

УДК 551.501.793

Коррекция показателя преломления аэрозоля с использованием регрессионных связей между объемной концентрацией частиц и измерениями аэрозольной оптической толщины

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 11.06.2019 г.

Предложен метод регрессионной коррекции вещественной части показателя преломления аэрозоля при решении обратной задачи для спектральных измерений аэрозольной оптической толщины (АОТ) $\tau(\lambda)$. Коррекция основана на использовании соотношений подобия, которым удовлетворяют микроструктурные параметры рассеивающих сред, эквивалентных по спектральному ослаблению при вариациях показателя преломления аэрозоля. Для коррекции проводится минимизация по показателю преломления нормы отклонения между объемной концентрацией аэрозоля, восстановленной из решения обратной задачи и рассчитанной с использованием уравнений регрессии по $\tau(\lambda)$, которые строятся для некоторого реперного периода. Представлены результаты апробации метода на массиве измерений АОТ, выполненных в ИОА СО РАН в течение года наблюдений с помощью многоволнового солнечного фотометра.

Ключевые слова: аэрозольная оптическая толщина, обратные задачи, микроструктура аэрозоля, показатель преломления, регрессия; aerosol optical depth, inverse problems, aerosol microstructure, refractive index, regression.

Введение

Важная роль, которую играют аэрозоли в физических и химических процессах, протекающих в атмосфере, обуславливает необходимость изучения их свойств. Аэрозоли оказывают существенное влияние на тепловой баланс атмосферы и земной поверхности, участвуя в формировании климата Земли [1–3]. Влияние аэрозоля на перенос излучения нужно учитывать в оптических системах связи, видения, локации [4–8]. Аэрозольные загрязнения от промышленных источников, токсичные соединения, возникающие в фотохимическом смоге, в выхлопных газах автотранспорта, оказывают вредное воздействие на здоровье людей [1, 9–11].

Одним из главных параметров, определяющих поведение аэрозолей в атмосфере, является размер частиц. В реальной атмосфере размеры аэрозольных частиц могут варьироваться в широком диапазоне от нанометров до десятков и даже сотен микрометров. Распределение аэрозолей по размерам — ключевой фактор, от которого зависят их оптические свойства. Функция распределения частиц по размерам, их массовая (объемная) концентрация с разделением по двум фракциям, субмикронной и грубодисперсной, включены в перечень основных параметров аэрозолей, рекомендуемых для наблюдений в глобальной наземной сети по программе WMO/GAW [12].

Особенности микроструктуры аэрозоля находят отражение в его оптических характеристиках. Наиболее полную информацию о микрофизических параметрах аэрозоля содержит поляризационные измерения угловых и спектральных зависимостей компонент матрицы рассеяния [13]. Задача определения функции распределения частиц аэрозоля по размерам из измерений его оптических характеристик основана на решении интегрального уравнения первого рода и является примером некорректных обратных задач [14]. К настоящему времени создана развитая математическая теория и разработаны эффективные численные методы решения задач этого класса.

Характерная особенность обращения аэрозольных оптических характеристик состоит в том, что ядро интегрального оператора зависит от комплексного показателя преломления вещества частиц, который в общем случае также неизвестен. Поэтому при восстановлении микроструктуры аэрозоля необходимо либо задавать комплексный показатель преломления априорно, с привлечением существующих оптических моделей аэрозоля (см., например, [15]), либо рассматривать более сложную обратную задачу с включением вещественной и мнимой частей показателя преломления в число искомых параметров.

Решение обратной задачи совместного восстановления микроструктуры и показателя преломления аэрозоля рассматривалось для измерений компонент матрицы рассеяния [16–19], поляризационных индикатрис рассеяния [20–27], спектрального пропускания и углового распределения рассеянной солнечной

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

радиации с включением ореольной области и с учетом поляризации [28–32].

Также развивались методы оценки микрофизических характеристик аэрозоля, основанные на установлении их статистических связей с измеряемыми оптическими характеристиками. С использованием статистического анализа длинных рядов измерений поляризационных характеристик рассеянного света в различных географических районах и сезонах в [33, 34] разработаны микрофизические модели приземной дымки, включающие функцию распределения частиц по размерам и показатель преломления аэрозоля. Входным параметром моделей является коэффициент рассеяния света на длине волны $\lambda = 0,55$ мкм.

В [35] рассмотрена возможность оперативной оценки параметров микроструктуры аэрозоля с использованием корреляционных связей между коэффициентами разложения спектральных измерений индикатрис рассеяния под углом 45° и функций распределения частиц по размерам по соответствующим системам собственных векторов их ковариационных матриц.

Для определения микрофизических параметров аэрозоля из измерений их оптических характеристик в [36–39] используются нелинейные уравнения множественных регрессий, коэффициенты которых находятся путем генерации множества случайных реализаций микрофизических моделей частиц с последующим расчетом на их основе спектральных и угловых характеристик светорассеяния.

Исследования в [40, 41] показали существование высокой корреляции между спектральными измерениями аэрозольной оптической толщины (АОТ) $\tau(\lambda)$ и интегральными параметрами микроструктуры аэрозоля, такими как объемная концентрация V и геометрическое сечение S частиц. Были определены значения коэффициентов простой и множественной линейной регрессии по $\tau(\lambda)$ микроструктурных параметров субмикронной (f) и грубодисперсной (c) фракций аэрозоля. Исследована применимость регрессионных уравнений, построенных на основе данных ограниченной выборки на протяжении одного месяца, для оценки параметров аэрозоля при переходе к годичному массиву измерений $\tau(\lambda)$.

На основе результатов, полученных в [40, 41], в настоящей статье выполнен анализ отклонений между значениями объемной концентрации аэрозоля, рассчитанными с использованием полученных уравнений регрессии и восстановленными из решения обратной задачи для $\tau(\lambda)$. Установлено, что указанные отклонения можно минимизировать с помощью коррекции показателя преломления аэрозоля, который априорно задается при обращении $\tau(\lambda)$.

1. Использование регрессионных связей для оценки объемных концентраций субмикронного и грубодисперсного аэрозоля по спектральным измерениям АОТ

В [40] рассмотрена временная изменчивость коэффициента корреляции ρ между измерениями аэ-

розольной оптической толщины $\tau(\lambda)$ и объемной концентрацией субмикронных и грубодисперсных частиц в течение годового цикла наблюдений в Томске. Экспериментальные данные получены в ИОА СО РАН С.М. Сакериным и Д.М. Кабановым с помощью многоволнового солнечного фотометра SP-6 с июля 2003 по июнь 2004 г. Параметры микроструктуры аэрозоля восстановлены путем обращения спектральных измерений $\tau(\lambda)$ с использованием численного алгоритма [42]. При решении обратной задачи комплексный показатель преломления был задан априорно равным $1,5 - i \cdot 0$ независимо от длины волны и размера частиц.

