

ОПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И БАЗЫ ДАННЫХ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ  
ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

УДК 551.501.793

**Восстановление микроструктурных параметров  
грубодисперсного аэрозоля с использованием  
их регрессионных связей со спектральным ослаблением  
света в ИК-диапазоне**

**В.В. Веретенников\***

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

Поступила в редакцию 14.07.2016 г.

Рассмотрены возможности оценки микроструктурных параметров атмосферного аэрозоля из регрессионных уравнений их связи со спектральными измерениями аэрозольной оптической толщины (АОТ). Особое внимание уделено задаче оценки объемной концентрации, суммарного сечения и среднего радиуса частиц грубодисперсной фракции аэрозоля. Необходимость решения такой задачи обусловлена большими ошибками восстановления указанных параметров, возникающими при непосредственном обращении АОТ в случае недостаточно широкого спектрального диапазона измерений. Представлены оценка коэффициентов простой и множественной линейных регрессий и результаты восстановления на их основе параметров грубодисперсного аэрозоля по данным солнечной фотометрии в г. Томске.

*Ключевые слова:* аэрозольная оптическая толщина, микроструктура аэрозоля, корреляция, регрессия; aerosol optical depth, aerosol microstructure, correlation, regression.

**Введение**

Известно, что спектральные характеристики ослабления излучения в аэрозольной среде, содержащей частицы, размеры которых намного превышают длину волны света, малоинформативны относительно функции распределения таких частиц по размерам. Коэффициент ослабления света большими частицами близок к величине их удвоенного суммарного геометрического сечения в единичном объеме независимо от конкретного вида функции распределения частиц по размерам. Указанное обстоятельство обуславливает неоднозначность оценки параметров микроструктуры грубодисперсного аэрозоля на основе решения обратной задачи для аэрозольного коэффициента ослабления в случае недостаточно широкого спектрального диапазона измерений.

В [1] показано, что при ограничении спектрального диапазона сверху наблюдается недооценка содержания больших частиц в восстановленных распределениях частиц по размерам при одновременном смещении их среднего радиуса в область меньших значений. Так, уменьшение верхней границы спектрального диапазона измерений аэрозольной оптической толщины (АОТ) с 3,973 до 1,246 мкм при решении обратной задачи может повлечь за собой потери при оценке объемной концентрации грубодисперсных частиц до 21–75%.

Отмеченные особенности следует учитывать при оценке параметров микроструктуры аэрозоля по данным солнечной фотометрии, поскольку верхняя граница спектрального диапазона серийно выпускаемых солнечных фотометров, как правило, не превышает 2,2 мкм.

Дополнительным источником информации о микроструктурных параметрах частиц грубодисперсной фракции могут служить, в частности, ореольные измерения индикатрис рассеяния (см., например [2]). При отсутствии таких данных для устранения неоднозначности в оценке параметров микроструктуры грубодисперсного аэрозоля может быть использована априорная информация о функции распределения в области размеров частиц, превышающих максимальную длину волны спектрального диапазона измерений. Такой подход реализован при разработке алгоритма обращения АОТ на основе гибридной модели микроструктуры аэрозоля [3]. Модель включает описание дисперсного состава аэрозоля в информативной области размеров с использованием интегральной функции распределения, дополненное параметрическим представлением микроструктуры больших частиц.

В настоящей работе рассмотрены возможности оценки параметров микроструктуры грубодисперсных частиц на основе альтернативного подхода, в котором учитываются статистические связи между оптическими и микроструктурными свойствами аэрозоля.

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

Задача поиска статистических связей между оптическими характеристиками и микрофизическими параметрами аэрозоля имеет многолетнюю историю. Успешными примерами ее решения могут служить однопараметрические модели, разработанные на основе длительных рядов измерений компонент матрицы рассеяния континентальной дымки [4], индикатрис рассеяния и спектральных коэффициентов ослабления дымки прибрежного морского района [5–7].

Входным параметром моделей является коэффициент аэрозольного ослабления (рассеяния) на длине волны  $\lambda = 0,55$  мкм, который имеет тесную корреляционную связь с первым коэффициентом разложения измеряемых характеристик по системе собственных векторов их ковариационной матрицы. Решение обратной задачи для модельных оптических характеристик дало возможность построить микрофизическую модель дымки, включающую функцию распределения частиц по размерам и показатель преломления аэрозольных частиц, которые однозначно определялись по значениям входного параметра.

Включение разработанных моделей в алгоритмы решения лидарного уравнения при одночастотном и двухчастотном зондировании дымок позволяет восстанавливать наряду с профилями коэффициентов аэрозольного ослабления и обратного рассеяния также их микрофизические параметры [8].

В дальнейшем статистический подход к установлению связей между оптическими характеристиками и микрофизическими параметрами аэрозоля получил развитие в работах [9–13]. Для построения статистических моделей в [9] было предложено использовать корреляционные связи между коэффициентами разложения аэрозольных функций распределения частиц по размерам и измеряемых оптических характеристик по соответствующим системам собственных векторов их ковариационных матриц.

В цикле работ [10–13] авторами получены уравнения множественных регрессий между микрофизическими параметрами и оптическими характеристиками аэрозоля путем генерации множества случайных реализаций микрофизических моделей частиц с последующим расчетом на их основе спектральных и угловых характеристик аэрозоля. Это позволяет осуществлять переход от оптических измерений к микрофизическим параметрам аэрозоля без использования численных методов решения некорректных обратных задач.

Подход, рассматриваемый в настоящей работе, базируется на результатах исследования регрессионных соотношений между спектральными измерениями АОТ  $\tau(\lambda)$  и параметрами аэрозоля, такими как геометрическое сечение, объемная концентрация частиц и их средний радиус, которые были восстановлены при решении обратной задачи по данным экспериментальных наблюдений АОТ на протяжении годового цикла [14]. Описание базового алгоритма решения обратной задачи приведено в [15]. В качестве искомой функции распределения по размерам в алгоритме [15] рассматривается сум-

марное геометрическое сечение частиц  $S(r)$  с радиусом, большим или равным  $r$ . Это позволяет восстанавливать приближенное устойчивое решение обратной задачи путем минимизации функционала невязки на множестве монотонных ограниченных функций без привлечения какой-либо дополнительной априорной информации о функции распределения по размерам.

