

Э.В. Макиенко, Ю.А. Пхалагов, Р.Ф. Рахимов, В.Н. Ужегов, Н.Н. Щелканов

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ МИКРОСТРУКТУРЫ АЭРОЗОЛЯ ЗИМНЕЙ ДЫМКИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ОБРАЩЕНИЯ ДАННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

На основе обращения данных экспериментальных измерений спектральных зависимостей коэффициентов аэрозольного ослабления на горизонтальной трассе в приземном слое атмосферы в диапазоне длин волн 0,44–3,9 мкм анализируются особенности распределения частиц по размерам в зимних условиях. Приведены оценки средних за период измерений значений основных интегральных характеристик микроструктуры аэрозоля для аккумулятивной и грубодисперсной фракций, классифицированные по уровню метеорологической дальности видимости.

Для изучения взаимного влияния регионов на формирование полей концентрации аэрозоля промышленного происхождения под воздействием дальнего переноса воздушных масс, исследования роли аэрозоля как погодообразующего фактора и во многих других прикладных задачах атмосферной оптики необходима информация о сезонной изменчивости распределения частиц по размерам, их концентрации и оптических характеристик как на региональном уровне, так и в отдельных пунктах наблюдений.

В Сибирском регионе первый длительный цикл круглосуточных зимних наблюдений спектрального пропускания атмосферы в видимом и ИК-диапазонах волн был проведен в Томске в декабре 1992 г. [1]. Измерения проводились на горизонтальной трассе длиной 1 км с помощью автоматизированного многоволнового измерителя спектральной прозрачности атмосферы [2]. В результате было получено 199 реализаций спектральных коэффициентов аэрозольного ослабления излучения $\beta_\varepsilon(\lambda)$ в 22 участках спектра диапазона 0,44–12,4 мкм, выполнен статистический анализ характеристик аэрозольного ослабления видимого и ИК-излучения для различных типов оптической погоды [1] и на основе решения обратной задачи исследована динамика трансформации спектра размеров частиц в процессе образования и развития оптически плотной зимней дымки [3]. Как продолжение этих исследований в настоящей статье рассматриваются особенности микроструктуры аэрозоля в зимний период по результатам обращения усредненных оптических данных, полученных в дымках различной плотности.

При наличии спектральных зависимостей коэффициентов аэрозольного ослабления $\beta_\varepsilon(\lambda)$ распределение геометрического сечения частиц по размерам $s(r)$ находилось из системы уравнений вида

$$\int_{R_2}^{R_1} K_\varepsilon(r, \lambda_i) s(r) dr = \beta_\varepsilon(\lambda_i), \quad (1)$$

где r – радиус частиц; $K_\varepsilon(r, \lambda_i)$ – фактор эффективности ослабления излучения на длинах волн λ_i , зависящий от комплексного показателя преломления частиц $m - ik$.

Для обращения уравнения (1) применялся регуляризирующий алгоритм [4], в котором вектор приближенного решения s^* , характеризующий функцию $s(r)$, находился путем непосредственной минимизации сглаживающего функционала T_α в k -мерном векторном пространстве. Функционал T_α по методу регуляризации А.Н. Тихонова записывается в этом случае в виде

$$T_\alpha(s) = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{l=1}^k Q_{\varepsilon,il} s_l - \beta_{\varepsilon,i} \right)^2 + \alpha \Omega(s), \quad (2)$$

где s_l – компоненты вектора решения; $Q_{\varepsilon,il}$ – элементы матрицы, рассчитываемой с использованием квадратурных формул [5] для фиксированной сетки узлов r_l ($l = 1, 2, \dots, k$) и λ_i ($i = 1, 2, \dots, n$) для эффективности ослабления излучения в уравнении (1); α – параметр регуляризации; $\Omega(s)$ – сглаживающий функционал, вид которого определяется характером ограничений, накладываемых на искомое решение [6]. Величина параметра α выбиралась по методу невязки [6] согласованно с уровнем погрешности измерения. Нижняя граница интервала решения R_1 , выбор которого не оказывает существенного влияния на величину $\beta_\varepsilon(\lambda)$ в расчетах по соотношению (1), принималась равной 0,05 мкм. Оценка правой границы спектра размеров R_2 находилась в соответствии с рекомендациями работы [7] по соотношению

$$(R_2)^{-1} \int_{R_1}^{R_2} K_\varepsilon(\lambda_{\max}, r) dr = K_m \beta(\lambda_{\max}) / \beta_{\max}, \quad (3)$$

где $K_m = \beta_{\max} / S$ – полидисперсный фактор эффективности ослабления в точке максимума спектральной зависимости $\beta_\varepsilon(\lambda)$; $S = \int_{R_1}^{R_2} s(r) dr$.