Выбранное значение показателя преломления находится в хорошем согласии с данными сети AERONET [43], полученными в весенне-летний период 2004 г. в Томске. В частности, из данных [43] следуют оценки средних за июнь значений показателя преломления: $1,488 - i \cdot 0,027$ при $\lambda = 0,441$ мкм и $1,519 - i \cdot 0,037$ при $\lambda = 1,018$ мкм (Level 1.5). Более надежные данные уровня Level 2.0 имеются только за предыдущий месяц (май 2004 г.) и, например, для $\lambda = 1,018$ мкм дают среднемесячное значение показателя преломления $1,503 - i \cdot 0,014$.

Было установлено, что коэффициент корреляции между объемной концентрацией субмикронных частиц $V^{(f)}$ и АОТ $\tau(\lambda)$ убывает с ростом длины волны. В течение рассматриваемого периода максимальные значения ρ при $\lambda = 0,408$ мкм изменялись в пределах $0,88-0,99$. Напротив, для грубодисперсных частиц коэффициент корреляции между $V^{(c)}$ и $\tau(\lambda)$ увеличивается при возрастании λ , не опускаясь ниже $0,9$ при $\lambda \geq 2,203$ мкм на протяжении года.

В таблице представлены оценки коэффициентов корреляции ρ для параметров $V^{(f)}$ и $V^{(c)}$ ($\text{см}^3/\text{м}^2$) с измерениями $\tau(\lambda)$, полученными в июне 2004 г. для двух длин волн в коротковолновой и ИК-областях спектра. Здесь же указаны соответствующие значения коэффициентов регрессии b объемных концентраций $V^{(f)}$, $V^{(c)}$ по $\tau(\lambda)$ и стандартные отклонения σ , $\hat{\sigma}$ восстановленных параметров от их средних (m) и от значений, рассчитанных по уравнениям линейных регрессий.

Параметр	ρ	b	m	σ	$\hat{\sigma}$
$V^{(f)}[\tau(0,408)]$	0,967	0,119	0,0272	0,0159	0,0041
$V^{(c)}[\tau(2,203)]$	0,944	0,785	0,0609	0,0338	0,0107

Видно, что использование уравнений линейных регрессий по $\tau(\lambda)$ при соответствующем выборе длин волн измерений позволяет эффективно оценивать объемную концентрацию субмикронных $V^{(f)}$ и грубодисперсных $V^{(c)}$ частиц со средней квадратической ошибкой $\hat{\sigma}$, которая значительно меньше их стандартных отклонений. Это показано на рис. 1, где представлены временные ряды параметров $V^{(f)}$ и $V^{(c)}$, полученные в июне. Значения по оси абсцисс соответствуют порядковому номеру (N) в массиве данных. Кривые 1 определяют параметры $V^{(f)}$ и $V^{(c)}$, восстановленные при обращении спектральных зависимостей $\tau(\lambda)$. Кривые 2 построены с использованием уравнений регрессии $\hat{V}^{(f)}$ по $\tau(0,408)$ и регрессии

$\hat{V}^{(c)}$ по $\tau(2,203)$. Коэффициент корреляции $\rho_{V\hat{V}}^{(f)}$ между $V^{(f)}$ и $\hat{V}^{(f)}$ равен коэффициенту корреляции $\rho_{V\tau}^{(f)} = 0,967$ между $V^{(f)}$ и измеренными значениями $\tau(0,408)$. При этом имеет место совпадение среднемесячных значений $\langle V^{(f)} \rangle$ и $\langle \hat{V}^{(f)} \rangle$. Аналогичные замечания справедливы и в отношении статистических характеристик параметра $V^{(c)}$: $\rho_{V\hat{V}}^{(c)} = \rho_{V\tau}^{(c)} = 0,944$; $\langle V^{(c)} \rangle = \langle \hat{V}^{(c)} \rangle = 0,0609 \text{ см}^3 \text{ м}^{-2}$.

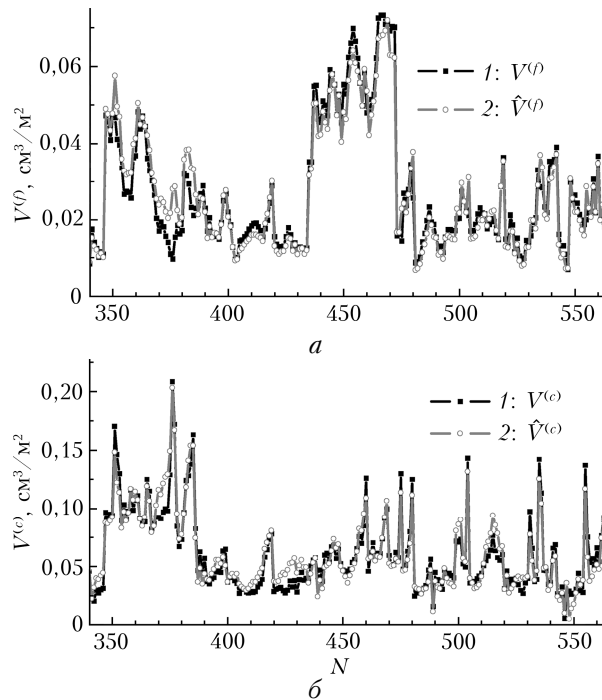


Рис. 1. Временные ряды объемной концентрации: *a* – субмикронной; *b* – грубодисперсной фракций аэрозоля; кривые 1 – восстановленные из решения обратной задачи по данным за июнь 2004 г.; кривые 2 – рассчитанные по регрессионным уравнениям с параметрами за тот же месяц

Ситуация меняется, если сравнивать микроструктурные параметры аэрозоля $V^{(f)}$ и $V^{(c)}$, восстановленные из решения обратной задачи на каком-либо ином временном интервале, с результатами их оценки с использованием регрессионных связей, установленных на исходном интервале.

Для определенности обратимся к рис. 2, на котором показана изменчивость объемных концентраций $V^{(f)}$ и $V^{(c)}$ на протяжении января 2004 г.

При переходе к другому временному интервалу изменились значения коэффициентов корреляции: $\rho_{V\hat{V}}^{(f)} = 0,950$; $\rho_{V\hat{V}}^{(c)} = 0,986$. Также стали различаться среднемесячные значения $\langle V^{(f)} \rangle = 0,0191$ и $\langle \hat{V}^{(f)} \rangle = 0,0206 \text{ см}^3 \text{ м}^{-2}$ для субмикронных, $\langle V^{(c)} \rangle = 0,0548$ и $\langle \hat{V}^{(c)} \rangle = 0,0678 \text{ см}^3 \text{ м}^{-2}$ для грубодисперсных частиц.

Статистическая оценка степени различия среднемесячных значений объемных концентраций в январе показала, что значимое расхождение имеет место только между параметрами грубодисперсных частиц $\langle V^{(c)} \rangle$ и $\langle \hat{V}^{(c)} \rangle$ с доверительной вероятностью 0,95. В случае субмикронных частиц значимое расхождение между параметрами $\langle V^{(f)} \rangle$ и $\langle \hat{V}^{(f)} \rangle$ на том же временном интервале не установлено.