## 1. Статистические связи между аэрозольной оптической толщиной и микроструктурными параметрами грубодисперсных частиц аэрозоля

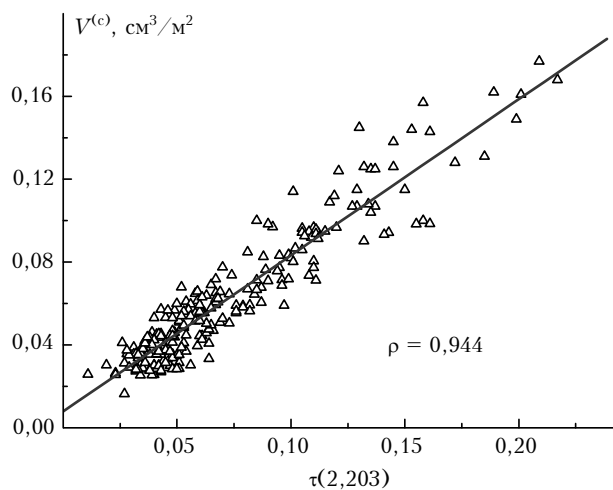
В работе [14] исследована изменчивость микроструктуры аэрозоля в течение года по данным солнечной фотометрии в Томске. Параметры микроструктуры определялись путем решения обратной задачи для спектральных измерений АОТ на 13 длинах волн в диапазоне 0,37–3,973 мкм, выполненных в период с июля 2003 г. по июнь 2004 г. в ИОА СО РАН С.М. Сакерным и Д.М. Кабановым. При решении обратной задачи спектральные зависимости АОТ предварительно усреднялись на часовом интервале. Общий объем обработанных спектров составил около 1250 усредненных реализаций.

Результаты решения обратной задачи позволили исследовать статистические связи между измеренными спектрами АОТ и восстановленными параметрами микроструктуры суммарного ансамбля, а также двух основных фракций аэрозоля, — субмикронной ( $f$ ) и грубодисперсной ( $c$ ).

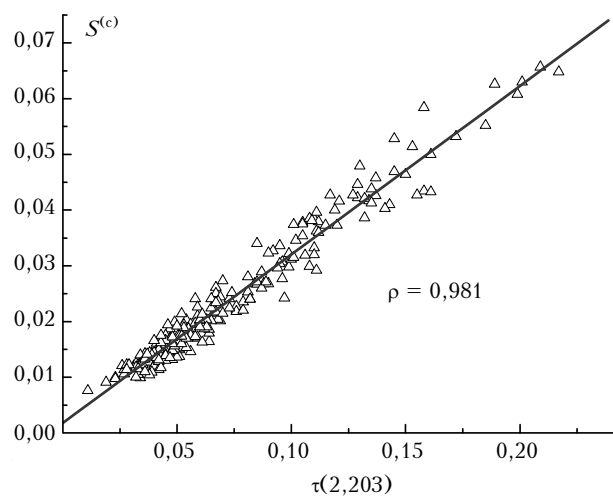
Как установлено в [14], коэффициенты корреляции между АОТ  $\tau(\lambda)$  и объемной концентрацией частиц субмикронной и грубодисперсной фракций существенно зависят от длины волны. Причем эта зависимость имеет противоположный характер для частиц  $f$ - и  $c$ -фракций.

В течение года более высокие значения коэффициента корреляции  $\rho$  между объемной концентрацией субмикронных частиц  $V^{(f)}$  и АОТ  $\tau(\lambda)$  наблюдаются в УФ- и видимой областях спектра, не опускаясь ниже 0,88. При переходе в ИК-диапазон эта связь значительно ослабевает. Напротив, коэффициент корреляции между объемной концентрацией грубодисперсных частиц  $V^{(c)}$  и АОТ  $\tau(\lambda)$  растет с увеличением длины волны  $\lambda$  до 1,557 мкм и при  $\lambda = 2,203$  мкм превышает уровень 0,9 на протяжении всего года. Аналогичный характер имеют корреляционные связи между АОТ и геометрическими сечениями частиц обеих фракций.

Для примера на рис. 1 представлены диаграммы рассеяния, которые характеризуют связь между среднечасовыми значениями АОТ  $\tau(2,203)$ , полученными в течение одного летнего месяца (июнь 2004 г.), и восстановленными из решения обратной задачи значениями объемной концентрации  $V^{(c)}$  и геометрического сечения  $S^{(c)}$  грубодисперсных частиц. К грубодисперсным относились частицы радиусом более 0,55 мкм. Объем выборки  $N = 238$ .



а



б

Рис. 1. Диаграммы рассеяния среднечасовых измерений АОТ  $\tau(2,203)$  и значений микроструктурных параметров  $V^{(c)}$  (а) и  $S^{(c)}$  (б) грубодисперсных частиц, восстановленных по результатам решения обратной задачи для спектральных зависимостей  $\tau(\lambda)$

При обращении измерений  $\tau(\lambda)$  комплексный показатель преломления был задан одинаковым для обеих фракций частиц и постоянным по спектру. Допустимость такого приближения показана в [16]. Априорно выбранное значение показателя преломления равно  $1,5 - i \cdot 0$ , что близко к данным сети AERONET [17]. По данным [17], в рассматриваемый период в Томске среднемесячное значение показателя преломления на длине волны  $\lambda = 1,018$  мкм составляло  $1,519 - i \cdot 0,028$  (Level 1.5). Более надежные данные уровня Level 2.0 сети [17] имеются только за предыдущий месяц (май 2004 г.) и дают оценку  $1,503 - i \cdot 0,014$ .

Влияние ошибок в априорном задании показателя преломления на результаты обращения спектральных измерений АОТ  $\tau(\lambda)$  можно оценить исходя из приближенной формулы Хюльста [18] для фактора эффективности ослабления. С использованием данного приближения в [19] определены со-

отношения подобия, которым должны удовлетворять микроструктурные характеристики рассеивающих сред, эквивалентных по спектральному ослаблению, при вариациях показателя преломления аэрозоля.

Согласно [19], например, значения объемной концентрации  $V(v)$ , восстановленные из решения обратной задачи при различных априорных значениях вещественной части показателя преломления  $v$ , удовлетворяют соотношению

$$V(v)(v - 1) = \text{const.} \quad (1)$$

Используя формулу (1), нетрудно получить следующее выражение для дисперсии оценки параметра  $V(v)$  с учетом ошибок в задании показателя преломления [20]:

$$\sigma_V^2 = \sigma_V^2(v) + \sigma_{V\varepsilon}^2, \quad (2)$$

где первое слагаемое

$$\sigma_V^2(v) = V^2(v) \frac{\sigma_v^2}{(v - 1)^2} \quad (3)$$

определяет дисперсию  $V(v)$ , обусловленную случайной ошибкой задания показателя преломления  $\Delta v$  с нулевым средним  $\overline{\Delta v} = 0$  и дисперсией  $\sigma_v^2$ , а второе слагаемое  $\sigma_{V\varepsilon}^2$  — дисперсию ошибки  $\varepsilon_V$  определения объемной концентрации при заданном значении  $v$ .

