приоритетных для наблюдений в глобальной наземной сети по программе WMO/GAW [1].

Определение дисперсного состава аэрозоля оптическими методами основано на решении обратной задачи аэрозольного светорассеяния, одним из этапов которой обычно является оценка вклада частиц разных фракций в суммарную концентрацию (счетную или объемную). При изучении состава аэрозоля спектрофотометрическими методами часто ограничиваются рассмотрением субмикронной и грубодисперсной фракций частиц (см., например [2, 3]). Однако в отдельных случаях удается также выделить промежуточную, среднедисперсную фракцию [4, 5].

Качественное представление о соотношении в аэрозоле субмикронных и грубодисперсных частиц дает анализ поведения показателя Ангстрема [6] для спектральной зависимости аэрозольного коэффициента ослабления или оптической толщины. Существуют методики разделения вклада частиц двух фракций в ослабление света без решения обратной задачи, основанные на аппроксимационной формуле Ангстрема и различных ее модификациях [7–9]. Оригинальный метод статистического разделения аэрозольного ослабления оптического излучения на субмикронную и грубодисперсную компоненты разработан в [10].

Известно, что спектральные характеристики ослабления излучения аэрозолем наиболее информативны относительно частиц, размеры которых близки к длине волны света. Для повышения информационного содержания методов солнечной фотометрии по определению микрофизических свойств атмосферного аэрозоля необходимо адекватное расширение спектрального интервала измерений, что технически не всегда осуществимо. Кроме того, выбор спектрального интервала в реальной атмосфере определяется окнами прозрачности атмосферы.

К настоящему времени создано несколько глобальных международных и национальных сетей, осуществляющих мониторинг аэрозольной оптической толщины (АОТ) с использованием серийно выпускаемых солнечных фотометров. Большая часть используемых в сетях фотометров работает в коротковолновой области спектра. Например, глобальная

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

сеть AERONET [11], включающая в себя более 650 станций, создана на базе солнечного фотометра CE-318 [12], предназначенного для измерения спектрального пропускания атмосферы на восьми длинах волн λ в диапазоне 0,34–1,02 мкм. Прецизионный фильтровый радиометр PFR [13] имеет четыре измерительных канала, рекомендованных Всемирной метеорологической организацией (WMO) для определения АОТ в диапазоне $\lambda = 0,37\text{--}0,86$ мкм. Более широкий спектральный диапазон (0,315–2,2 мкм) охватывает Sky-радиометр POM-02 [14], который используется в сети SKYNET [15].

В ИОА СО РАН разработана серия многоволновых солнечных фотометров типа SP [16–18], с помощью которых проводятся регулярные измерения АОТ начиная с 1989 г. Автоматизированный фотометр SP-6 [17] предназначен для измерения вертикальной прозрачности атмосферы в 18 спектральных участках в широком диапазоне длин волн 0,3–4 мкм. В более поздних разработках – SP-9 и SPM [18] – верхняя граница измерительного диапазона уменьшена до 2,2 мкм. Для проведения круглосуточных измерений прозрачности приземного слоя атмосферы в диапазоне $\lambda = 0,44\text{--}4,65$ мкм создан многоволновой трассовый фотометр МТФ [19].

Видно, что фотометры, используемые для определения АОТ, различаются как по числу длин волн, на которых проводятся измерения, так и по их расположению по спектру, особенно в длинноволновой области. Это может послужить причиной расхождений в оценке микрофизических свойств аэрозоля из измерений, полученных разными приборами.

Проблема информативности измерений АОТ в коротковолновой области спектра относительно микродисперсных частиц рассматривалась в [20, 21]. Показано, что при переходе к микродисперсным частицам зависимость АОТ от среднего размера и геометрического сечения таких частиц приобретает мультипликативную форму. Как следствие, спектральные измерения АОТ допускают неоднозначную интерпретацию в отношении микроструктуры частиц с радиусом менее 0,1–0,15 мкм и их вклада в объемную концентрацию субмикронных частиц.

Измерения ослабления света, прошедшего дисперсную среду, содержащую частицы, размеры которых намного превышают длину волны оптического излучения, являются малоинформативными относительно функции распределения по размерам таких частиц. Причина этого заключается в фундаментальной особенности коэффициента ослабления, который с увеличением размера частицы приближается к величине ее удвоенного поперечного сечения [22]. Как следствие, в пределе в оптических измерениях будет содержаться информация только о суммарном геометрическом сечении больших частиц.

Указанное обстоятельство может оказаться источником неоднозначности в оценке параметров микроструктуры грубодисперсного аэрозоля при вариациях верхней границы λ_{\max} спектрального диапазона измерений. Более определенное заключение об информационном содержании спектральных измерений АОТ относительно больших частиц

можно получить в результате численного моделирования.

В настоящей статье рассмотрено влияние положения максимальной длины волны λ_{\max} , на которой выполнены измерения спектрального пропускания атмосферы, на результаты восстановления параметров микроструктуры субмикронной и грубодисперсной фракций аэрозоля при решении обратной задачи солнечной фотометрии по данным численного моделирования и натурных экспериментов.

1. Метод решения обратной задачи и результаты численного моделирования

Для восстановления микроструктуры аэрозоля был применен численный алгоритм обращения спектральных измерений АОТ $\tau(\lambda)$ [23], который базируется на использовании интегральной функции распределения частиц по размерам. В качестве искомой функции в алгоритме [23] рассматривается функция распределения $S(r)$, определяющая суммарное геометрическое сечение частиц радиусом, большим или равным r . Характеризация дисперсного состава аэрозоля с помощью интегральных распределений 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 регуляризирующих процедур. Располагая данными о функции распределения $S(r)$, можно рассчитать объемную концентрацию $V_{\alpha\beta}$ и средний радиус частиц $\bar{r}_{\alpha\beta}$ на любом отрезке $\alpha \leq r \leq \beta$, принадлежащем области определения функции $S(r)$, по формулам

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

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

При численном моделировании для решения прямой и обратной задачи выбирались аэрозольные распределения, которые соответствовали среде, образованной двумя фракциями частиц – субмикронной и грубодисперсной (см. подробности в [24]). В качестве модели субмикронной фракции аэрозоля рассматривалась дымка H [25], а дисперсный состав грубодисперсного аэрозоля был задан в виде широкого логнормального распределения. Верхняя граница размеров частиц составляла 4,15 мкм. Условная граница между фракциями располагалась в точке $r = 0,55$ мкм. За счет вариаций микроструктурных параметров отдельных фракций и соотношения между их вкладами в суммарный ансамбль частиц обеспечивалось разнообразие аэрозольных моделей. Комплексный показатель преломления аэрозоля задавался постоянным по спектру, одинаковым для обеих фракций и равным $1,5 - i \cdot 0$.