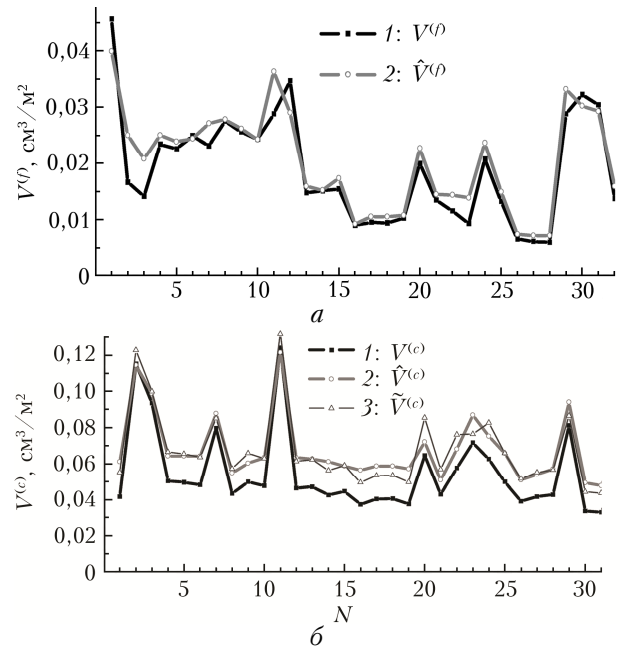


Рис. 2. Временные ряды объемной концентрации: *a* – субмикронной; *b* – грубодисперсной фракцией аэрозоля в январе 2004 г.; кривые 1 – восстановленные из решения обратной задачи; кривые 2 – рассчитанные по регрессионным уравнениям с параметрами за июнь 2004 г.; кривые 3 – зависимость $\tilde{V}^{(c)}$ после коррекции показателя преломления

На рис. 2 видно, что при высокой корреляции значений объемных концентраций, полученных двумя способами в январе, соответствующие им кривые изменяются подобным образом, но со смещением по оси ординат, что особенно хорошо заметно в случае грубодисперсной компоненты. Регулярность наблюдаемого расхождения кривых указывает на его нефлуктуационную природу.

Аналогичные особенности наблюдаются при рассмотрении результатов, полученных и в другие месяцы. Например, временные зависимости концентраций частиц *f*- и *c*-фракций, восстановленные при обращении измерений $\tau(\lambda)$ в феврале, также сдвинуты вниз относительно соответствующих кривых, полученных из уравнений регрессии (рис. 3); среднемесячные значения параметров субмикронной фракции $\langle V^{(f)} \rangle = 0,0186$ и $\langle \hat{V}^{(f)} \rangle = 0,0233 \text{ см}^3 \text{ м}^{-2}$, а для грубодисперсной фракции $\langle V^{(c)} \rangle = 0,0767$, $\langle \hat{V}^{(c)} \rangle = 0,0859 \text{ см}^3 \text{ м}^{-2}$. Наблюдаемые тенденции сохраняются при переходе к среднемесячным значениям параметров $V^{(f)}$ и $V^{(c)}$ на годичном интервале. На рис. 4 представлен внутригодовой ход среднемесячных значений объемных концентраций $\langle V^{(f)} \rangle$ и $\langle V^{(c)} \rangle$ частиц, восстановленных из измерений $\tau(\lambda)$, которые были проведены в период с января по ноябрь 2004 г. Наблюдаемые диапазоны изменчивости среднемесячных значений параметров $\langle V^{(f)} \rangle$ и $\langle V^{(c)} \rangle$ являются наиболее широкими на протяжении двух многолетних периодов наблюдений (2003–2006 и 2011–2014 гг.) [44].

Из данных на рис. 4 следует, что оценки объемных концентраций частиц двух фракций, полученные из регрессионных уравнений, в целом удовлетворительно согласуются с результатами решения обратной

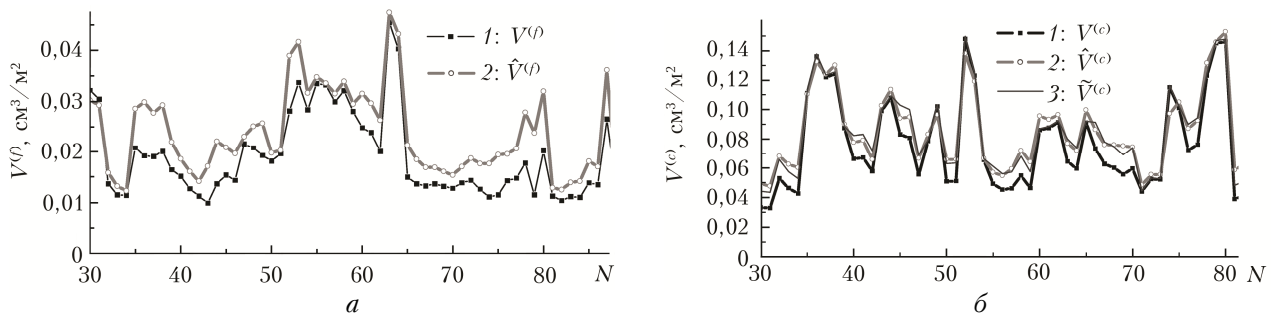


Рис. 3. Временные ряды объемной концентрации: *a* – субмикронной; *b* – грубодисперсной фракцией аэрозоля в феврале 2004 г.; обозначения кривых см. на рис. 2.

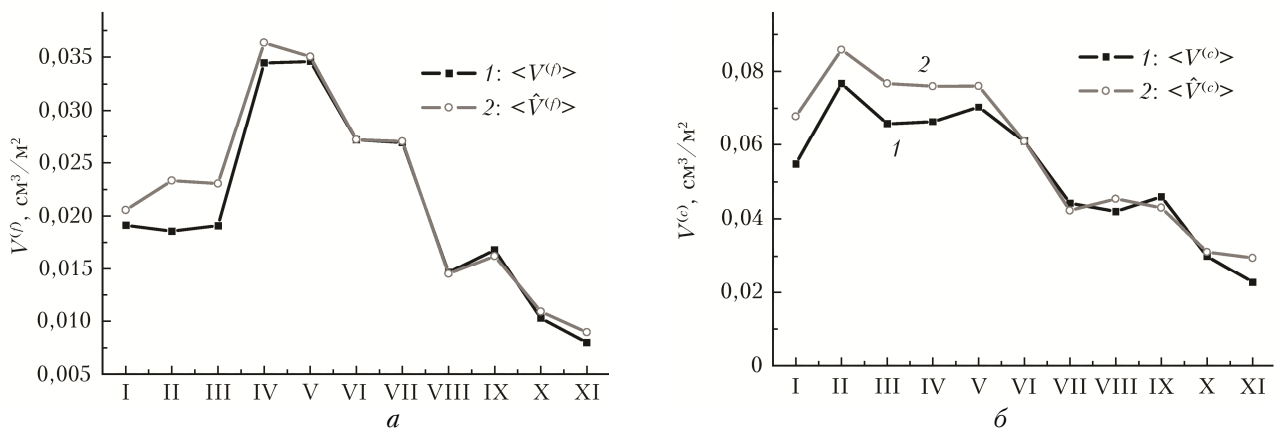


Рис. 4. Внутригодовая изменчивость среднемесячных значений объемной концентрации: *a* – субмикронной; *b* – грубодисперсной фракцией аэрозоля; кривые 1 – восстановленных из решения обратной задачи; кривые 2 – рассчитанных по регрессионным уравнениям с параметрами за июнь 2004 г.