Как следует из (3), относительная погрешность оценки объемной концентрации, обусловленная ошибкой в показателе преломления, при  $v = 1,5$  и  $\sigma_v = 0,05$  составляет 10%. Соотношения, аналогичные формулам (2), (3), справедливы также для среднего радиуса частиц  $r_s = (3/4)V/S$ , где  $S$  — геометрическое сечение ансамбля частиц.

Полученные оценки находятся в хорошем согласии с результатами численного моделирования [2, 15]. В отличие от объемной концентрации, восстановленное значение геометрического сечения частиц не зависит от выбора показателя преломления.

Прямые на рис. 1, а, б определяют линейную регрессию по  $\tau(2,203)$  параметров  $V^{(c)}$  и  $S^{(c)}$ , которые восстановлены при априорно выбранном значении  $v = 1,5$ . Для данных, представленных на рис. 1, в табл. 1 указаны значения коэффициента корреляции  $\rho$ , коэффициента регрессии  $b$  и его стандартной ошибки  $\sigma_b$ . Также в таблице приведены статистические характеристики  $\sigma$  и  $\hat{\sigma} = \sigma\sqrt{1 - \rho^2}$  — стандартные отклонения восстановленных значений  $V^{(c)}$  и  $S^{(c)}$  от их средних ( $m$ ) и от значений, рассчитанных по уравнениям регрессии, соответственно.

При дополнительном учете ошибки в априорном выборе показателя преломления значения стандартных отклонений  $\sigma_V$  и  $\hat{\sigma}_V$  в табл. 1 следует умножить на коэффициент

$$C_V = \left[1 + (\sigma_v / (v - 1))^2\right]^{1/2}. \quad (4)$$

Таблица 1

Оценки параметров регрессии по  $\tau(\lambda)$  объемной концентрации  $V^{(c)}$  и геометрического сечения  $S^{(c)}$  частиц грубодисперсной фракции аэрозоля

Параметр	$\rho$	$b$	$\sigma_b$	$m$	$\sigma$	$\hat{\sigma}$
$V^{(c)}[\tau(2,203)]$	0,944	0,758	0,017	0,061	0,033	0,0107
$S^{(c)}[\tau(2,203)]$	0,981	0,303	0,004	0,023	0,013	0,0024
$S^{(c)}[\tau(1,557)]$	0,988	0,339	0,003	0,023	0,013	0,0019

Из данных табл. 1, следует, что измерения АОТ на длине волны  $\lambda = 2,203$  мкм позволяют оценить микроструктурные параметры грубодисперсных частиц  $V^{(c)}$  и  $S^{(c)}$  со средней квадратической ошибкой (СКО)  $\hat{\sigma}_{V^{(c)}} = 0,0107$  см<sup>3</sup>/м<sup>2</sup> и  $\hat{\sigma}_{S^{(c)}} = 0,0024$ , что существенно ниже стандартных отклонений для указанных параметров.

На рис. 2 приведена диаграмма рассеяния значений объемной концентрации частиц грубодисперсной фракции  $V^{(c)}$ , восстановленных по результатам решения обратной задачи, и  $\hat{V}^{(c)}$ , рассчитанных по измерениям АОТ  $\tau(2,203)$  с использованием уравнения линейной регрессии. Коэффициент корреляции  $\rho_{V\hat{V}}$  между  $V^{(c)}$  и  $\hat{V}^{(c)}$  равен коэффициенту корреляции  $\rho_{V\tau} = 0,944$  между  $V^{(c)}$  и измеренными значениями  $\tau(2,203)$ . Прямая  $\hat{V}^{(c)} = \hat{V}^{(c)}$  на рис. 2 определяет линейную регрессию  $V^{(c)}$  по  $\hat{V}^{(c)}$  с коэффициентом регрессии, равным единице. Величина СКО линейной регрессии  $\hat{\sigma}_{V\hat{V}}^{(c)} = 0,0107$  см<sup>3</sup>/м<sup>2</sup> совпадает со значением  $\hat{\sigma}_{V^{(c)}}$ , приведенным в табл. 1.

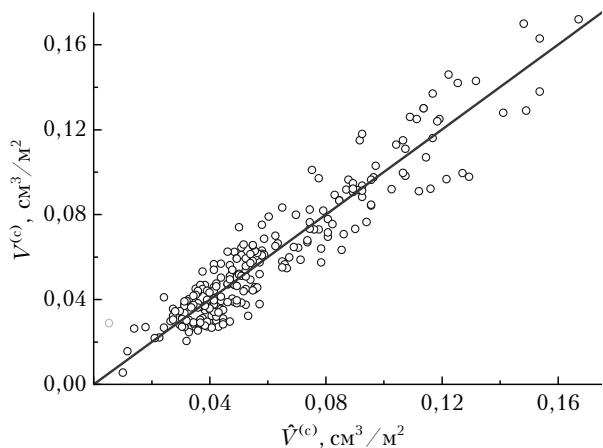


Рис. 2. Диаграмма рассеяния значений объемной концентрации грубодисперсных частиц  $V^{(c)}$ , восстановленных по результатам решения обратной задачи, и  $\hat{V}^{(c)}$ , рассчитанных с использованием уравнения линейной регрессии по измерениям АОТ  $\tau(2,203)$

Заметим, что дополнительный учет измерений  $\tau(\lambda)$  на длине волны  $\lambda = 1,557$  мкм не приводит к существенному повышению точности восстановления объемной концентрации грубодисперсных частиц  $V^{(c)}$ . При использовании множественной

регрессии  $V^{(c)}$  по измерениям АОТ  $\tau(\lambda)$  на двух длинах волн  $\lambda_1 = 2,203$  и  $\lambda_2 = 1,557$  мкм СКО  $\hat{\sigma}_{V^{(c)}}$  уменьшается всего на  $0,002$  см<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>.

Напротив, при оценке геометрического сечения грубодисперсных частиц по измерениям АОТ  $\tau(\lambda_i)$  на двух длинах волн на основе уравнения множественной регрессии вида

$$\hat{S}^{(c)} = b_0 + b_1\tau(\lambda_1) + b_2\tau(\lambda_2) \quad (5)$$

( $b_0 = -0,0004$ ;  $b_1 = 0,125$ ;  $b_2 = 0,206$ ) СКО  $\hat{\sigma}_{S^{(c)}}$  понижается до  $0,00138$ .