На рис. 1 представлены результаты восстановления интегральной функции распределения по размерам $S(r)$ из спектральных измерений АОТ $\tau(\lambda)$ при различном выборе максимальной длины волны λ_{\max} . Кривая 1 описывает точную функцию распределения $S(r)$. Для рассматриваемой модели относительная доля частиц грубодисперсной фракции составляет около 20% в геометрическом сечении и 54% в суммарном объеме.

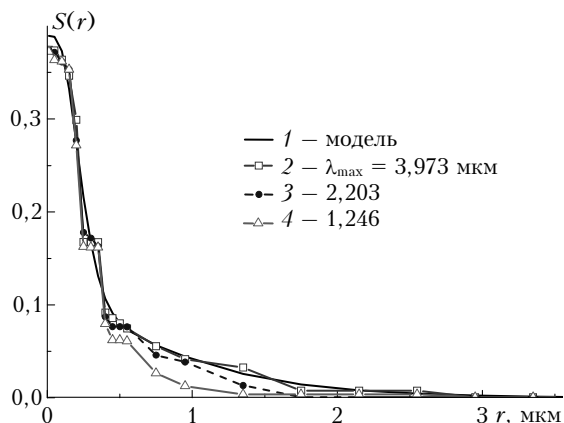


Рис. 1. Аэрозольные распределения $S(r)$, восстановленные в численном эксперименте при решении обратной задачи для спектральных измерений АОТ $\tau(\lambda)$ при вариациях максимальной длины волны λ_{\max}

Видно, что с уменьшением λ_{\max} происходит перестройка дисперсного состава в восстановленных распределениях при сохранении практически неизменным полного геометрического сечения частиц. Наиболее заметным оказывается уменьшение содержания частиц грубодисперсной фракции.

Для количественной оценки влияния λ_{\max} на точность решения обратной задачи в табл. 1 приведены значения восстановленных микроструктурных параметров субмикронной (f) и грубодисперсной (c) фракций аэрозоля и полного ансамбля (tot).

Из представленных в табл. 1 данных следует, что влияние λ_{\max} в наибольшей степени отражается

на микроструктурных параметрах частиц грубодисперсной фракции. При $\lambda_{\max} = 1,052$ мкм сечение $S^{(c)}$ понижается на 20%. Недобор в сечении частиц грубодисперсной фракции частично компенсируется за счет увеличения вклада в полное геометрическое сечение субмикронного аэрозоля.

Влияние λ_{\max} при решении обратной задачи более выражено в изменчивости объемной концентрации частиц. На фоне общего понижения объемного содержания аэрозоля (до 18%) потери при восстановлении параметра $V^{(c)}$ могут достигать 42% ($\lambda_{\max} = 1,246$ мкм). Одновременно уменьшается относительное содержание грубодисперсного аэрозоля в суммарном объеме частиц с 54 до 41 – 44%.

Отмеченные тенденции находят отражение в поведении среднего радиуса аэрозольных частиц. Средний радиус частиц грубодисперсной фракции $r_s^{(c)}$ снижается с 1,3 до 0,9 мкм, или на 30%. При этом уменьшение λ_{\max} не влияет на результаты определения размеров субмикронных частиц, их средний радиус остается в пределах 0,25–0,26 мкм. Наконец, вследствие уменьшения объемной концентрации грубодисперсных частиц и их среднего радиуса происходит сдвиг оценки среднего радиуса частиц полного ансамбля с 0,45 до 0,36 мкм.

Примечательно, что, несмотря на заметную разницу в микроструктурных параметрах, восстановленных при вариациях λ_{\max} , спектральные зависимости АОТ, рассчитанные по восстановленным распределениям $S(r)$, практически совпадают с модельным поведением функции $\tau(\lambda)$ на спектральных интервалах, в пределах которых решалась обратная задача. Для спектрального диапазона 0,37–3,973 мкм зависимость АОТ $\tau(\lambda)$, соответствующая рассматриваемой аэрозольной модели (кривая 1 на рис. 1), изображена кривой 1 на рис. 2.

Кривые 2–5 на рис. 2 представляют собой спектральные зависимости АОТ, рассчитанные по восстановленным интегральным распределениям. Вертикальными линиями на рис. 2 (2'–5') отмечены правые границы спектральных диапазонов, на

Таблица 1

Микроструктурные параметры аэрозоля, восстановленные по результатам обращения АОТ $\tau(\lambda)$ в численном эксперименте в зависимости от выбора λ_{\max}

Параметр	Точные данные	λ_{\max}			
		3,973 мкм	2,203 мкм	1,246 мкм	1,052 мкм
$S^{(tot)}$	0,389	0,374	0,374	0,373	0,364
$S^{(f)}$	0,316	0,299	0,298	0,312	0,306
$S^{(c)}$	0,073	0,075	0,076	0,061	0,058
$V^{(tot)}$, $\text{см}^3/\text{м}^2$	0,232	0,229	0,203	0,179	0,191
$V^{(f)}$, $\text{см}^3/\text{м}^2$	0,106	0,103	0,100	0,106	0,107
$V^{(c)}$, $\text{см}^3/\text{м}^2$	0,126	0,126	0,102	0,073	0,084
$r_s^{(tot)}$, мкм	0,447	0,460	0,406	0,361	0,393
$r_s^{(f)}$, мкм	0,251	0,258	0,252	0,255	0,262
$r_s^{(c)}$, мкм	1,295	1,270	1,008	0,902	1,093