задачи при переходе к годичному массиву измерений $\tau(\lambda)$. Общей чертой представленных зависимостей является их квазимонотонный характер, убывающий с апреля по ноябрь для субмикронной фракции и с мая по ноябрь для грубодисперсной фракции частиц. Вместе с тем в поведении кривых наблюдаются различия, наиболее выраженные в период с января по май 2004 г., когда оценки $\langle \hat{V}^{(f)} \rangle$ и $\langle \hat{V}^{(c)} \rangle$, полученные из регрессионных уравнений, стабильно выше результатов решения обратной задачи.

2. Микрофизическая интерпретация

При сравнении значений объемных концентраций субмикронных и грубодисперсных частиц, полученных из спектральных измерений АОТ на основе решения обратной задачи и рассчитанных с использованием уравнений линейной регрессии, в разд. 1 установлены различия результатов, имеющие систематический характер на внутримесячном и внутригодовом масштабах.

Возможной причиной расхождения кривых $\langle V^{(f)} \rangle$ ($\langle V^{(c)} \rangle$) и $\langle \hat{V}^{(f)} \rangle$ ($\langle \hat{V}^{(c)} \rangle$) является изменчивость показателя преломления в период наблюдений, которую можно учесть с использованием приближенной формулы Хюльста для фактора эффективности ослабления [45]. В рамках указанного приближения в [46] определены соотношения подобия, которым должны удовлетворять микроструктурные характеристики рассеивающих сред, эквивалентных по спек-

тральному ослаблению при вариациях показателя преломления аэрозоля.

В частности, если некоторая рассеивающая среда образована частицами с показателем преломления n и объемной концентрацией V , то для оптически эквивалентной рассеивающей среды с показателем преломления частиц n' и тем же коэффициентом ослабления объемная концентрация частиц

$$V(n') = \frac{n-1}{n'-1} V(n). \quad (1)$$

Поэтому расхождение между средними значениями $\langle \hat{V} \rangle$ и $\langle V(n) \rangle$ может быть устранено, если при обращении измерений $\tau(\lambda)$ выбирать для каждого месяца скорректированное значение показателя преломления по формуле

$$n' = 1 + (n-1) / \Theta, \quad \Theta = \frac{\langle \hat{V} \rangle}{\langle V(n) \rangle}. \quad (2)$$

Новое значение показателя преломления n' , определяемое из (2), доставляет минимум по n модулю разности

$$F_1(n) = |\langle [V(n) - \hat{V}] \rangle|. \quad (3)$$

Очевидно, что $F_1(n') = 0$, а восстановленные значения объемной концентрации частиц $V_i(n') = \Theta V_i(n)$.

Если рассматривать среднеквадратический критерий близости \hat{V} и $V(n)$, то значение n' будет находиться из условия минимума по n функционала

$$F_2(n) = \sum_i [V_i(n) - \hat{V}_i]^2 \quad (4)$$

по формуле, аналогичной (2), но с другим коэффициентом:

$$\Theta = \sum_i V_i(n) \hat{V}_i / \sum_i [V_i(n)]^2. \quad (5)$$

Суммирование в (4) и (5) выполняется по всем элементам соответствующей выборки.

Заметим, что, согласно [46], при обращении $\tau(\lambda)$ выбор показателя преломления не влияет на величину восстановленного суммарного геометрического сечения частиц. Этим можно объяснить отсутствие значимых различий в аналогичных оценках среднемесячных значений геометрических сечений $\langle S^{(c)} \rangle$ и $\langle \hat{S}^{(c)} \rangle$, приведенных в [47].

На рис. 5 изображен внутригодовой ход среднемесячных значений показателя преломления частиц субмикронной $\langle n^{(f)} \rangle$ и грубодисперсной $\langle n^{(c)} \rangle$ фракций, скорректированный по формулам (2) (метод 1, кривые 1) и (2), (4), (5) (метод 2, кривые 2).

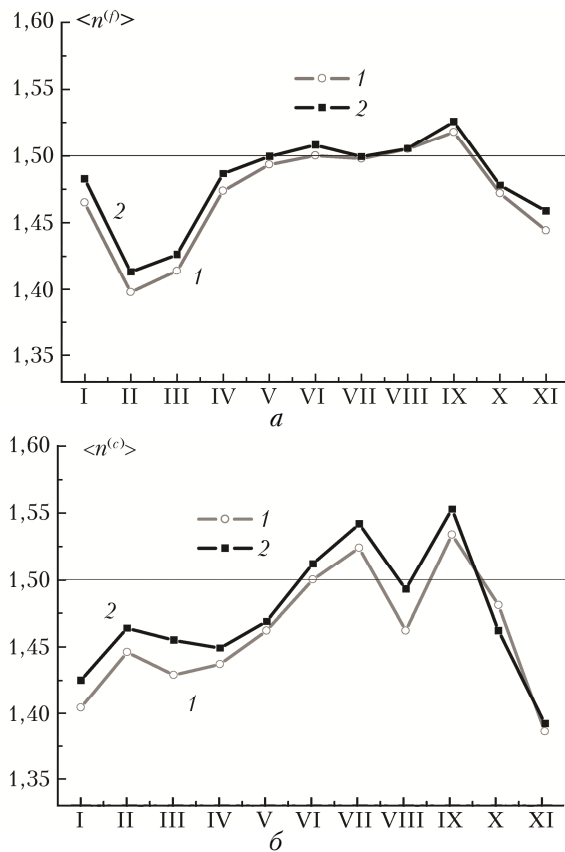


Рис. 5. Коррекция показателя преломления n вещества: а – субмикронных; б – грубодисперсных частиц; кривые 1 – по формуле 2; кривые 2 – по формулам (2–5)

Из данных, приведенных на рис. 5, следует, что скорректированные значения n заключены в диапазоне изменчивости показателя преломления естественного аэрозоля (1,39–1,55) с увеличенными значениями в теплый период, уменьшающимися к холодному времени года.

На рис. 2, б и 3, б кривые 3 иллюстрируют влияние коррекции показателя преломления на поведение

временных зависимостей $V^{(c)}(n') = \hat{V}^{(c)}$ в январе и феврале. В частности, в результате коррекции показателя преломления среднее квадратическое отклонение между объемными концентрациями $V^{(c)}$ и $\hat{V}^{(c)}$ в январе снизилось с 0,0143 до 0,0051 $\text{см}^3 \text{м}^{-2}$, т.е. почти в три раза.