На рис. 3 показана диаграмма рассеяния значений геометрического сечения  $S^{(c)}$  частиц грубодисперсной фракции, восстановленных по результатам решения обратной задачи, и значений  $\hat{S}^{(c)}$ , рассчитанных с использованием регрессионного уравнения (5).

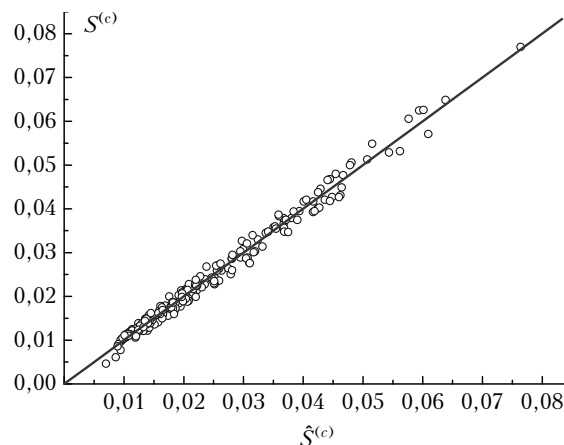


Рис. 3. Диаграмма рассеяния значений геометрического сечения грубодисперсных частиц  $S^{(c)}$ , восстановленных из решения обратной задачи, и  $\hat{S}^{(c)}$ , рассчитанных с использованием уравнения множественной регрессии (5)

Коэффициент корреляции между  $S^{(c)}$  и  $\hat{S}^{(c)}$   $\rho_{S\hat{S}} = 0,994$ ; он совпадает с множественным коэффициентом корреляции между  $S^{(c)}$  и измерениями АОТ  $\tau(2,203)$  и  $\tau(1,557)$ . Прямая  $\hat{S}^{(c)} = \hat{S}^{(c)}$  на рис. 3 представляет линейную регрессию  $S^{(c)}$  по  $\hat{S}^{(c)}$  с единичным коэффициентом регрессии и СКО  $\hat{\sigma}_{S\hat{S}}^{(c)} = \hat{\sigma}_{S^{(c)}} = 0,00138$ .

## 2. Результаты восстановления параметров микроструктуры грубодисперсных частиц в течение продолжительного периода наблюдений

Статистические связи между оптическими и микроструктурными параметрами аэрозоля, рассмотренные в разд. 1, получены на ограниченном по времени массиве данных (июнь 2004 г.). Как

показано в [14], среднемесячные значения АОТ  $\tau(\lambda)$ , а также соответствующие им значения микроструктурных параметров аэрозоля, восстановленные из решения обратной задачи, не остаются постоянными в течение года. Изменяются также их дисперсии и значения коэффициентов корреляции между  $\tau(\lambda)$  и микроструктурными параметрами аэрозоля. Поэтому остается открытым вопрос о применимости регрессионных уравнений, полученных на ограниченной выборке за относительно короткий период, для оценки параметров аэрозоля на других временных интервалах.

Для ответа на этот вопрос обратимся к рис. 4 и 5, на которых представлены диаграммы рассеяния для параметров  $V^{(c)}$  ( $S^{(c)}$ ) и  $\hat{V}^{(c)}$  ( $\hat{S}^{(c)}$ ), определенных по измерениям  $\tau(\lambda)$  на протяжении почти годового (квазигодового) периода наблюдений, с января по ноябрь 2004 г. Эти диаграммы служат обобщением результатов, полученных на ограниченном по времени массиве данных (июнь 2004 г.) и представленных на рис. 2 и 3. При этом условия восстановления параметров  $V^{(c)}$  и  $S^{(c)}$  из решения обратной задачи сохранились без изменения. Статистическое оценивание указанных параметров производилось с использованием регрессионных соотношений, установленных при обработке данных на ограниченной выборке за июнь 2004 г.

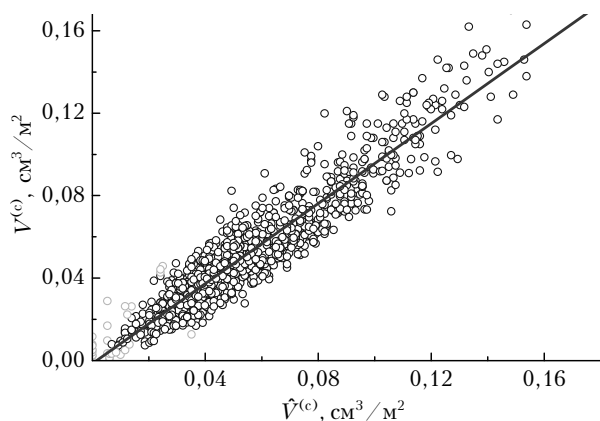


Рис. 4. Диаграмма рассеяния значений  $V^{(c)}$  и  $\hat{V}^{(c)}$ , определенных по измерениям  $\tau(\lambda)$  в период с января по ноябрь 2004 г. из решения обратной задачи ( $V^{(c)}$ ) и из уравнения линейной регрессии  $\hat{V}^{(c)}$  по  $\tau(2,203)$  с параметрами за июнь 2004 г.

Диаграмма рассеяния значений параметров  $V^{(c)}$  и  $\hat{V}^{(c)}$ , определенных на квазигодовом массиве данных, показана на рис. 4. Объем выборки  $N$  составил 1123 точки. Коэффициент корреляции между  $V^{(c)}$  и  $\hat{V}^{(c)}$   $\rho_{V\hat{V}} = 0,937$  и близок к значению, которое получено для ограниченного массива данных, представленных на рис. 2. Ошибка восстановления, характеризующаяся средним квадратическим отклонением  $\hat{\sigma}_{V\hat{V}}^{(c)}$  между  $V^{(c)}$  и  $\hat{V}^{(c)}$ , равна  $0,0106 \text{ cm}^3/\text{M}^2$  и практически совпадает с величиной СКО  $\hat{\sigma}_{\hat{V}}^{(c)}$ , которая приведена в табл. 1 для ограниченной выборки.

На рис. 5 приведена диаграмма рассеяния значений параметров  $S^{(c)}$  и  $\hat{S}^{(c)}$ , которые получены синхронно с параметрами  $V^{(c)}$  и  $\hat{V}^{(c)}$ , представленными на рис. 4. Значения  $\hat{S}^{(c)}$  определены из уравнения множественной регрессии (5) по измерениям АОТ  $\tau(\lambda)$  на двух длинах волн  $\lambda_1 = 2,203$  и  $\lambda_2 = 1,557$  мкм. Между значениями  $S^{(c)}$  и  $\hat{S}^{(c)}$  по-прежнему сохраняется высокая корреляционная связь. При коэффициенте корреляции  $\rho_{S\hat{S}} = 0,99$  среднее квадратическое отклонение  $\hat{\sigma}_{S\hat{S}}^{(c)}$  составляет  $0,00165$ , что существенно ниже стандартного отклонения  $\sigma_{S^{(c)}} = 0,0116$  для значений  $S^{(c)}$ , восстановленных из решения обратной задачи на квазигодовом интервале.