Полученная из соотношения (3) оценка R_2 уточнялась итерационным способом по схеме, предложенной в [8]. Для значения $\lambda_n = 3,9$ мкм полученные оценки R_2 для различных реализаций измеренных зависимостей $\beta_\varepsilon(\lambda)$ находились в интервале 4,3–4,7 мкм.

Усредненные при различном уровне метеорологической дальности видимости (S_m) спектральные зависимости $\beta_\varepsilon(\lambda)$ в 10 точках длин волн 0,44 – 3,9 мкм представлены на рис. 1. Результаты обращения этих данных приведены на рис. 2 для комплексного показателя преломления, выбранного по модели [9] (в видимой области спектра $m = 1,36 - i 0,001$) с учетом того, что в большинстве реализаций наблюдаемые значения относительной влажности воздуха превышали 90%.

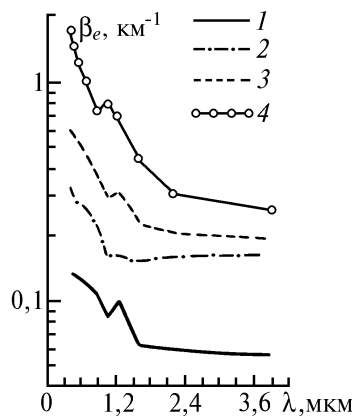


Рис. 1. Измеренные спектральные зависимости коэффициентов аэрозольного ослабления, усредненные по данным за декабрь 1992 г. при различном уровне метеорологической дальности видимости S_m : 1 – $S_m > 20$ км; 2 – $20 > S_m > 10$ км; 3 – $10 > S_m > 5$ км; 4 – $S_m < 5$ км

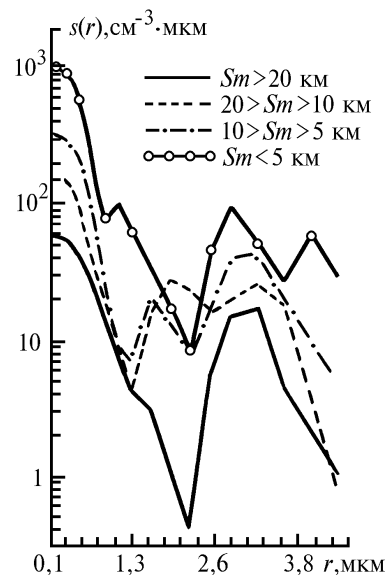


Рис. 2. Распределения геометрического сечения частиц по размерам, восстановленные из обращения данных рис. 1

Характерным признаком восстановленных распределений $s(r)$ является выделение аккумулятивной фракции в субмикронной области размеров частиц и грубодисперсной фракции с макси-

мумом r_s внутри интервала радиусов 2,6–2,9 мкм. На рис. 2 это особенно заметно в распределениях $s(r)$ при S_m больше 20 км и меньше 5 км. Для двух других оптических ситуаций в атмосфере ($20 > S_m > 10$ км) и ($10 > S_m > 5$ км) в распределениях $s(r)$ присутствует явно выраженная среднедисперсная фракция в интервале размеров частиц 0,8–2,5 мкм, происхождение которой, по-видимому, связано с влиянием городских промышленных загрязнений [3]. В фоновых условиях ($S_m > 10$ км) и в сильно замутненной атмосфере ($S_m < 5$ км) относительный вклад этой фракции невелик, однако ее присутствие заметно на рис. 1 и в этих ситуациях. Изменяя крутизну распределения $s(r)$ при $r > 0,8$ мкм, среднедисперсная фракция маскирует границу разделения двух основных аэрозольных фракций, смещая ее в сторону более крупных размеров частиц.

Отмеченные особенности микроструктуры аэрозоля по результатам решения обратной задачи наглядно видны на рис. 3 при сравнении распределения $s(r)$, восстановленного по усредненному за декабрь 1992 г. массиву данных (кривая 2), с моделями различных типов аэрозоля, основанными на прямых измерениях концентрации частиц в атмосфере.