Для анализа полученных результатов обратимся к модели показателя преломления аэрозоля [15], входным параметром которой служит относительная влажность воздуха RH . На рис. 6 представлена зависимость показателя преломления аэрозольного вещества субмикронной и грубодисперсной фракций от относительной влажности воздуха, согласно модели [15], для ряда длин волн. Общей чертой зависимостей рис. 6 является монотонное уменьшение показателя преломления с ростом относительной влажности воздуха.

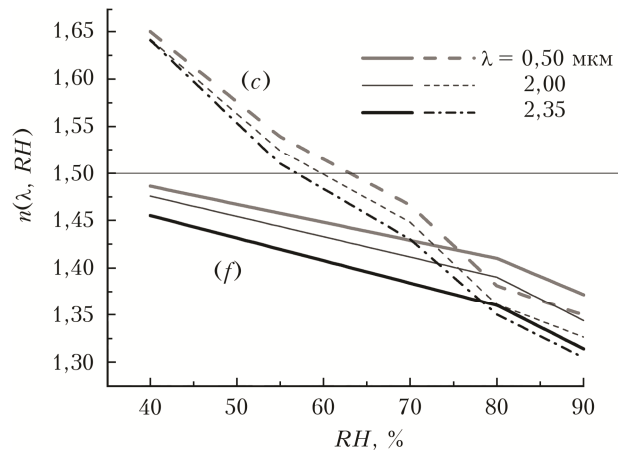


Рис. 6. Зависимость показателя преломления n аэрозольных частиц субмикронной (f) и грубодисперсной (c) фракций от относительной влажности RH согласно оптической модели [15]

Для рассматриваемого периода зависимость среднемесячных значений $\langle RH \rangle$, по данным TOR-станции ИОА СО РАН [48], показана на рис. 7. Видно, что относительная влажность воздуха принимает более высокие значения в холодный период. Это влечет за собой, в соответствии с моделью [15], уменьшение значений показателя преломления.

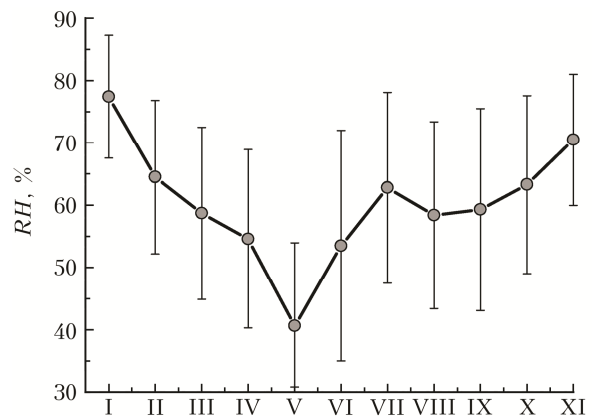


Рис. 7. Изменчивость относительной влажности воздуха RH в период наблюдений по данным TOR-станции ИОА СО РАН [48]

В течение летнего сезона, с июня по август 2004 г., диапазон изменения среднемесячных значе-

ний RH составляет около 10%, от 53,5 до 62,8%, а среднеквадратические отклонения варьируются в пределах 15–19%. По данным модели [15], при указанной изменчивости RH показатель преломления субмикронных частиц $\langle n_{\text{mod}}^{(f)} \rangle$ сохраняет стабильность и, например, для $\lambda = 0,5$ мкм заключен в достаточно узком интервале 1,442–1,461.

Согласно рис. 5 скорректированные значения $\langle n^{(f)} \rangle$ в рассматриваемый период близки к априорно заданному показателю преломления $n = 1,5$; диапазон их изменения составляет около 0,01 при сдвиге в пределах 0,05–0,06 относительно модельных значений $\langle n_{\text{mod}}^{(f)} \rangle$.

В отличие от субмикронного аэрозоля модельные значения показателя преломления грубодисперсных частиц $\langle n_{\text{mod}}^{(c)} \rangle$ изменяются в более широкой области, которая в летний период составляет 1,467–1,518 для $\lambda = 2,35$ мкм. Расхождение между $\langle n_{\text{mod}}^{(c)} \rangle$ и значениями $\langle n^{(c)} \rangle$, скорректированными с использованием метода 1 (формула (2)), не превышает 0,008.

В зимний период наблюдений среднемесячные значения относительной влажности достигали максимума в январе (77,4%). Согласно модельным оценкам, в январе $\langle n_{\text{mod}}^{(f)} \rangle = 1,415$ ($\lambda = 0,5$ мкм). Как и в летний период, превышение скорректированных значений $\langle n^{(f)} \rangle$ по отношению к $\langle n_{\text{mod}}^{(f)} \rangle$ составляет 0,05–0,06.

Для грубодисперсной фракции в январе минимальное расхождение между оценками $\langle n^{(c)} \rangle = 1,404$ и $\langle n_{\text{mod}}^{(c)} \rangle = 1,387$ получено для $\lambda = 2,0$ мкм. В феврале разность между $\langle n^{(c)} \rangle$ и $\langle n_{\text{mod}}^{(c)} \rangle$ не превышает 0,09 ($\lambda = 2,0; 2,35$ мкм).

В течение осеннего периода наблюдений, с сентября по ноябрь 2004 г., происходит монотонное повышение $\langle RH \rangle$ при одновременном убывании значений показателя преломления, полученных в результате коррекции и рассчитанных по модели [15]. В ноябре для субмикронных и грубодисперсных частиц достигаются минимальные значения $\langle n^{(f)} \rangle = 1,444$ и $\langle n^{(c)} \rangle = 1,392$. Их расхождение с соответствующими модельными оценками не превышает 0,05.

При сравнении результатов коррекции и оценок показателя преломления, согласно модели [15], необходимо иметь в виду, что измерения относительной влажности воздуха, для которых были выполнены модельные расчеты, относятся к приземному слою воздуха, в то время как предмет анализа – микрофизические свойства аэрозоля в вертикальном столбе атмосферы. Кроме того, при коррекции показателя преломления не предполагается его зависимость от длины волны света, учитываемая в модели [15], что приводит к неоднозначности результатов сравнения. Наконец, относительная влажность воздуха является важным, но не единственным фактором, определяющим изменчивость микрофизических свойств аэрозоля.

Таким образом, с учетом сделанных замечаний можно заключить, что результаты коррекции годового хода показателя преломления находятся в удовлетворительном согласии с данными модели [15] для наблюдаемых в указанный период значений относительной влажности воздуха.

В заключение сравним результаты коррекции показателя преломления с данными сети AERONET [43] для Томска в рассмотренный период. На рис. 8 пред-

ставлена изменчивость среднемесячных значений показателя преломления аэрозольного вещества для трех длин волн, по данным [43], полученным в период с мая по ноябрь 2004 г. в Томске.