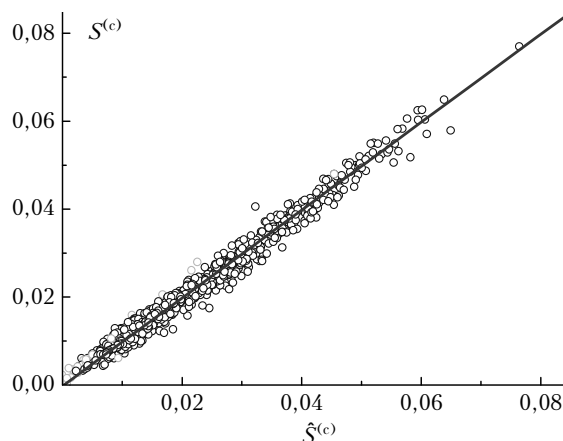


Рис. 5. Диаграмма рассеяния значений  $S^{(c)}$  и  $\hat{S}^{(c)}$ , определенных по измерениям  $\tau(\lambda)$  в период с января по ноябрь 2004 г. из решения обратной задачи ( $S^{(c)}$ ) и из уравнения множественной линейной регрессии  $\hat{S}^{(c)}$  (5)

В табл. 2 представлены статистические характеристики параметров  $V^{(c)}$  и  $S^{(c)}$ , соответствующие данным на рис. 4 и 5: коэффициент корреляции  $\rho$  и стандартное отклонение  $\hat{\sigma}$  между микроструктурными параметрами, восстановленными из решения обратной задачи и рассчитанными по регрессионным уравнениям, а также средние значения  $m$  и стандартные отклонения  $\sigma$  параметров  $V^{(c)}$  и  $S^{(c)}$ , восстановленных из решения обратной задачи.

Из сравнения результатов, представленных в табл. 1 и 2, видно, что использование регрессионных уравнений, полученных на основе данных за короткий промежуток времени, при переходе к годовому массиву измерений АОТ  $\tau(\lambda)$  позволяет оценить параметры микроструктуры аэрозоля  $V^{(c)}$  и  $S^{(c)}$  практически без потери точности.

Таблица 2

**Статистические характеристики микроструктурных параметров грубодисперсных частиц по результатам обращения измерений АОТ в период с января по ноябрь 2004 г.**

	$\rho$	$m$	$\sigma$	$\hat{\sigma}$
$V^{(c)}$	0,937	0,0532	0,0289	0,0106
$S^{(c)}$	0,990	0,0216	0,0116	0,00165

Отмеченные тенденции наблюдаются также для среднемесячных значений объемной концентрации  $\langle V^{(c)} \rangle$  и геометрического сечения  $\langle S^{(c)} \rangle$  грубодисперсных частиц. Соответствующие им диаграммы рассеяния показаны на рис. 6 и 7, а статистические характеристики даны в табл. 3. Отличительной особенностью указанных параметров является уменьшение стандартных отклонений и стандартных ошибок регрессии по сравнению с ранее рассмотренными результатами.

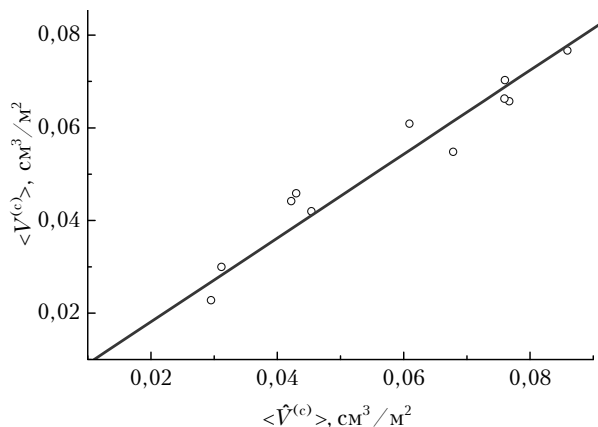


Рис. 6. Диаграмма рассеяния среднемесячных значений  $\langle V^{(c)} \rangle$  и  $\langle \hat{V}^{(c)} \rangle$ , определенных по измерениям  $\tau(\lambda)$  в период с января по ноябрь 2004 г. из решения обратной задачи ( $V^{(c)}$ ) и из уравнения линейной регрессии  $\hat{V}^{(c)}$  по  $\tau(2,203)$  с параметрами за июнь 2004 г.

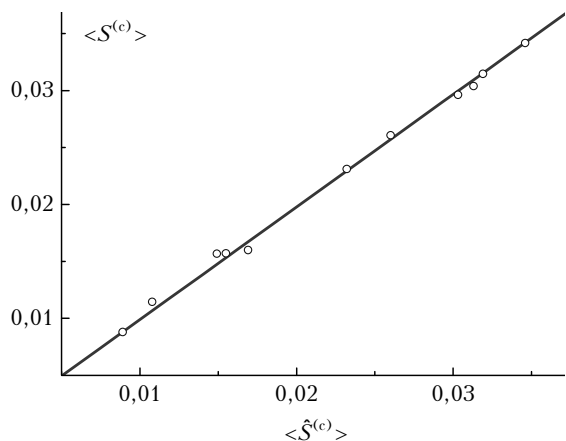


Рис. 7. Диаграмма рассеяния среднемесячных значений  $\langle S^{(c)} \rangle$  и  $\langle \hat{S}^{(c)} \rangle$ , определенных по измерениям  $\tau(\lambda)$  в период с января по ноябрь 2004 г. из решения обратной задачи ( $S^{(c)}$ ) и из уравнения множественной линейной регрессии  $\hat{S}^{(c)}$  (5)

Таблица 3

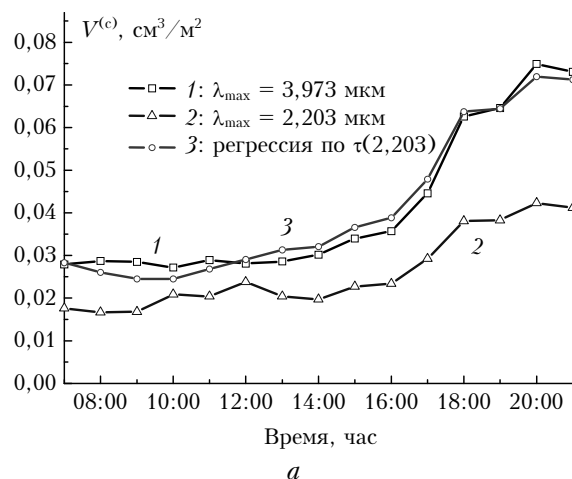
Статистические характеристики, рассчитанные для среднемесячных значений микроструктурных параметров грубодисперсных частиц в период с января по ноябрь 2004 г.