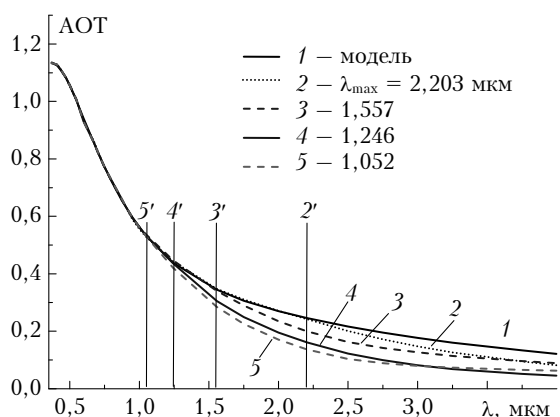


Рис. 2. Спектральные зависимости $\tau(\lambda)$, рассчитанные по аэрозольным распределениям, восстановленным при решении обратной задачи для различных λ_{\max}

которых решалась обратная задача. Видно, что расхождение между модельной кривой 1 и функциями $\tau(\lambda)$, рассчитанными по восстановленному решению, становится заметным при экстраполяции функции $\tau(\lambda)$ за верхнюю границу того спектрального интервала, на котором получено решение обратной задачи. При $\lambda > \lambda_{\max}$ наблюдается более быстрый спад восстановленных зависимостей $\tau(\lambda)$ по сравнению с модельной кривой 1. Ключевым фактором, обуславливающим наблюдаемые особенности в поведении $\tau(\lambda)$, является недооценка вклада больших частиц при решении обратной задачи на ограниченном спектральном интервале. Полученные выводы сохраняют силу при переходе к другим микроструктурным моделям.

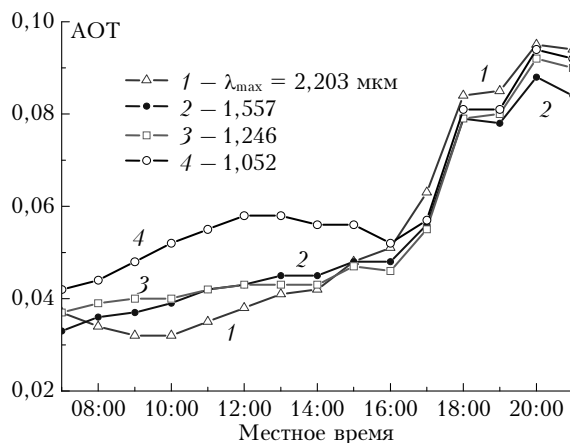
2. Результаты обращения данных натуральных экспериментов

2.1. Общая характеристика массива исходных экспериментальных данных

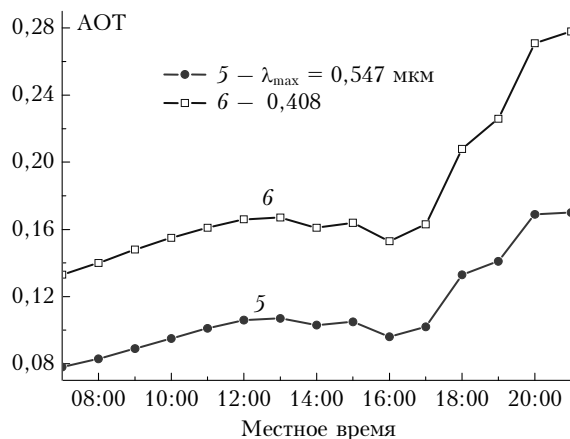
Рассмотрим влияние ограничения спектрального диапазона на результаты обращения данных натуральных измерений АОТ, полученных Сакериным и Кабановым с помощью солнечного фотометра SP-6 [17] на 13 длинах волн в спектральном диапазоне 0,371–3,973 мкм. Для анализа были выбраны среднечасовые реализации АОТ $\tau(\lambda)$, полученные на протяжении одного летнего дня (09.06.2004 г.) в Томске. Так же как и при численном моделировании, измеренные зависимости АОТ при обращении ограничивались по спектру сверху.

На рис. 3, а представлен дневной ход среднечасовых зависимостей АОТ $\tau(\lambda)$ на длинах волн, выбранных в качестве верхней границы λ_{\max} спектрального диапазона, на котором находилось решение обратной задачи. Общей чертой рассматриваемых зависимостей является квазимонотонный рост в течение дня (при $\lambda \geq 1,246$ мкм) с локальным минимумом в окрестности 16 ч. Для сравнения на

рис. 3, б показано поведение АОТ в коротковолновой области спектра, где наблюдается формирование локального максимума при $t = 12-13$ ч, а минимум (16 ч) становится более выраженным. С течением времени, до 16 ч, происходит плавное изменение кривых $\tau(\lambda)$. После 16–17 ч на временных зависимостях АОТ наблюдается крутой подъем при одновременном сближении кривых в ИК-области.



а



б

Рис. 3. Дневной ход среднечасовых измерений АОТ $\tau(\lambda)$ в ИК- (а) и видимой (б) областях спектра по данным солнечного фотометра SP-6 9 июня 2004 г.

Характер спектральных зависимостей $\tau(\lambda)$ в течение дня меняется. Для примера на рис. 4 изображены зависимости $\tau(\lambda)$, отнесенные к $\tau(0,547)$, которые получены для фиксированных моментов времени. Видно, что в коротковолновой области все рассматриваемые кривые практически неразличимы. При переходе в ИК-область становится все более выраженным различие между двумя группами кривых. Первая группа кривых объединяет зависимости, полученные в первой половине дня, до 13 ч. Вторую группу составляют кривые, соответствующие промежутку времени наиболее быстрого изменения АОТ (17–18 ч). Различие между зависимостями, представленными в двух группах, в длинноволновой области достигает 1,7–1,8 раза.