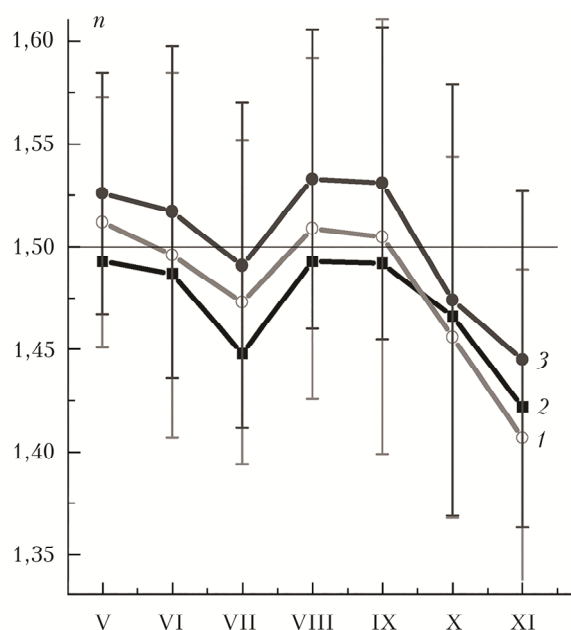


Рис. 8. Среднемесячные значения показателя преломления аэрозольного вещества для различных длин волн по данным сети AERONET в Томске; $\lambda = 0,441$ (кривая 1); $0,676$ (кривая 2); $1,018$ мкм (кривая 3)

В целом поведение зависимостей на рис. 8 хорошо согласуется с ранее рассмотренными результатами. В отличие от оценок показателя преломления, полученных в результате коррекции, данные AERONET относятся к суммарному ансамблю частиц без разделения на фракции и характеризуют поведение некоторого «эффективного» показателя преломления.

Кроме того, значения показателя преломления на рис. 8 варьируются с изменением длины волны. С учетом зависимости от длины волны среднемесячные значения $\langle n(\lambda) \rangle$ заключены в области 1,407–1,533 при более высоких значениях летом и их монотонном понижении в осенний период.

Оценки $\langle n(\lambda) \rangle$, полученные по данным AERONET в июне, в частности $\langle n(0,676) \rangle = 1,496$, близки к априорно заданному значению показателя преломления $n = 1,5$ при обращении измерений $\tau(\lambda)$. Из сравнения результатов, представленных на рис. 5 и рис. 8, видно, что в период с мая по сентябрь зависимость $\langle n(0,676) \rangle$ в наибольшей степени соответствует скорректированным значениям показателя преломления $\langle n^{(f)} \rangle$. При этом максимальное различие между значениями $\langle n^{(f)} \rangle$ и $\langle n(0,676) \rangle$, равное 0,025, получено в июле.

В течение осеннего периода «эффективное» значение $\langle n(0,676) \rangle$ монотонно опускается, достигая в ноябре величины 1,407, которая ближе к скорректированному значению $\langle n^{(c)} \rangle = 1,392$ для грубодисперсных частиц по сравнению с оценками показателя преломления $\langle n^{(f)} \rangle = 1,444 \div 1,459$ для субмикрон-

ного аэрозоля. Возможно, это связано с увеличением вклада грубодисперсного аэрозоля в суммарный объем [44], который достигает максимального значения в ноябре.

Заключение

Подведем основные итоги исследований. Нами выполнен анализ особенностей восстановления объемной концентрации аэрозоля из уравнений линейных регрессий по спектральным измерениям $\tau(\lambda)$.

Для анализа были выбраны данные измерений АОТ в течение года, выполненных в ИОА СО РАН с использованием многоволнового солнечного фотометра в диапазоне длин волн 0,37–3,973 мкм. Из решения обратной задачи для $\tau(\lambda)$ получены временные ряды объемных концентраций субмикронного $V^{(f)}$ и грубодисперсного $V^{(c)}$ аэрозоля.

Объемная концентрация аэрозоля также оценивалась из уравнений линейной регрессии $V^{(f)}$ по $\tau(0,408)$ и регрессии $V^{(c)}$ по $\tau(2,203)$, построенным по данным ограниченной выборки за короткий промежуток времени (1 мес).

Проведена интерпретация отклонений между среднемесячными значениями параметров $V^{(f)}$ и $V^{(c)}$, восстановленными из решения обратной задачи и рассчитанными с использованием построенных уравнений регрессии по $\tau(\lambda)$. Интерпретация основана на использовании соотношений подобия, которым удовлетворяют микроструктурные параметры рассеивающих сред, эквивалентных по спектральному ослаблению при вариациях показателя преломления аэрозоля.

Это позволило осуществить коррекцию значений показателя преломления, априорно задаваемых при решении обратной задачи. Результаты коррекции удовлетворительно согласуются с модельными представлениями о влиянии относительной влажности воздуха на показатель преломления аэрозольного вещества, а также с оценками показателя преломления по данным сети AERONET в Томске в рассматриваемый период.

1. Fuzzi S., Baltensperger U., Carslaw K., Decesari S., Denier van der Gon H., Facchini M.C., Fowler D., Koren I., Langford B., Lohmann U., Nemitz E., Pandis S., Riipinen I., Rudich Y., Schaap M., Slowik J.G., Spracklen D.V., Vignati E., Wild M., Williams M., Giarolani S. Particulate matter, air quality and climate: lessons learned and future needs // Atmos. Chem. Phys. 2015. V. 15. P. 8217–8299. URL: <https://doi.org/10.5194/acp-15-8217-2015>.
2. IPCC: Fourth Assessment Report Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change / S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, H.L. Miller (eds.) Cambridge, United Kingdom, New York: Cambridge University Press, 2007. 996 p.
3. Boucher O., Randall D., Artaxo P., Bretherton C., Feingold G., Forster P., Kerminen V.-M., Kondo Y., Liao H., Lohmann U., Rasch P., Sathesh S.K., Sherwood S., Stevens B., Zhang X.Y. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change / T.F. Stocker, D. Qin,

G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley (eds.). Cambridge, United Kingdom, New York: Cambridge University Press, 2013. DOI: 10.1017/CBO9781107415324