	$\rho$	$m$	$\sigma$	$\hat{\sigma}$
$\langle V^{(c)} \rangle$	0,970	0,0527	0,0172	0,0045
$\langle S^{(c)} \rangle$	0,999	0,0221	0,0088	5,3E-4

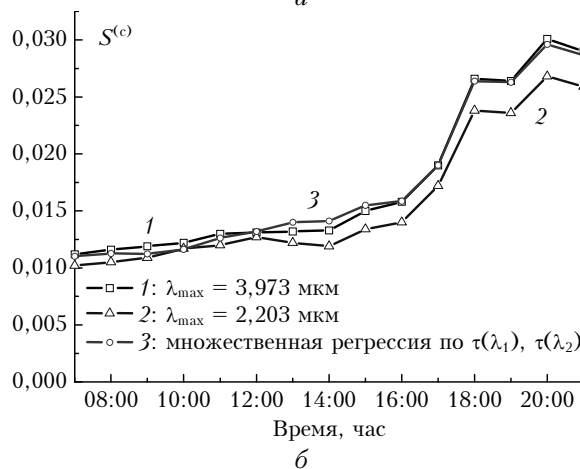
### 3. Восстановление дневного хода микроструктурных параметров грубодисперсных частиц с использованием регрессионных соотношений

Сравним микроструктурные параметры частиц грубодисперсной фракции, определенные из уравнений регрессии, с результатами, которые дает решение обратной задачи для спектральных зависимостей АОТ, измеренных на протяжении одного дня.

На рис. 8 приведены примеры использования простой регрессии  $V^{(c)}$  по  $\tau(2,203)$  (а) и множественной регрессии  $S^{(c)}$  по  $\tau(2,203)$  и  $\tau(1,557)$  (б) при оценке микроструктурных параметров грубодисперсной фракции по среднечасовым измерениям  $\tau(\lambda)$ , выполненным в течение 9 июня 2004 г. Для сравнения на рис. 8 также показана дневная изменчивость параметров  $V^{(c)}$  и  $S^{(c)}$ , которые восстановлены по результатам обращения измерений  $\tau(\lambda)$  [1] при вариациях верхней границы спектрального диапазона  $\lambda_{\max} = 3,973$  (кривые 1) и 2,203 мкм (кривые 2).



а



б

Рис. 8. Дневной ход объемной концентрации  $V^{(c)}$  (а) и геометрического сечения  $S^{(c)}$  (б) частиц грубодисперсной фракции, восстановленный при обращении АОТ  $\tau(\lambda)$  (кривые 1, 2) и с использованием уравнений регрессии (кривая 3)

Кривые 1, полученные при максимальном значении  $\lambda_{\max} = 3,973$  мкм, можно рассматривать в качестве эталонных (реперных) по отношению к зависимостям, восстановленным при меньших значениях  $\lambda_{\max}$ . Эти кривые описывают поведение параметров  $V^{(c)}$  и  $S^{(c)}$ , «неискаженное» вследствие уменьшения  $\lambda_{\max}$ .

Из сравнения кривых 1 и 2 на рис. 8, а следует, что при уменьшении  $\lambda_{\max}$  с 3,973 до 2,203 мкм потери при оценке объемной концентрации грубодисперсных частиц составляют от 15 до 44%. При этом различие среднедневных значений  $V^{(c)}$  достигает 37%.

В то же время видно, что регрессия  $V^{(c)}$  по  $\tau(2,203)$  (кривая 3) приводит к существенному повышению точности оценки  $V^{(c)}$ . Относительное среднее квадратичное отклонение кривой 3 от эталонной зависимости (кривая 1) составляет всего 5,4%, а среднедневные значения указанных зависимостей практически совпадают и равны  $0,0412 \text{ см}^3/\text{м}^2$ .

Те же тенденции сохраняются при восстановлении геометрического сечения грубодисперсных частиц  $S^{(c)}$ . Однако различие между параметрами  $S^{(c)}$ , восстановленными по результатам обращения  $\tau(\lambda)$  при двух значениях  $\lambda_{\max}$  (см. рис. 8, б, кривые 1 и 2), выражено слабее и не превышает 11% при относительном СКО, равном 10%. Тем не менее использование уравнения множественной регрессии (1) обеспечивает уменьшение СКО восстановления параметра  $S^{(c)}$  до 2,4%, или более чем в четыре раза (кривая 3).

Таким образом, представленные данные показывают, что ограничение  $\lambda_{\max}$  при обращении  $\tau(\lambda)$  приводит к заниженным оценкам как объемной концентрации, так и суммарного геометрического сечения грубодисперсных частиц. В таких условиях использование априорно установленных регрессионных соотношений позволяет компенсировать неполноту информации о параметрах  $V^{(c)}$  и  $S^{(c)}$ , содержащейся в зависимостях  $\tau(\lambda)$ , в случае недостаточного широкого спектрального диапазона измерений.

Наконец, рассмотрим возможность оценки из измерений АОТ  $\tau(\lambda)$  среднего радиуса частиц грубодисперсной фракции

$$r_s^{(c)} = (3/4)V^{(c)}/S^{(c)}. \quad (6)$$

Как уже отмечалось, ошибки, возникающие при восстановлении микроструктуры грубодисперсного аэрозоля из решения обратной задачи для аэрозольного коэффициента ослабления в случае недостаточно широкого спектрального интервала измерений, приводят к большой погрешности определения среднего радиуса  $r_s^{(c)}$  [1].

Ранее была установлена слабая корреляционная связь АОТ  $\tau(\lambda)$  и среднего радиуса полного ансамбля частиц, а также его субмикронной и грубодисперсной фракций [14]. В работе [10] предло-

жено восстанавливать средний радиус частиц на основе полиномиальной множественной регрессии по спектральным значениям аэрозольного коэффициента обратного рассеяния.