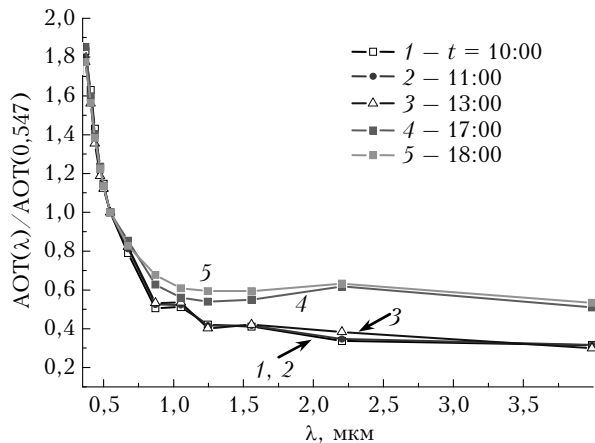


Рис. 4. Спектральные зависимости среднечасовых АОТ в фиксированные моменты времени, нормированные на значение $\tau(0,547)$

2.2. Результаты решения обратной задачи

Представленные спектральные зависимости АОТ послужили исходными данными при решении обратной задачи. Решение обратной задачи находилось для набора значений $\lambda_{\max} = 3,973; 2,203; 1,557; 1,246$ и $1,052$ мкм. Влияние λ_{\max} в наибольшей степени отразилось на результатах восстановления микроструктуры грубодисперсных частиц.

2.2.1. Восстановление объемной концентрации частиц грубодисперсной фракции

На рис. 5 показан дневной ход объемной концентрации частиц с-фракции $V^{(c)}$, восстановленный при вариациях λ_{\max} .

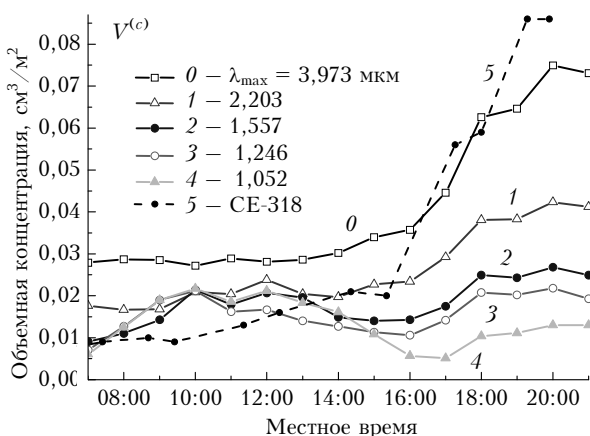


Рис. 5. Дневной ход объемной концентрации грубодисперсной фракции аэрозоля $V^{(c)}(\lambda_{\max})$ по результатам обращения среднечасовых данных фотометра SP-6 при различных значениях верхней границы спектрального диапазона измерений λ_{\max}

Кривая 0, полученная при максимальном значении $\lambda_{\max} = 3,973$ мкм, определяет «неискаженное» поведение параметра $V^{(c)}$ и может рассматриваться в качестве реперной по отношению к зависимостям

при меньших значениях λ_{\max} . Нетрудно заметить, что вид кривой θ подобен временному ходу АОТ в ИК-области спектра (см. рис. 3, а) с плавным увеличением до 16 ч и крутым подъемом на последующем интервале.

Общая тенденция, наблюдаемая при уменьшении λ_{\max} , выражается в убывании объемной концентрации грубодисперсных частиц, происходящем на протяжении всего периода наблюдений. Причем ввиду неравномерности такого убывания характер зависимости параметра $V^{(c)}$ значительно искажается. Если при переходе λ_{\max} от 3,973 к 2,203 мкм сохраняется, по крайней мере, качественное соответствие в поведении кривых θ и 1, то для последующих зависимостей такое подобие постепенно исчезает.

Искажения в зависимостях $V^{(c)}$, восстановленных при $\lambda_{\max} \leq 1,557$ мкм, привели к формированию локального максимума при $t = 10-12$ ч и минимума в промежутке 15-17 ч. Положение указанных экстремумов на кривых $V^{(c)}$ хорошо согласуется с экстремумами на временных зависимостях $\tau(\lambda)$, полученных при $\lambda \leq 1,052$ мкм (см. рис. 3, б). Это косвенно указывает на такую трансформацию микроструктуры аэрозоля, происходящую с уменьшением λ_{\max} , при которой в грубодисперсной фракции в первую очередь теряются самые крупные частицы и увеличивается относительная доля более мелких частиц.

На рис. 6 представлено изменение отношения $\xi^{(c)}(\lambda_{\max}) = V^{(c)}(\lambda_{\max})/V^{(c)}(3,973)$, которое характеризует масштаб искажений параметра $V^{(c)}(\lambda_{\max})$ по отношению к реперному уровню $V^{(c)}(3,973)$. Разность $\eta^{(c)} = 1 - \xi^{(c)}$ определяет относительные потери при восстановлении объемной концентрации грубодисперсных частиц $V^{(c)}$ с уменьшением λ_{\max} .

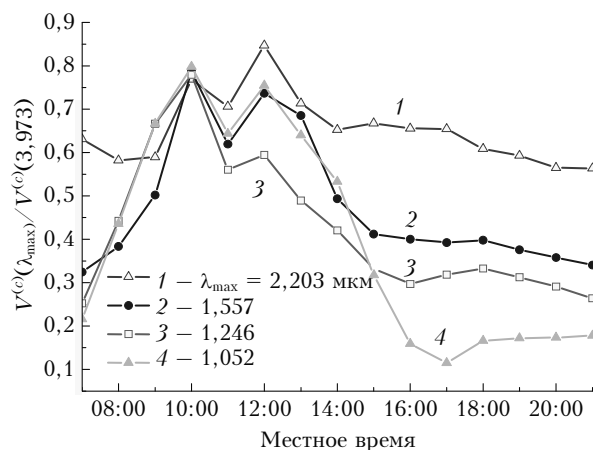


Рис. 6. Влияние выбора λ_{\max} на изменение отношения $V^{(c)}(\lambda_{\max})/V^{(c)}(3,973)$ в течение дня

Как видно из рис. 6, величина искажений $V^{(c)}(\lambda_{\max})$ может меняться в течение дня в широких пределах в зависимости от текущего оптико-микрофизического состояния атмосферы. Оценки $V^{(c)}(\lambda_{\max})$, наиболее близкие к реперным значениям $V^{(c)}(3,973)$, получены в интервале 10-13 ч. Потери при восстановлении $V^{(c)}$ растут с уменьшением λ_{\max} .