4. Белов В.В. Передаточные свойства внешних каналов и изопланарность изображений в системах видения // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 12. С. 1101–1107; Belov V.V. Optical transfer properties of external channels and image isoplanarity in vision systems // Atmos. Ocean. Opt. 2010. V. 23, N 2. P. 81–87.
5. Белов В.В., Абрамочкин В.Н., Гриднев Ю.В., Кудрявцев А.Н., Кулаев С.П., Тарасенков М.В., Троицкий В.О., Федосов А.В. Бистатистическая оптико-электронная связь в УФ-диапазоне длин волн. Полевые эксперименты в 2016 г. // Оптика атмосф. и океана. 2017. Т. 30, № 2. С. 111–114; Belov V.V., Abramochkin V.N., Gridnev Yu.V., Kudryavtsev A.N., Kozlov V.S., Rakhimov R.F., Shmargunov V.P., Tarasenkou M.V. Experimental study of the influence of optical characteristics of a medium on the image quality in optoelectronic systems with backscattered noise signal selection // Atmos. Ocean. Opt. 2017. V. 30, N 5. P. 429–434.
6. Белов В.В., Абрамочкин В.Н., Гриднев Ю.В., Кудрявцев А.Н., Козлов В.С., Рахимов Р.Ф., Шмаргунов В.П., Тарасенков М.В. Экспериментальные исследования влияния оптических характеристик среды на качество изображения в ОЭС видения с селекцией помехи обратного рассеяния // Оптика атмосф. и океана. 2017. Т. 30, № 4. С. 285–290; Belov V.V., Abramochkin V.N., Gridnev Yu.V., Kudryavtsev A.N., Kozlov V.S., Rakhimov R.F., Shmargunov V.P., Tarasenkou M.V. Experimental study of the influence of optical characteristics of a medium on the image quality in optoelectronic systems with backscattered noise signal selection // Atmos. Ocean. Opt. 2017. V. 30, N 5. P. 429–434.
7. Белов В.В., Гриднев Ю.В., Кудрявцев А.Н., Тарасенков М.В., Федосов А.В. Оптико-электронная связь в УФ-диапазоне длин волн на рассеянном лазерном излучении // Оптика атмосф. и океана. 2018. Т. 31, № 7. С. 559–562; Belov V.V., Gridnev Yu.V., Kudryavtsev A.N., Tarasenkou M.V., Fedosov A.V. Optoelectronic UV communication on scattered laser radiation // Atmos. Ocean. Opt. 2018. V. 31, N 6. P. 698–701.
8. Белов В.В., Гриднев Ю.В., Капустин В.В., Козлов В.С., Кудрявцев А.Н., Курячий М.И., Мовчан А.К., Рахимов Р.Ф., Панченко М.В., Шмаргунов В.П. Экспериментальная оценка частотно-контрастных характеристик активно-импульсных телевизионных систем видения в условиях повышенной мутности аэрозольных сред // Оптика атмосф. и океана. 2018. Т. 31, № 9. С. 771–775; Belov V.V., Gridnev Yu.V., Kapustin V.V., Kozlov V.S., Kudryavtsev A.N., Kuryachii M.I., Movchan A.K., Rakhimov R.F., Panchenko M.V., Shmargunov V.P. Experimental estimation of frequency-contrast characteristics of active pulsed television systems under conditions of enhanced turbidity of aerosol media // Atmos. Ocean. Opt. 2019. V. 32, N 1. P. 103–108.
9. WHO (2003). Health aspects of air pollution with particulate matter, ozone and nitrogen dioxide. World Health Organization, 2003. URL: <http://www.euro.who.int/document/e79097.pdf> (last access: 11.05.2019)
10. WHO. Regional Office for Europe. (2006). Air quality guidelines global update 2005: particulate matter, ozone, nitrogen, dioxide and sulfur dioxide. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe URL: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/107823> (last access: 11.05.2019)
11. WHO (2013). Health effects of particulate matter. Policy implications for countries in Eastern Europe, Caucasus and central Asia. World Health Organization, 2013. URL: [838](http://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-</div><div data-bbox=)