Модельные распределения на рис. 3 для городского и фоновых аэрозолей (кривые 1 и 3 соответственно) построены по данным [10] для интегральных характеристик микроструктуры в предположении логнормального распределения частиц по размерам в каждой аэрозольной фракции.

Другая фоновая модель на рис. 3 (кривая 4) разработана в ИОА СО РАН [11] в результате анализа и обобщения известных данных прямых микрофизических измерений. Сравнение моделей 3 и 4 показывает разброс модельных представлений микроструктуры аэрозоля, основанных на различных массивах исходных данных.

Из рис. 3 видно, что разделение средне- и грубодисперсной фракций аэрозоля и формирование грубодисперсной фракции в узкой области размеров частиц определяют основное отличие восстановленных из обращения оптических данных распределений $s(r)$ от модельных представлений. Особенности микроструктуры среднедисперсного аэрозоля связаны, по-видимому, с локальными условиями, в то время как наиболее вероятной причиной ограниченности справа грубодисперсной фракции является уменьшение выноса с подстилающей поверхности частиц с радиусами более 5 мкм в зимнее время года.

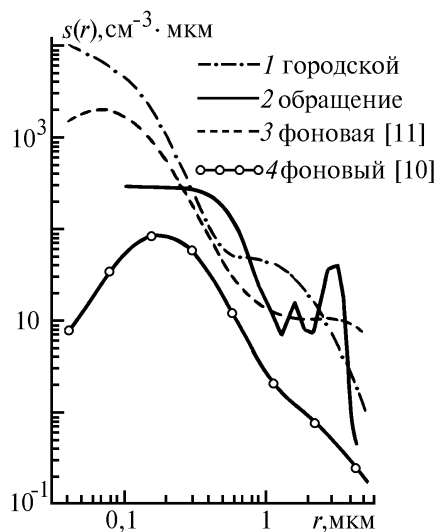


Рис. 3. Модели аэрозоля приземной атмосферы [10, 11] в сравнении с восстановленным распределением $s(r)$ для зимней дымки из обращения оптических данных, усредненных за период измерений (декабрь 1992 г). 1, 4 – данные [10]; 3 – данные [11], 2 – решение обратной задачи

Приведенные на рис. 3 модели [10, 11] не дают представления о сезонных представлениях спектра размеров частиц. В связи с особенностями зимнего сезона (покрытая снегом подстилающая поверхность, отрицательная температура воздуха) представляет интерес сравнение данных, полученных в зимних условиях. Такие данные приведены на рис. 4, где представлена одна из типичных реализаций распределения $s(r)$, построенного по данным фотоэлектрическо-

го счетчика АЗ-5 для зимнего сезона (измерения проводились в Томске в декабре 1992 г.), которые были любезно предоставлены нам д.ф.-м.н. Б.Д. Беланом.

Как видно, фотоэлектрический счетчик разделяет аккумулятивную и среднедисперсную фракции аэрозоля, но показывает существенно более низкие значения концентрации грубодисперсных частиц по сравнению с результатами обращения оптических данных, что естественно, поскольку здесь мы имеем дело с существенно разными объемами усреднения удельного содержания частиц в атмосфере. То же относится к распределению $s(r)$ (кривая 2), построенному по модельным данным о распределении частиц по размерам зимой, полученным в [12] в результате анализа изменений в сельском районе Среднего Поволжья с помощью фотоэлектрического счетчика «Квант».

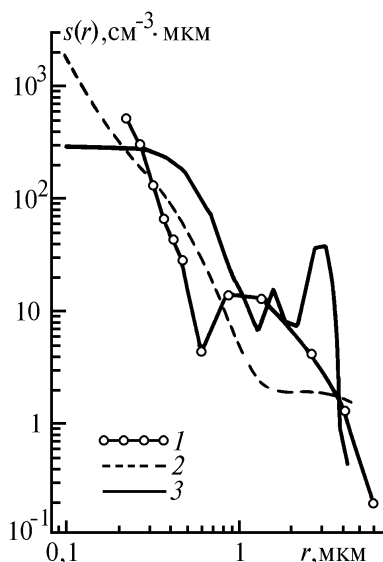


Рис. 4. Распределение геометрического сечения частиц для зимних условий. 1 – фотоэлектрический счетчик (Томск, декабрь, 1992 г.); 2 – модель [12]; 3 – восстановленное из обращения оптических данных