Например, при $\lambda_{\max} = 2,203$ мкм величина потерь $\eta^{(c)}$ увеличивается от 0,15 (12 ч) до 0,44 (20–21 ч), в то время как для $\lambda_{\max} = 1,246$ мкм диапазон изменения $\eta^{(c)}$ составляет уже 0,21–0,75.

Величина искажений, которые имеют место при восстановлении параметра $V^{(c)}$, зависит от вклада, который вносят грубодисперсные частицы в суммарную концентрацию аэрозоля. Для примера обратимся к рис. 7, на котором показано поведение отношения $\rho_V = V^{(c)}(3,973)/V^{(tot)}(3,973)$ в течение дня, неискаженное за счет ограничения λ_{\max} (кривая 1, левая шкала). Видно, что в объемном содержании аэрозоля преобладает грубодисперсная фракция частиц. Относительное содержание грубодисперсных частиц заключено в интервале 0,7–0,83. Сравнивая данные, приведенные на рис. 6 и 7, можно отметить, что значения параметра $V^{(c)}(\lambda_{\max})$, наиболее близкие к реперным, достигаются в промежутке 10–12 ч, т.е. в то же время, когда минимально отношение ρ_V . Последующее увеличение доли грубодисперсных частиц в суммарном объеме после 13 ч сопровождается получением все более заниженных оценок $V^{(c)}(\lambda_{\max})$, которые наблюдаются на рис. 6.

Отмеченную тенденцию можно характеризовать количественно, рассмотрев корреляционную связь параметров $\xi^{(c)}(\lambda_{\max})$ и ρ_V . Оценки показывают, что выборочный коэффициент корреляции параметров $\xi^{(c)}(\lambda_{\max})$ и ρ_V отрицательный, а его абсолютное значение изменяется в промежутке 0,67–0,89 при уменьшении λ_{\max} от 2,203 до 1,052 мкм.

Аналогичная временная изменчивость в более выраженной форме наблюдается в поведении параметров, характеризующих геометрическое сечение аэрозольных фракций. На рис. 7 также представлено изменение в течение дня параметра $\rho_S = S^{(c)}(3,973)/S^{(tot)}(3,973)$, определяющего относительный вклад грубодисперсного аэрозоля в суммарное геометрическое сечение частиц (кривая 2, правая шкала). Видно, что в отличие от объемной концентрации в суммарном сечении вклад грубодисперсного аэрозоля уже не является доминирующим.

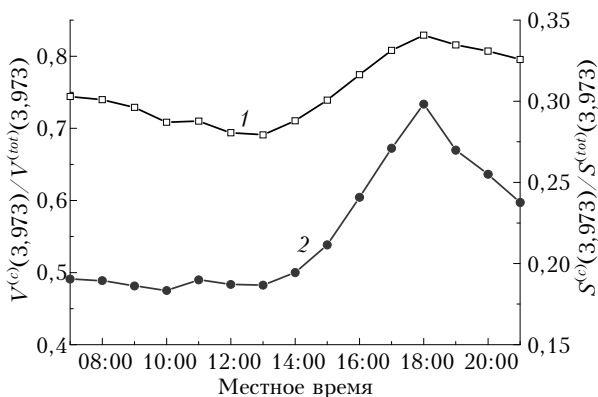


Рис. 7. Дневной ход относительного вклада грубодисперсных частиц в объемную концентрацию аэрозоля $V^{(c)}/V^{(tot)}$ (кривая 1, левая шкала) и суммарное геометрическое сечение $S^{(c)}/S^{(tot)}$ (кривая 2, правая шкала) по результатам обращения данных фотометра SP-6 при $\lambda_{\max} = 3,973$ мкм

В поведении отношения ρ_S выделяются две области: в первой половине дня (до 13 ч) величина ρ_S принимает невысокие значения, слабо изменяясь на уровне 0,18–0,19, а затем вклад в сечение грубодисперсных частиц резко увеличивается более чем на 50%, достигая максимального значения на уровне около 0,3 к 18 ч.

На рис. 8 представлено семейство кривых $\rho_V(\lambda_{\max}) = V^{(c)}(\lambda_{\max})/V^{(tot)}(3,973)$, которые описывают изменение параметра $V^{(c)}(\lambda_{\max})$ в течение дня относительно реперных значений полной объемной концентрации частиц $V^{(tot)}(3,973)$. Кривая 0 на рис. 8, соответствующая $\lambda_{\max} = 3,973$ мкм, воспроизводит ранее рассмотренную на рис. 7 зависимость (кривая 1) и определяет отношение реперных значений соответствующих параметров.