Для массива данных, рассмотренного в разд. 1, коэффициент корреляции между значениями среднего радиуса грубодисперсных частиц  $r_s^{(c)}$ , восстановленными из решения обратной задачи, и измерениями АОТ  $\tau(\lambda_i)$  на длинах волн  $\lambda_i = 1,557$  и 2,203 мкм не превышает по абсолютной величине 0,22. Невысокие значения коэффициента корреляции делают практически невозможным использование линейной регрессии для непосредственного определения параметра  $r_s^{(c)}$  по измерениям  $\tau(\lambda)$ .

Поэтому проанализируем возможность оценки среднего радиуса  $r_s^{(c)}$  по формуле (6), в которой параметры  $V^{(c)}$  и  $S^{(c)}$  заменены их значениями, определенными с использованием регрессионных соотношений.

Для иллюстрации такого подхода обратимся к рис. 9, на котором показаны результаты определения среднего радиуса  $r_s^{(c)}$  из измерений  $\tau(\lambda)$  в течение дня. Зависимости  $r_s^{(c)}$ , представленные кривыми 1 и 2, определены по значениям параметров  $V^{(c)}$  и  $S^{(c)}$ , которые восстановлены из решения обратной задачи при  $\lambda_{\max} = 3,973$  и 2,203 мкм соответственно и изображены на рис. 8, а, б кривыми с теми же номерами.

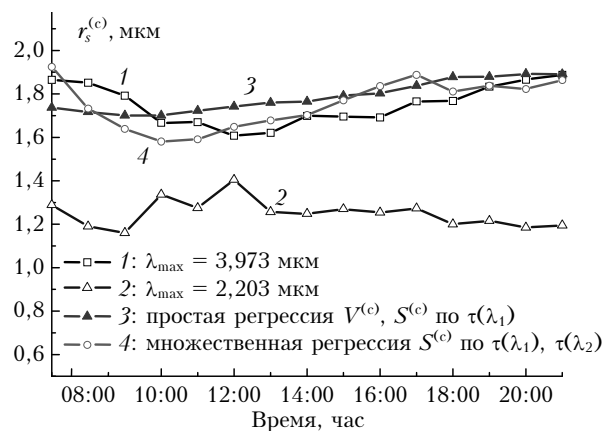


Рис. 9. Восстановление дневного хода среднего радиуса  $r_s^{(c)}$  при обращении АОТ  $\tau(\lambda)$  (кривые 1, 2) и по отношению регрессий  $V^{(c)}$  и  $S^{(c)}$  (кривые 3, 4).

Видно, что решение обратной задачи, полученное при  $\lambda_{\max} = 2,203$  мкм, приводит к значительным ошибкам восстановления параметра  $r_s^{(c)}$ . Поведение кривой 2 на рис. 9 отличается от контрольной зависимости (кривая 1) как количественно, так и качественно. Среднее квадратическое расхождение между кривыми составляет 0,52 мкм.

Кривые 3 и 4 на рис. 9 описывают результаты оценки среднего радиуса  $r_s^{(c)}$  по формуле (6), в которой значения параметров  $V^{(c)}$  и  $S^{(c)}$  определены по измерениям  $\tau(\lambda)$  из уравнений регрессии. Кри-

вая 3 представляет поведение параметра  $r_s^{(c)}$ , восстановленное с использованием уравнений линейной регрессии параметров  $V^{(c)}$  и  $S^{(c)}$  по измерениям АОТ  $\tau(\lambda)$  на одной длине волны  $\lambda = 2,203$  мкм. Ее среднее квадратическое отклонение от контрольной кривой 1 составляет всего 0,09 мкм.

Отличие кривой 4 от кривой 3 состоит в том, что при вычислении  $r_s^{(c)}$  по формуле (6) были использованы значения геометрического сечения  $S^{(c)}$ , рассчитанные с использованием уравнения множественной регрессии (5) по  $\tau(\lambda_i)$  на двух длинах волн (рис. 8, б, кривая 3).

Среднедневные значения радиусов  $r_s^{(c)}$  (кривые 1 и 4) практически совпадают, а среднее квадратическое отклонение между ними составляет 0,08 мкм. Привлечение дополнительных измерений  $\tau(\lambda)$  на длине волны  $\lambda = 1,557$  мкм при оценке  $S^{(c)}$  позволило выявить монотонное уменьшение среднего радиуса  $r_s^{(c)}$  в период с 7 до 11 ч, что находится в хорошем согласии с контрольной зависимостью 1.

Таким образом, использование регрессионных моделей для оценки параметров  $V^{(c)}$  и  $S^{(c)}$  дало возможность восстановить дневную зависимость  $r_s^{(c)}$  с более высокой точностью по сравнению с теми результатами, которые были получены при обращении спектральных измерений АОТ в ограниченном спектральном диапазоне.

## Заключение

Подводя итоги, выделим основные результаты и выводы проведенного исследования. Рассмотрены статистические связи между спектральными измерениями аэрозольной оптической толщины и микроструктурными параметрами частиц грубодисперсной фракции аэрозоля. Для анализа были выбраны результаты измерений АОТ, выполненные в ИОА СО РАН в течение годового цикла наблюдений с использованием многоволнового солнечного фотометра в диапазоне длин волн 0,37–3,973 мкм. Микроструктурные параметры аэрозоля, такие как объемная концентрация, геометрическое сечение и средний радиус частиц, определялись из решения обратной задачи для среднечасовых спектров АОТ.

Установлено, что коэффициент корреляции между объемной концентрацией частиц грубодисперсной фракции  $V^{(c)}$  и АОТ  $\tau(\lambda)$  увеличивается с ростом длины волны и при  $\lambda = 2,203$  мкм становится больше 0,9 (в течение всего периода наблюдений). Высокая корреляция также наблюдается между геометрическим сечением  $S^{(c)}$  и  $\tau(\lambda)$ , достигая уровня 0,98–0,99 уже при  $\lambda \geq 1,557$  мкм. Это позволяет использовать для оценки параметров  $V^{(c)}$  и  $S^{(c)}$  соответствующие уравнения линейной регрессии по  $\tau(\lambda)$ . По отношению параметров  $V^{(c)}$  и  $S^{(c)}$ , восстановленных из уравнений регрессии, можно также определить средний радиус грубодисперсных частиц  $r_s^{(c)}$ , не решая обратную задачу.

Определены ошибки восстановления параметров  $V^{(c)}$  и  $S^{(c)}$  из уравнений простой и множественной линейных регрессий по измерениям АОТ  $\tau(\lambda_i)$  на двух длинах волн  $\lambda_i = 1,557$  и 2,203 мкм. Показано, что использование регрессионных уравнений, построенных по данным ограниченной (1 мес) выборки, при переходе к годичному массиву измерений АОТ  $\tau(\lambda)$  позволяет оценивать параметры  $V^{(c)}$  и  $S^{(c)}$  практически без ухудшения точности по отношению к исходной выборке.