Обращает на себя внимание большая крутизна модельной функции $s(r)$ (кривая 2) в области $r < 0,2$ мкм, для которой распределение частиц по размерам, по данным [12], в зимний период аппроксимируется степенной зависимостью $n(r) = Cr^\nu$ при значении $\nu = 5$ (обычно рекомендуемое значение $\nu = 3$). Большая относительная концентрация мелких частиц над снегом предположительно объясняется в [12] уменьшением зимой конвективно-турбулентного обмена и уменьшением выноса с подстилающей поверхности частиц с $r \geq 7$ мкм.

По нашим оценкам, в области $r < 0,3$ мкм значение ν приблизительно равно 4. В связи с этим следует отметить, что при наименьшей длине волны фотометрической установки $\lambda_1 = 0,44$ мкм измеренные оптические характеристики недостаточно информативны относительно частиц с радиусами $r < 0,15$ мкм. Численный анализ показывает, что следствием этого в интерпретации результатов данного эксперимента может быть занижение до 20–30% в оценках $S(r < 0,15$ мкм) при погрешности оптических измерений на уровне 10%. Погрешность определения $S(r \geq 0,15$ мкм) не превышает уровня погрешности исходных данных.

Распределение $s(r)$ и соответствующая ему величина суммарного геометрического сечения удобны в изучении влияния изменений спектра размеров частиц на оптические характеристики атмосферы. Вместе с тем в ряде прикладных задач, в частности при исследовании аэрозольных загрязнений атмосферы, предпочтительнее перейти к распределению частиц по объемам $v(r) = (4/3)\pi r^3 n(r)$ и к соответствующей величине суммарного объема частиц V в 1 см^3 воздуха. Это позволяет оценивать массовую концентрацию частиц в данном интервале спектра размера.

Дифференциальные распределения $v(r)$ для исходных данных рис. 1, приведенные на рис. 5, еще более наглядно показывают те особенности распределения частиц по аэрозольным фракциям, которые были отмечены при рассмотрении распределений $s(r)$.

В практике анализа микроструктуры аэрозоля данные прямых измерений распределения частиц по размерам обычно аппроксимируются суперпозицией логнормальных распределений на основе аналитической зависимости вида [13].

$$n(r) = \frac{1}{\sigma r \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\left(\ln \frac{r}{r_m} \right)^2 / 2\sigma^2 \right], \quad (4)$$

где r_m – медианный радиус; σ – стандартное отклонение.

Для широкого класса моделей аэрозоля приземной атмосферы [10], основанных на микрофизических данных (частично представленных на рис. 3), величина параметра σ находится в интервале значений 1,79–2,66 для субмикронных частиц и 1,95–2,74 в области $r > 1$ мкм.

Представляет интерес оценить приемлемость аналитической зависимости (4) в описании результатов решения обратной задачи. Аппроксимация восстановленных распределений $v(r)$ суперпозицией двух логнормальных распределений показана на рис. 5 сплошными линиями.

Из рис. 5 видно что наибольший разброс точек восстановленных распределений относительно аппроксимирующей функции приходится на среднедисперсные частицы, которые в модельной аппроксимации не выделялись в виде отдельной фракции. Для распределения $v(r)$, полученного из обращения усредненных по всему массиву оптических данных, найдены оценки параметров $r_{m1} = 0,32$ мкм, $\sigma = 2,27$ для аккумулятивной моды и $r_{m1} = 2,74$ мкм, $\sigma = 1,19$ для грубодисперсной моды. Разброс значений этих параметров в зависимости от дальности видимости показан в таблице.