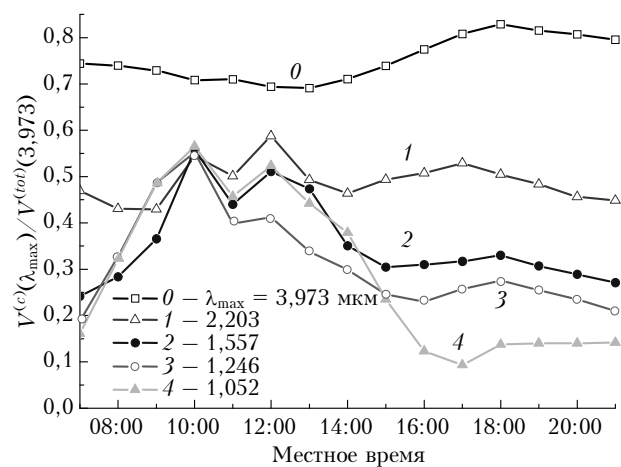


Рис. 8. Изменчивость объемной концентрации грубодисперсных частиц $V^{(c)}(\lambda_{\max})$ относительно полной объемной концентрации $V^{(tot)}(3,973)$

Видно, что с уменьшением λ_{\max} убывает объемная доля грубодисперсных частиц в восстановленных распределениях по отношению к суммарной концентрации частиц в реперных данных. Например, для $\lambda_{\max} = 2,203$ мкм диапазон изменения ρ_V составляет 0,43–0,59. Если в реперных данных параметр ρ_V достигает уровня 0,83, то при $\lambda_{\max} = 1,246$ мкм он может упасть до 0,19.

Диапазон изменения отношения $\rho_V(\lambda_{\max})$ варьирует в течение дня в широких пределах. Если сравнить зависимости, представленные на рис. 6 и 8, то можно заметить подобие в поведении кривых, соответствующих одинаковым значениям λ_{\max} . Чтобы понять, почему это происходит, рассмотрим соотношение, связывающее рассматриваемые зависимости:

$$\rho_V(\lambda_{\max}) = \xi^{(c)}(\lambda_{\max})\rho_V(3,973). \quad (3)$$

Анализ временной изменчивости величин, входящих в (3), удобно проводить, переходя к их логарифмам: $w = \lg[\rho_V(\lambda_{\max})]$, $u = \lg[\xi^{(c)}(\lambda_{\max})]$, $v = \lg[\rho_V(3,973)]$. В табл. 2 представлены статистические параметры, характеризующие изменчивость величин w и u в течение дня при различных λ_{\max} . Дисперсия σ_v^2 не зависит от λ_{\max} и равна $7,5 \cdot 10^{-4}$.

В последнем столбце приведены значения коэффициента корреляции R_{uv} величин u и v .

Таблица 2

Оценки статистических параметров относительной концентрации $w = \lg[\rho_V(\lambda_{\max})]$ и $u = \lg[\xi^{(c)}(\lambda_{\max})]$ грубодисперсных частиц

λ_{\max} , МКМ	σ_w^2	σ_u^2	R_{uv}
2,203	0,0014	0,0026	-0,69
1,557	0,012	0,016	-0,77
1,246	0,019	0,024	-0,73
1,052	0,075	0,090	-0,92

Учитывая связь между дисперсиями

$$\sigma_w^2 = \sigma_u^2 + \sigma_v^2 + R_{uv}\sigma_u\sigma_v, \quad (4)$$

на основании данных табл. 2 можно сделать вывод о том, что восстановленная дневная изменчивость величины w , а вместе с ней и изменчивость относительной концентрации грубодисперсной фракции $\rho_V(\lambda_{\max})$ формируются преимущественно за счет изменчивости величины u (или параметра $\xi^{(c)}(\lambda_{\max})$), частично скомпенсированной за счет отрицательной корреляционной связи между u и v .

2.2.2. Восстановление среднего радиуса частиц грубодисперсной фракции

Средний радиус частиц является одним из важнейших интегральных параметров, характеризующих микрофизические свойства аэрозоля. Поэтому, дополняя исследования по восстановлению объемной концентрации частиц грубодисперсной фракции, рассмотрим также влияние ограничения λ_{\max} на определение их среднего радиуса $r_s^{(c)}$.

На рис. 9 представлен дневной ход параметра $r_s^{(c)}(\lambda_{\max})$, восстановленный по результатам решения обратной задачи при различных значениях λ_{\max} . Как и ранее, будем рассматривать в качестве реперных данные, полученные при $\lambda_{\max} = 3,973$ МКМ (кривая 0).

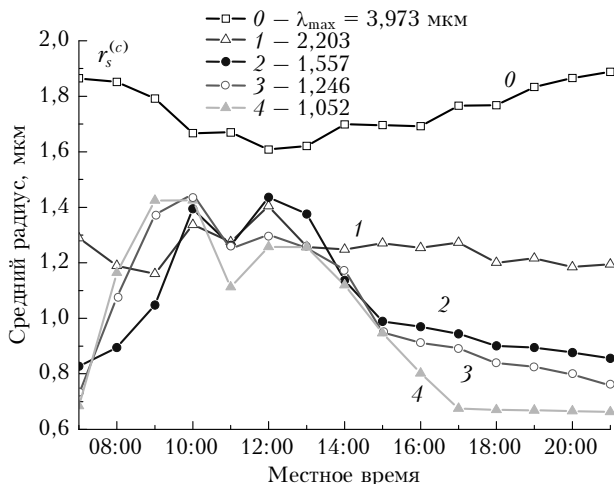


Рис. 9. Дневной ход среднего радиуса частиц грубодисперсной фракции $r_s^{(c)}$, восстановленный по результатам обращения данных фотометра SP-6 при различных λ_{\max}

Отметим основные черты в изменчивости параметра $r_s^{(c)}$, представленные кривой 0. Средний радиус $r_s^{(c)}(3,973)$ плавно изменяется в течение дня в диапазоне 1,6–1,9 мкм, принимая минимальные значения в период 12–13 ч. Положение указанного минимума совпадает с периодом формирования локального максимума на зависимостях АОТ в коротковолновой области спектра (рис. 3, б) и локального минимума параметра $\rho_V(\lambda_{\max})$ (рис. 8, кривая 0), который характеризует относительное содержание грубодисперсных частиц. Таким образом, период 12–13 ч в целом отличается повышенной «мелкодисперсностью», которая выражается в минимальном объемном вкладе грубодисперсных частиц в сочетании с их минимальным средним радиусом.

