

УДК 551.510.42

© 1992 г. А.В. АНДРОНОВА, Б.Д. БЕЛАН, Д.А. ДЖИЛЛЕТТ,  
А.А. ИСАКОВ, В.М. ЖУКОВ, Д.А. ЖУКОВСКИЙ,  
С.М. КОЛОМИЕЦ, М.В. ПАНЧЕНКО, М.А. СВИРИДЕНКОВ,  
В.В. СМИРНОВ, И.Н. СОКОЛИК

МИКРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЫЛЕВОГО АЭРОЗОЛЯ  
ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СОВЕТСКО-АМЕРИКАНСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА  
(ТАДЖИКИСТАН, 1989 г.)

Проведено сопоставление данных о микроструктуре пылевого аэрозоля, полученных разными методами в советско-американском эксперименте в Таджикистане. Предложена аналитическая аппроксимация наиболее оптически активной фракции пылевого аэрозоля ( $1-10 \text{ мкм}$ ) логарифмически нормальным распределением частиц по размерам.

Пустынные регионы, занимающие почти треть суши планеты, являются основным источником средне- и крупнодисперсного аэрозоля. Учет климатической роли почвенно-эрзационного аэрозоля невозможен без знания особенностей его микроструктуры в различных географических зонах. В советско-американском эксперименте по исследованию аридного аэрозоля, проведенном в 1989 г. в Таджикистане, было задействовано более десяти различных приборов, анализировавших дисперсный состав аэрозоля. Это не только позволило получить комплексную информацию о микрофизических характеристиках пылевого аэрозоля среднеазиатского региона, но и предоставило удобную возможность для сравнения и интеркалибровки аппаратуры, основанной на разных методах анализа распределений частиц по размерам.

Аппаратура для исследования микроструктуры аэрозоля  
в пылевом эксперименте

Комплекс аппаратуры, использовавшийся в эксперименте 1989 г., позволил охватить диапазон размеров частиц от  $10^{-2}$  до  $10^2 \text{ мкм}$ . Микродисперсная фракция исследовалась с помощью электростатического анализатора 3030 фирмы Термо-Системс (диапазон измерений  $D = 0,025 - 1 \text{ мкм}$ ) и электростатического полевого счетчика ДАЭС ( $D = 0,005 - 0,5 \text{ мкм}$ ) [1].

Для анализа субмикронного и среднедисперсного аэрозоля использовались:

1. Счетчики аэрозоля: лазерный анализатор ДЕЛЬТА-1 ( $D = 0,17 - 20 \text{ мкм}$ ), лазерный сканирующий анализатор ДЕЛЬТА-2 ( $D = 0,12 - 5 \text{ мкм}$ ), фотоэлектрический полевой счетчик Ройко-218 [1], фотоэлектрические счетчики АЗ-5 [2] ( $D = 0,4 - 10 \text{ мкм}$ ), Ройко-220 ( $D = 0,4 - 7 \text{ мкм}$ ) [3].

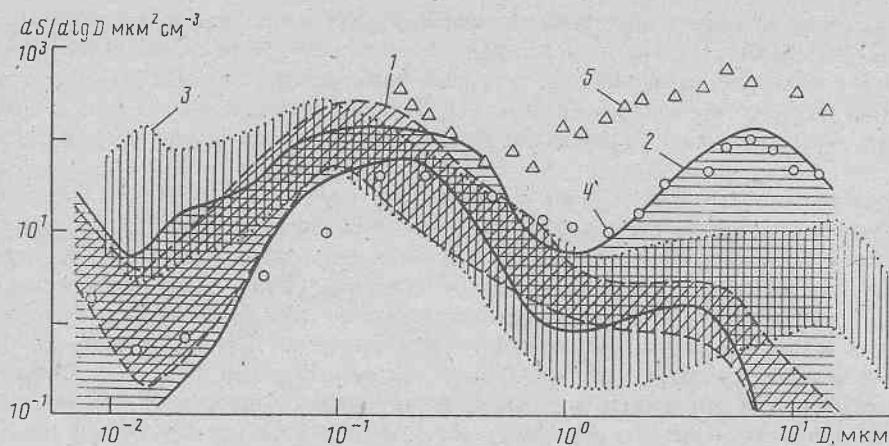


Рис. 1. Обобщенные дифференциальные спектры площадей частиц континентального аэрозоля: 1 – сельская местность в центре ЕТС; 2 – непромышленный город в центре ЕТС; 3 – Большие Равнины (США). [14]; 4 – полупустыня (район п. Шаартуз, Таджикистан, спустя сутки после пыльной бури); 5 – спустя 3 ч после прекращения пыльной бури