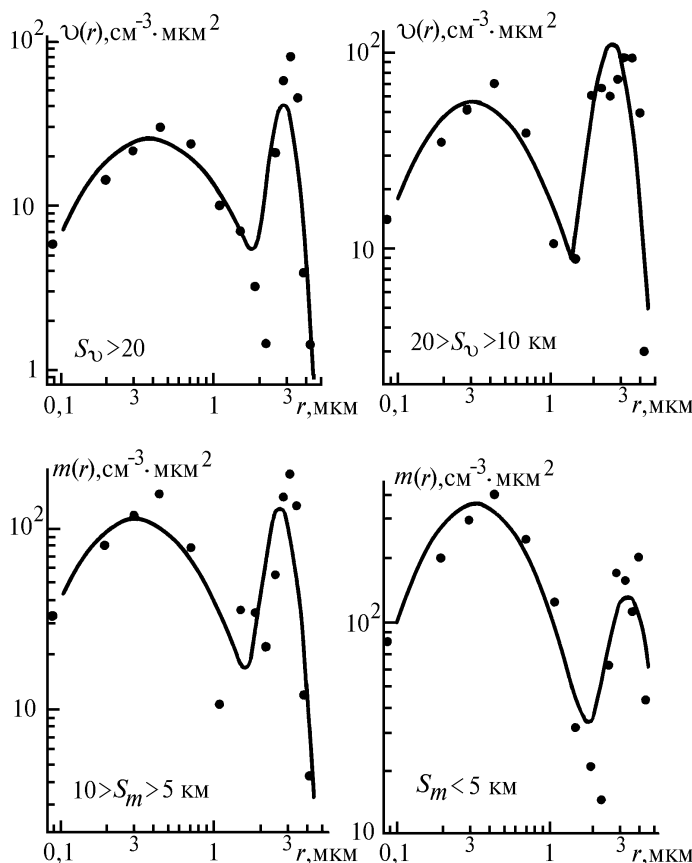


Рис. 5. Распределения частиц по объемам, полученные по результатам решения обратной задачи (обозначены точками) и их аппроксимация аналитическими функциями на основе суперпозиции логнормальных распределений (сплошные линии)

Из таблицы видно, что полученные численные оценки параметра σ , характеризующего полширину распределения, в зимних дымках различной плотности находятся в интервале типич-

ных значений аэрозольных моделей для аккумулятивной фракции частиц и приблизительно в два раза ниже модельных значений для грубодисперсной фракции. Это показывает, что основной особенностью микроструктуры аэрозоля зимнего сезона по результатам решения обратной задачи является локализация грубодисперсной фракции в узком интервале размеров частиц.

Интегральные характеристики микроструктуры зимней дымки в зависимости от метеорологической дальности видимости (МДВ)

МДВ, км	$N, \text{см}^{-3}$	$S, \text{км}^{-1}$	$V, \text{мкм}^3/\text{см}^3$	$r_m, \text{мкм}$	σ
Аккумулятивная фракция					
$S_m > 20$	0,342e3	0,402e-1	0,236e2	0,39	2,32
$10 < S_m < 20$	0,811e3	0,836e-1	0,431e2	0,32	2,15
$5 < S_m < 10$	0187e4	0,183e00	0,889e2	0,31	2,09
$S_m < 5$	0,475e4	0,510e00	0,283e3	0,33	2,27
Грубодисперсная фракция					
$S_m > 20$	0,881e00	0,198e-1	0,772e2	2,88	1,17
$10 < S_m < 20$	0,255e01	0,483e-1	0,176e3	2,58	1,25
$5 < S_m < 10$	0,325e01	0,610e-1	0,225e3	2,73	1,20
$S_m < 5$	0,323e01	0,720e-1	0,294e3	3,27	1,29

В таблице приведены оценки основных интегральных характеристик микроструктуры аэрозоля зимней дымки, полученные из решения обратной задачи, классифицированные по уровню метеорологической дальности видимости. Значения параметров аккумулятивной фракции даны в таблице для частиц с радиусами $r > 0,05$ мкм. Величина счетной концентрации частиц аккумулятивной фракции в значительной степени определяется содержанием частиц в интервале радиусов 0,05–0,15 мкм, относительная доля которых достигает 75%, однако их вклад в суммарное геометрическое сечение не превышает 15%. С увеличением замутненности атмосферы от фоновых условий ($S_m = 30$ км) до оптически плотной дымки ($S_m = 3$ км) относительная доля суммарного геометрического сечения частиц аккумулятивной фракции возрастает от 66 до 88%, причем эта зависимость, как видно из рис. 6, имеет нелинейный характер.

Грубодисперсная фракция аэрозоля, составляя доли процента счетной концентрации частиц, по суммарному объему частиц в 1 см^3 сравнима по величине с аккумулятивной фракцией в сильно замутненной атмосфере, а в фоновых условиях в 3 раза ее превосходит. Эти оценки показывают важность повышения точности в измерениях концентрации грубодисперсных аэрозолей промышленного происхождения для надежного прогноза их воздействия на экологическое состояние окружающей среды.