Результаты восстановления параметра $r_s^{(c)}(\lambda_{\max})$, полученные при меньших значениях λ_{\max} , кардинально отличаются от реперных данных. Уже при $\lambda_{\max} = 2,203$ МКМ в поведении параметра $r_s^{(c)}$ (кривая 1) не сохраняются особенности дневного хода. Дневная зависимость $r_s^{(c)}(2,203)$ смещена вниз относительно реперной кривой в среднем на 0,5 мкм.

При дальнейшем уменьшении λ_{\max} изменяется также и качественный вид временной зависимости $r_s^{(c)}$. Более близкими к реперным остаются значения $r_s^{(c)}$ в промежутке 10–13 ч, совпадающем с аналогичным промежутком, который был установлен при анализе временного хода объемной концентрации $V^{(c)}(\lambda_{\max})$ (см. рис. 6). За пределами указанного временного отрезка величина $r_s^{(c)}$ круто падает, опускаясь, например, при $\lambda_{\max} = 1,246$ МКМ до 0,76 мкм к концу периода наблюдений в 21 ч, что свидетельствует о практическом слиянии грубодисперсной и субмикронной фракций при уменьшении λ_{\max} .

2.2.3. Восстановление среднего радиуса полного ансамбля

Как было отмечено ранее, выбор λ_{\max} в первую очередь отражается на восстановлении микроструктуры грубодисперсного аэрозоля. Поэтому при анализе поведения среднего радиуса частиц полного ансамбля $r_s^{(tot)}$ целесообразно использовать его представление в виде взвешенной суммы средних радиусов субмикронной $r_s^{(f)}$ и грубодисперсной $r_s^{(c)}$ фракций:

$$r_s^{(tot)} = (1 - \rho_S)r_s^{(f)} + \rho_S r_s^{(c)}, \quad (5)$$

где $\rho_S = S^{(c)}/S^{(tot)}$ – весовой коэффициент, равный относительной доле грубодисперсного аэрозоля в суммарном геометрическом сечении аэрозоля.

Результаты расчета параметра $r_s^{(tot)}$ представлены на рис. 10. Кривая 0 соответствует реперным данным, полученным при $\lambda_{\max} = 3,973$ МКМ. Характерными чертами временной зависимости $r_s^{(tot)}(3,973)$ являются минимальные значения на уровне 0,43 мкм в области 10–12 ч и последующее монотонное

увеличение до 0,64 мкм к 18 ч. Нетрудно заметить, что реперная кривая 0 на рис. 10 подобна зависимости весового коэффициента $\rho_S(3,973)$, изображенной на рис. 7 (кривая 2).

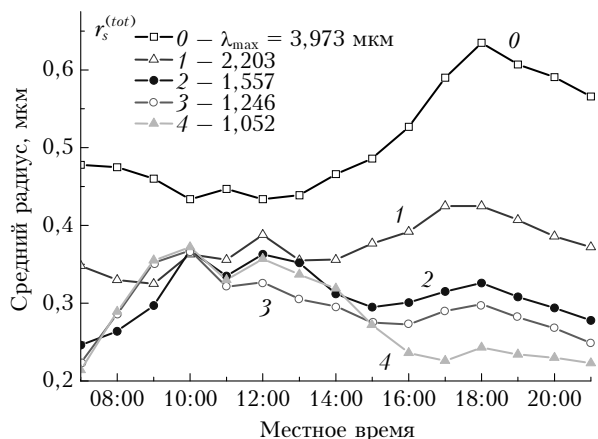


Рис. 10. Дневной ход среднего радиуса частиц полного ансамбля $r_s^{(tot)}$, восстановленный по результатам обращения данных фотометра SP-6 при различных значениях λ_{max}

Таким образом, можно предположить, что соотношение между геометрическими сечениями субмикронного и грубодисперсного аэрозоля является определяющим фактором в изменчивости среднего радиуса частиц в полном ансамбле. Это также подтверждается высоким значением коэффициента корреляции параметров $r_s^{(tot)}$ и ρ_S , равным 0,975 для $\lambda_{max} = 3,973$ мкм.

При $\lambda_{max} = 2,203$ мкм временная зависимость $r_s^{(tot)}(\lambda_{max})$ в целом сохраняет качественные признаки реперной кривой 1 (низкие значения в первой половине дня, монотонный рост с 13 до 18 ч), однако сдвинута ниже в среднем на 0,14 мкм. Дальнейшее ограничение λ_{max} приводит к еще большему искажению $r_s^{(tot)}(\lambda_{max})$, обусловленным двумя факторами: уменьшением среднего радиуса грубодисперсных частиц $r_s^{(c)}(\lambda_{max})$ на фоне падения их относительной концентрации. В результате, например, нарушается монотонное увеличение $r_s^{(tot)}(\lambda_{max})$ в промежутке 13–18 ч. При $\lambda_{max} = 1,557$ мкм в 18 ч величина $r_s^{(tot)}(1,557)$ составляет всего половину реперного значения.

Динамика среднего радиуса $r_s^{(tot)}(\lambda_{max})$ имеет сходство с поведением параметра $\rho_V(\lambda_{max})$, наблюдаемым на рис. 8 при одинаковых значениях λ_{max} . Коэффициент корреляции параметров $r_s^{(tot)}(\lambda_{max})$ и $\rho_V(\lambda_{max})$ изменяется в диапазоне 0,914–0,985. Таким образом, средний радиус частиц $r_s^{(tot)}$ может служить индикатором изменчивости соотношения между грубодисперсной и субмикронной фракциями аэрозоля.

Заключение

Нами исследовано влияние верхней границы спектрального диапазона λ_{max} измерений АОТ на результаты восстановления параметров микро-

структуры аэрозоля при решении обратной задачи солнечной фотометрии по данным численного моделирования и натуральных экспериментов. В качестве параметров микроструктуры рассматривались объемная концентрация, геометрическое сечение и средний радиус аэрозольных частиц с разделением на субмикронную и грубодисперсную фракции.