- and-health/air-uality/publications/ (last access: 11.05.2019)
12. GAW Report, 153. WMO/GAW aerosol measurement procedures: guidelines and recommendations. 2003. (WMO TD No. 1178). 67 p.
 13. Розенберг Г.В. Определение микрофизических параметров золя по данным комплексных оптических измерений // Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана. 1976. Т. 12, № 11. С. 1159–1167.
 14. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1974. 224 с.
 15. Зуев В.Е., Креков Г.М. Оптические модели атмосферы. Л.: Гидрометеонздат. 1986. 256 с.
 16. Горчаков Г.И., Емиленко А.С., Лыкосов Е.А., Толстобров В.Г. Об определении коэффициента преломления частиц по поляризации рассеянного туманной дымкой света // Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана. 1976. Т. 12, № 2. С. 144–150.
 17. Горчаков Г.И., Горчакова И.А., Лыкосов Е.А., Толстобров В.Г., Туровцева Л.С. Определение коэффициента преломления и микроструктуры туманной дымки // Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана. 1976. Т. 12, № 6. С. 612–619.
 18. Zhao F., Gong Z., Hu H., Tanaka M., Hayasaka T. Simultaneous determination of the aerosol complex index of refraction and size distribution from scattering measurements of polarized light // Appl. Opt. 1997. V. 36. P. 7992–8001.
 19. Zhao F. Determination of the complex index of refraction and size distribution of aerosols from polar nephelometer measurements // Appl. Opt. 1999. V. 38. P. 2331–2336.
 20. Веретенников В.В., Наац И.Э., Панченко М.В., Фадеев В.Я. К определению микроструктуры и показателя преломления атмосферных дымок из поляризационных характеристик светорассеяния // Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана. 1978. Т. 14, № 12. С. 1313–1317.
 21. Veretennikov V.V., Kozlov V.S., Naats I.N., Fadeev V.Ya. Optical studies of smoke aerosols: an inversion method and its applications // Opt. Lett. 1979. V. 4. P. 411–413.
 22. Tanaka M., Nakajima T., Takamura T. Simultaneous determination of complex refractive index and size distribution of airborne and water-suspended particles from light scattering measurements // J. Meteorol. Soc. Jpn. 1982. V. 60, N 6. P. 1259–1271.
 23. Verhaege C., Shcherbakov V., Personne P. Limitations on retrieval of complex refractive index of spherical particles from scattering measurements // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. 2008. V. 109, N 14. P. 2338–2348.
 24. Verhaege C., Shcherbakov V., Personne P. Retrieval of complex refractive index and size distribution of spherical particles from Dual-Polarization Polar Nephelometer data // JQSRT. 2009. V. 110, N 14–16. P. 2338–2348.
 25. Рахимов Р.Ф., Козлов В.С., Шмаргунов В.П. О временной динамике комплексного показателя преломления и микроструктуры частиц по данным спектрофелометрических измерений в смешанных дымах // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 10. С. 887–897; Rakhimov R.F., Kozlov V.S., Shmargunov V.P. On time dynamics of the complex refractive index and particle microstructure according to data of spectronephelometer measurements in mixed-composition smokes // Atmos. Ocean. Opt. 2012. V. 25, N 1. P. 51–61.
 26. Рахимов Р.Ф., Козлов В.С., Тумаков А.Г., Шмаргунов В.П. Оптические и микрофизические свойства смешанного дыма по данным поляризационных спектрофелометрических измерений // Оптика атмосф. и океана. 2014. Т. 27, № 1. С. 59–68.
 27. Козлов В.С., Рахимов Р.Ф., Шмаргунов В.П. Изменчивость конденсационных свойств смешанного дыма горения биомассы на различных стадиях его эволюции // Оптика атмосф. и океана. 2017. Т. 30, № 10. С. 846–855; Kozlov V.S., Rakhimov R.F., Shmargunov V.P. Variations in condensation properties of mixed smoke from biomass burning at different smoke evolution stages // Atmos. Ocean. Opt. 2018. V. 31, N 1. P. 9–18.
 28. Nakajima T., Tanaka M., Yamauchi T. Retrieval of the optical properties of aerosols from aureole and extinction data // Appl. Opt. 1983. V. 22. P. 2951–2959.
 29. Romanov P., O'Neill N.T., Royer A., McArthur B.L.J. Simultaneous retrieval of aerosol refractive index and particle size distribution from ground-based measurements of direct and scattered solar radiation // Appl. Opt. 1999. V. 38. P. 7305–7320.
 30. Dubovik O., King M.D. A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from sun and sky radiance measurements // J. Geophys. Res. 2000. V. 105, N D16. P. 20673–20696.
 31. Dubovik O., Smirnov A., Holben B.N., King M.D., Kaufman Y.J., Eck T.F., Slutsker I. Accuracy assessments of aerosol optical properties retrieved from Aerosol Robotic Network (AERONET) Sun and sky radiance measurements // J. Geophys. Res. 2000. V. 105, N D8. P. 9791–9806.
 32. Li Z., Goloub P., Devaux C., Gu X., Deuzé J.-L., Qiao Y., Zhao F. Retrieval of aerosol optical and physical properties from ground-based spectral, multi-angular, and polarized sun-photometer measurements // Remote Sens. Environ. 2006. V. 101, N 4. P. 519–533.
 33. Горчаков Г.И., Емиленко А.С., Свириденков М.А. Однопараметрическая модель приземного аэрозоля // Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана. 1981. Т. 17, № 1. С. 39–49.
 34. Веретенников В.В., Кабанов М.В., Панченко М.В. Микрофизическая интерпретация однопараметрической модели поляризационных индикатрис (дымка прибрежного района) // Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана. 1986. Т. 22, № 10. С. 1042–1049.
 35. Свириденков М.А. Корреляционные связи между оптическими характеристиками и микроструктурой приземного аэрозоля // Оптика атмосф. и океана. 2003. Т. 16, № 5–6. С. 418–421.
 36. Лысенко С.А., Кугейко М.М. Регрессионный подход к анализу информативности и интерпретации данных аэрозольных оптических измерений // Журн. прикл. спектроскопии. 2009. Т. 76, № 6. С. 876–883.
 37. Лысенко С.А., Кугейко М.М. Методика определения микрофизических параметров стратосферного аэрозоля по результатам спутникового и наземного многочастотного зондирования // Исслед. Земли из космоса. 2011. № 6. С. 21–33.
 38. Лысенко С.А., Кугейко М.М. Спектронефелометрические методы определения микрофизических характеристик пыли в аспирационном воздухе и отходящих газах цементных производств // Журн. прикл. спектроскопии. 2012. Т. 79, № 1. С. 66–76.
 39. Лысенко С.А., Кугейко М.М. Нефелометрический метод измерения массовых концентраций городских аэрозолей и их респирабельных фракций // Оптика атмосф. и океана. 2014. Т. 27, № 5. С. 435–442; Lisenko S.A., Kugeiko M.M. Nephelometric method for measuring mass concentrations of urban aerosols and their respirable fractions // Atmos. Ocean. Opt. 2014. V. 27, N 6. P. 587–595.
 40. Веретенников В.В., Меньщикова С.С. Годовой цикл в изменчивости микроструктурных параметров аэрозоля по данным солнечной фотометрии // Оптика атмосф. и океана. 2014. Т. 27, № 12. С. 1035–1041; Veretennikov V.V., Men'shchikova S.S. Annual cycle in the variability of aerosol microstructure parameters according to solar photometry data // Atmos. Ocean. Opt. 2015. V. 28, N 2. P. 126–132.
 41. Веретенников В.В. Восстановление микроструктурных параметров грубодисперсного аэрозоля с использованием их регрессионных связей со спектральным ослаблением света в ИК-диапазоне // Оптика атмосф. и океана.

2017. Т. 30, № 8. С. 696–704; *Veretennikov V.V.* Retrieval of microstructure parameters of coarse-mode aerosol using their regression relationships with spectral extinction of light in the IR // *Atmos. Ocean. Opt.* 2017. V. 30, N 6. P. 555–563.
42. *Веретенников В.В., Меньщикова С.С.* Особенности восстановления микроструктурных параметров аэрозоля из измерений аэрозольной оптической толщины. Часть I. Методика решения обратной задачи // *Оптика атмосф. и океана.* 2013. Т. 26, № 4. С. 306–312; *Veretennikov V.V., Men'shchikova S.S.* Features of retrieval of microstructural parameters of aerosol from measurements of aerosol optical depth. Part I. Technique for solving the inverse problem // *Atmos. Ocean. Opt.* 2013. V. 26, N 6. P. 473–479.
43. URL: <https://aeronet.gsfc.nasa.gov/> (last access: 11.04.2019)
44. *Веретенников В.В.* Межгодовая изменчивость микроструктурных параметров аэрозоля по данным солнечной фотометрии в Томске // *Оптика атмосф. и океана.* 2017. Т. 30, № 8. С. 705–715; *Veretennikov V.V.* Interannual variations in aerosol microstructure parameters according to data of sun photometer measurements in Tomsk // *Atmos. Ocean. Opt.* 2017. V. 30, N 6. P. 564–573.
45. *Ван де Хюлст Г.* Рассеяние света малыми частицами. М.: ИЛ, 1961. 536 с.
46. *Веретенников В.В.* Совместное определение микроструктуры и показателя преломления аэрозоля по данным солнечной фотометрии // *Оптика атмосф. и океана.* 2007. Т. 20, № 3. С. 214–221.
47. *Veretennikov V.V.* Reconstruction of microstructure parameters of the coarsely dispersed aerosol from spectral measurements of the aerosol optical thickness during a one-year observation period from their regression relations using a finite sample // *Proc. SPIE. 23 Intern. Sympos. Atmos. Ocean. Opt.: Atmos. Phys.* 2017. V. 10466. P. 10466-170. 10466 3L.
48. URL: <http://lop.iao.ru/RU/tor/MeteoandGas/> (last access: 11.04.2019)

V.V. Veretennikov, S.S. Men'shchikova. Correction of the aerosol refractive index using the regression relationship between the volume concentration of particles and measurements of aerosol optical depth.

A method of regression correction of the real part of the refractive index of the aerosol matter is suggested for solving the inverse problem of spectral measurements of aerosol optical depth (AOD) $\tau(\lambda)$. The correction is based on the use of similarity relations that must be fulfilled for the microstructure parameters of the scattering media with equivalent spectral extinction at variations in the refractive index of the aerosol. For the correction, the minimization of the discrepancy between the volume concentrations of the aerosol retrieved from the solution of the inverse problem and calculated using the regression equations, which are constructed for a certain reference period, is carried out by the refractive index. The results of testing the method are presented based on the AOD measurements with a multiwave sun photometer, performed at IAO SB RAS during an annual cycle of observations.