Сравнение параметров  $V^{(c)}$  и  $S^{(c)}$ , определенных с использованием регрессионного подхода, и контрольных данных, полученных при решении обратной задачи, на массиве измерений АОТ в течение одного дня показало, что среднее квадратическое расхождение между ними составило 5,4 и 2,4% соответственно. При оценке среднего радиуса  $r_s^{(c)}$  аналогичное расхождение не превышает 0,08 мкм. Если перейти к среднедневным данным, то различие между соответствующими микроструктурными параметрами, полученными двумя способами, практически исчезает. Это дает основание рассчитывать на более успешное применение регрессионной методики, особенно при анализе усредненных временных зависимостей параметров микроструктуры грубодисперсных частиц, не прибегая к решению обратной задачи.

Таким образом, применение регрессионного подхода дает возможность компенсировать неполноту информации о микроструктурных параметрах грубодисперсных частиц, содержащейся в измерениях АОТ  $\tau(\lambda)$ , в случае недостаточно широкого спектрального диапазона измерений.

1. Веретенников В.В., Меньщикова С.С. Восстановление микроструктуры аэрозоля из измерений ослабления света в атмосфере при ограничении спектрального диапазона // Оптика атмосфер. и океана. 2015. Т. 28, № 10. С. 883–891.
2. Веретенников В.В. Обратные задачи солнечной фотометрии для интегральных аэрозольных распределений. II. Разделение на субмикронную и грубодисперсную фракции // Оптика атмосфер. и океана. 2006. Т. 19, № 4. С. 301–307.
3. Веретенников В.В., Меньщикова С.С. Модифицированный алгоритм восстановления микроструктуры аэрозоля из измерений спектрального ослабления света на основе гибридной модели // Оптика атмосфер. и океана. 2015. Т. 28, № 11. С. 966–971.
4. Горчаков Г.И., Емиленко А.С., Свириденков М.А. Однопараметрическая модель приземного аэрозоля // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. 1981. Т. 17, № 1. С. 39–49.
5. Веретенников В.В., Кабанов М.В., Панченко М.В. Микрофизическая интерпретация однопараметрической модели поляризационных индикатрис (дымка прибрежного района) // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. 1986. Т. 22, № 10. С. 1042–1049.
6. Кабанов М.В., Панченко М.В., Пхалазов Ю.А., Веретенников В.В., Ужegov В.Н., Фадеев В.Я. Оптические свойства прибрежных атмосферных дымок. Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1988. 201 с.



7. *Веретенников В.В.* Интерпретация модели спектрального ослабления дымки морского прибрежного района // *Оптика атмосфер. и океана.* 1990. Т. 3, № 10. С. 1026–1033.
8. *Веретенников В.В., Кабанов М.В., Панченко М.В., Фадеев В.Я.* Применение однопараметрической модели дымки в задачах лазерного зондирования // *Оптика атмосфер. и океана.* 1988. Т. 1, № 2. С. 25–31.
9. *Свириденков М.А.* Корреляционные связи между оптическими характеристиками и микроструктурой приземного аэрозоля // *Оптика атмосфер. и океана.* 2003. Т. 16, № 5–6. С. 418–421.
10. *Лысенко С.А., Кугейко М.М.* Восстановление оптических и микрофизических характеристик поствулканического стратосферного аэрозоля из результатов трехчастотного лидарного зондирования // *Оптика атмосфер. и океана.* 2011. Т. 24, № 4. С. 308–318.
11. *Лысенко С.А., Кугейко М.М.* Восстановление массовой концентрации пыли в промышленных выбросах из результатов оптического зондирования // *Оптика атмосфер. и океана.* 2011. Т. 24, № 11. С. 960–968.
12. *Лысенко С.А., Кугейко М.М.* Нефелометрический метод измерения массовых концентраций городских аэрозолей и их респираторных фракций // *Оптика атмосфер. и океана.* 2014. Т. 27, № 5. С. 435–442.
13. *Лысенко С.А., Кугейко М.М., Хомич В.В.* Метод определения концентраций аэрозольных фракций в приземном воздухе по данным многочастотного лидарного зондирования // *Оптика атмосфер. и океана.* 2015. Т. 28, № 3. С. 199–209.
14. *Веретенников В.В., Меньщикова С.С.* Годовой цикл в изменчивости микроструктурных параметров аэрозоля по данным солнечной фотометрии // *Оптика атмосфер. и океана.* 2014. Т. 27, № 12. С. 1035–1041.
15. *Веретенников В.В.* Обратные задачи солнечной фотометрии для интегральных аэрозольных распределений. I. Теория и численный эксперимент в субмикронной области размеров частиц // *Оптика атмосфер. и океана.* 2006. Т. 19, № 4. С. 294–300.
16. *Веретенников В.В., Меньщикова С.С.* Особенности восстановления микроструктурных параметров аэрозоля из измерений аэрозольной оптической толщины. I. Методика решения обратной задачи // *Оптика атмосфер. и океана.* 2013. Т. 26, № 4. С. 306–312.
17. URL: <http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>
18. *ван де Хюлст Г.* Рассеяние света малыми частицами. М.: ИЛ, 1961. 536 с.
19. *Веретенников В.В.* Совместное определение микроструктуры и показателя преломления аэрозоля по данным солнечной фотометрии // *Оптика атмосфер. и океана.* 2007. Т. 20, № 3. С. 214–221.
20. *Веретенников В.В., Меньщикова С.С.* Применение блочно-итерационного алгоритма для восстановления интегральных аэрозольных распределений по данным солнечной спектрофотометрии // *Оптика атмосфер. и океана.* 2010. Т. 23, № 4. С. 259–264.

***V.V. Veretennikov. Retrieval of microstructure parameters of coarse aerosol using their regression relationships with spectral extinction of light in the IR.***

Possibilities of estimating the microstructure parameters of atmospheric aerosol from regression equations that describe their relationships with spectral measurements of the aerosol optical depth (AOD) are considered. Special attention is given to the volume concentration, total cross section, and average radius of coarse aerosol particles. The urgency of this problem is stipulated by large errors in the retrieval of the above-indicated parameters in the case of direct AOD retrieval from measurements in an insufficiently wide spectral range. The coefficients of simple and multiple linear regressions are estimated and the results of retrieval on their basis of coarse aerosol parameters from data of solar photometry in Tomsk are presented.