Для обращения спектральных измерений АОТ использовался численный алгоритм, основанный на методе интегральных распределений. Обратная задача решалась для набора значений $\lambda_{max} = 3,973; 2,203; 1,557; 1,246$ и $1,052$ мкм. Результаты, полученные для максимальной длины волны $\lambda_{max} = 3,973$ мкм, рассматривались в качестве реперных, с которыми проводилось сравнение результатов для других длин волн.

Показано, что при ограничении спектрального интервала сверху происходит недооценка вклада больших частиц в аэрозольных распределениях. В частности, в численном эксперименте при $\lambda_{max} = 1,246$ мкм оценка объемной концентрации частиц грубодисперсной фракции $V^{(c)}$ уменьшилась на 42% при одновременном уменьшении их среднего радиуса с 1,3 до 0,9 мкм.

При обработке данных натуральных экспериментов, полученных с помощью солнечного фотометра SP-6 в течение одного дня в Томске, потери при восстановлении параметра $V^{(c)}$ изменялись в широких пределах в зависимости от текущего оптико-микрофизического состояния атмосферы и составляли от 15 до 44% при $\lambda_{max} = 2,203$ мкм, увеличиваясь до 21–75% для $\lambda_{max} = 1,246$ мкм. Установлено, что потери при оценке объемной концентрации грубодисперсных частиц увеличиваются с ростом их относительного содержания в текущем объеме аэрозоля.

С уменьшением λ_{max} в грубодисперсной фракции в первую очередь теряются самые крупные частицы и увеличивается относительная доля более мелких частиц, что приводит к уменьшению среднего радиуса частиц грубодисперсной фракции. В частности, для $\lambda_{max} = 2,203$ мкм такое уменьшение составило примерно 0,5 мкм при среднем за период наблюдений значении $\langle r_s^{(c)} \rangle = 1,75$ мкм.

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

1. GAW Report, 153. WMO/GAW aerosol measurement procedures: guidelines and recommendations. 2003. (WMO TD No. 1178). 67 p.
2. Веретенников В.В. Интерпретация модели спектрального ослабления дымки морского прибрежного района // Оптика атмосф. и океана. 1990. Т. 3, № 10. С. 1026–1033.
3. Веретенников В.В. О влиянии ветра на оптико-микрофизические характеристики дымки морского прибрежного района // Оптика атмосф. и океана. 1991. Т. 4, № 4. С. 339–346.
4. Рахимов Р.Ф., Сакерин С.М., Макиенко Э.В., Кабанов Д.М. Интерпретация аномальной спектральной зависимости аэрозольной оптической толщи атмосферы. Часть II. Особенности дисперсной структуры аэ-

- розоля // Оптика атмосф. и океана. 2000. Т. 13, № 9. С. 819–825.
5. Макиенко Э.В., Рахимов Р.Ф., Пхалагов Ю.А., Ужegov В.Н. Микрофизическая интерпретация аномальной спектральной зависимости аэрозольного ослабления излучения на приземной трассе // Оптика атмосф. и океана. 2003. Т. 16, № 12. С. 1102–1106.
 6. Angstrom A. Parameters of atmospheric turbidity // Tellus. 1964. V. XVI, N 1. P. 64–75.
 7. O'Neill N.T., Dubovik O., Eck T.F. A modified Angstrom coefficient for the characterization of submicron aerosols // Appl. Opt. 2001. V. 40, N 15. P. 2368–2374.
 8. O'Neill N.T., Eck T.F., Smirnov A., Holben B.N., Thulasiraman S. Spectral discrimination of coarse and fine mode optical depth // J. Geophys. Res. D. 2003. V. 108, N 17. P. 4559–4573.
 9. Сакерин С.М., Кабанов Д.М. О взаимосвязях параметров формулы Ангстрема и аэрозольной оптической толщи атмосферы в области спектра 1–4 мкм // Оптика атмосф. и океана. 2007. Т. 20, № 3. С. 222–228.
 10. 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.
 11. 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.
 12. URL: <http://www.cimel.fr/>
 13. URL: <http://www.pmodwrc.ch/>
 14. URL: <http://prede.com/>
 15. URL: http://atmos.cr.chiba-u.ac.jp/index_atmos.html
 16. 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. 1132–1169.
 17. 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.
 18. 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.
 19. Ужegov В.Н., Ростов А.П., Пхалагов Ю.А. Автоматизированный трассовый фотометр // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 7. С. 590–594.
 20. Веретенников В.В., Меньщикова С.С. Микрофизическая экстраполяция в задаче обращения спектральных измерений аэрозольной оптической толщины // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 10. С. 880–886.
 21. 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.
 22. Хюлт Г. ван де. Рассеяние света малыми частицами. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1961. 536 с.
 23. 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.
 24. Веретенников В.В. Обратные задачи солнечной фотометрии для интегральных аэрозольных распределений. II. Разделение на субмикронную и грубодисперсную фракции // Оптика атмосф. и океана. 2006. Т. 19, № 4. С. 301–307.
 25. Дейрменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. М.: Мир, 1971. 165 с.

V.V. Veretennikov, S.S. Men'shchikova. Retrieval of the aerosol microstructure from light extinction data measured in a limited spectral range.

The influence of the upper limit λ_{\max} of the spectral range, in which atmospheric transmission measurements are performed, on retrieving aerosol microstructure parameters is investigated. Aerosol microstructure parameters are determined by solving the inverse sun photometry problem using data of numerical simulation and field experiments. The aerosol model formed by fine (*f*) and coarse (*c*) particle fractions is used in the numerical experiment. The value of λ_{\max} is chosen in the range from 1.052 to 3.973 μm . The method of integral distributions is used for solving the inverse problem. It is shown that the contribution of large particles to the total aerosol distribution is underestimated. In particular, at $\lambda_{\max} = 1.246 \mu\text{m}$, the losses in the retrieval of concentration of *c*-particle fraction can achieve 42% against the 18% decrease in the aerosol volume concentration.