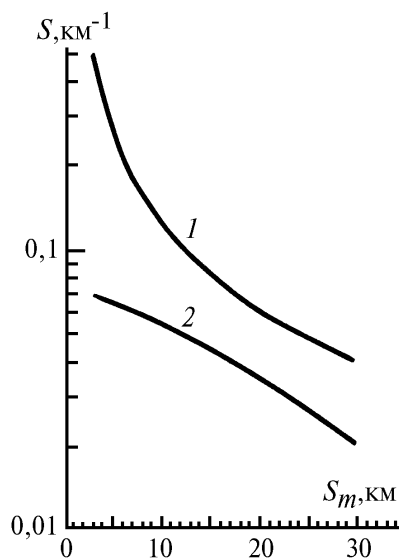


Рис. 6. Зависимость суммарного геометрического сечения частиц S от метеорологической дальности видимости S_m . 1 – аккумулятивная фракция; 2 – грубодисперсная фракция

В заключение отметим, что особый интерес в исследовании оптико-микрофизических свойств зимней дымки [1, 3] представляет такой важный аспект проблемы атмосферного аэрозоля, как изучение специфики его формирования при отрицательных температурах, поскольку при этом важную роль играет процесс фазовой трансформации атмосферной влаги.

Полученные численные оценки параметров микроструктуры аэрозоля зимней дымки дают возможность перейти от измеренных коэффициентов аэрозольного ослабления к другим оптическим характеристикам, в частности, позволяют рассчитать элементы матрицы рассеяния в пределах их информативности относительно спектра размеров частиц в данном интервале.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 94-05-16463-а).

1. Ужegov В.Н., Пхалагов Ю.А., Щелканов Н.Н. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. N 8. С. 1067–1076.
2. Пхалагов Ю.А., Ужegov В.Н., Щелканов Н.Н. // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. N 6. С. 667–671.
3. Макиенко Э.В., Пхалагов Ю.А., Рахимов Р.Ф., Ужegov В.Н., Щелканов Н.Н. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. N 12. С. 1504–1507.
4. Костин Б.С., Макиенко Э.В., Наац И.Э. // Проблемы дистанционного зондирования атмосферы. Томск: ИОА СО АН СССР, 1976. С. 86–97.
5. Наац И.Э. Теория многочастотного лазерного зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1980. 157 с.
6. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных обратных задач. М.: Наука, 1974. 203 с.
7. Зуев В.Е., Наац И.Э. Обратные задачи лазерного зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1982. 242 с.
8. Веретенников В.В. // Оптика атмосферы. 1990. Т. 3. N 10. С. 1026–1033.
9. Ивлев Л.С. Химический состав и структура атмосферных аэрозолей. Л.: Изд. ЛГУ, 1982. 366 с.
10. Aerosol and their climatic effects. Report of WMO(CAS) radiation commission of LAMAP Meeting of Experts. WCP-55. Williamsburg, Virg. USA, March 1983. 110 p.
11. Креков Г.М., Рахимов Р.Ф. Оптические модели атмосферного аэрозоля. Томск: ИОА СО АН СССР, 1986. 294 с.
12. Филиппов В.Л., Иванов В.П., Колобов Н.В. Динамика оптической погоды. Казань: Изд. КГУ, 1986. 157 с.
13. Современные проблемы атмосферной оптики. Т. 4. /Зуев В.Е., Кабанов М.В. Оптика атмосферного аэрозоля. Л.: Гидрометеоздат, 1987. 254 с.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
29 декабря 1994 г.

E. V. Makienko, Ju. A. Pkhalagov, R. F. Rakhimov, V. N. Uzhegov, N. N. Shchelkanov. **Peculiarities of Winter Haze Aerosol Microstructure Resulted from Analysis of Optical Measuring Data Handling.**

The peculiarities of particles size distribution under winter conditions are analysed based on data handling of experimental measurements of the aerosol attenuation coefficients spectral dependencies within 0,44–3,9 μm wavelength range. The estimates of main integral characteristics of the aerosol microstructure of accumulative and coarse-dispersed phases averaged over the measurement period are presented being classified by the level of meteorological range.