2. Импакторы [3, 4], кассеты с мембранными фильтрами [4]. Диапазоны размеров, соответствующие каскадам импакторов: < 0,5; 0,5–1,5; 1,5–2,5; 2,5–4,0; 4,0–6,5; 6,5–13 мкм [3] и < 0,73; 0,73–1,3; 1,3–2,2; 2,2–4,6; > 4,6 мкм [4]. Распределение масс частиц по размерам в каскадных импакторах определялось взвешиванием подложек импактора до и после окончания отбора проб. Система фильтров позволяет исследовать частицы в диапазоне 0,4–60 мкм. Кассеты с фильтрами устанавливались на флюгерге. Открывание в направлении ветра осуществлялось таким образом, что поток воздуха в пробоотборную трубку поступал со скоростью, равной средней скорости ветра, что обеспечивало изокинетический режим отбора проб [4]. Анализ фильтров проводился на сканирующем электронном микроскопе.

3. Солнечный ореольный фотометр. Индикаторы яркости солнечного ореола в диапазоне углов рассеяния  $2^\circ$ – $10^\circ$  для четырех длин волн в видимой и ближней ИК-области спектра использовались для определения параметров микроструктуры аэрозоля с применением итерационного алгоритма решения обратной задачи. В результате получалось средневзвешенное по столбу атмосферы распределение частиц по размерам в диапазоне диаметров 0,4–20 мкм [5].

Наиболее крупные частицы аэрозоля во время пыльных выносов собирались с помощью пассивных коллекторов частиц. Анализ приводился с использованием оптической и электронной микроскопии [4, 6].

Интегральная массовая концентрация аэрозоля определялась взвешиванием проб, отобранных на фильтры типа АФА [3].

Измерения проводились в трех пунктах в долине реки Кафирниган: г. Душанбе, пос. Шаартуз, пос. Эсанбай). Наземные наблюдения (счетчики, импакторы) дополнялись измерениями в столбе атмосферы (ореольный фотометр) и измерениями параметров микроструктуры в нижнем пятикилометровом слое атмосферы (счетчик частиц на борту самолета-лаборатории) [2].

### Результаты наземных измерений

За период эксперимента (8–26 сентября 1989 г.) отмечено два пылевых выноса 16–17. IX и 20–21. IX. Массовое содержание аэрозоля в приземном слое 20. IX достигало  $5 \text{ mg/m}^3$ , что примерно в 3–5 раз больше, чем 17. IX и почти на два порядка превышает фоновое значение (12. IX).

Сравнение распределений частиц по размерам, полученных в разных местностях

(рис. 1), свидетельствует об относительном дефиците в аридной зоне самых мелких частиц ( $D \approx 0,01$  мкм) [1]. Это может быть связано как с эффектами сухого вымывания, так и с меньшей интенсивностью генерации микродисперсных частиц, являющихся продуктом внутриатмосферного синтеза [7]. Данные, приведенные на рис. 1, показывают, что в аридной зоне увеличивается относительная роль частиц размером более 1 мкм.

В условиях пыльных бурь частицы с диаметрами, превышающими 0,5–1 мкм, наиболее оптически активны. Этот диапазон размеров в эксперименте 1989 г. исследовался с помощью нескольких типов приборов. Сопоставление данных, полученных разными методами, сопряжено с определенными трудностями, вызванными несовпадающими диапазонами измерений размеров, концентрации частиц. Каждый прибор характеризуется своими масштабами пространственного и временного осреднения, размерностью исходных данных (например, счетная и массовая концентрация аэрозоля). Систематические погрешности могут быть вызваны несовпадением комплексного показателя преломления вещества пылевого аэрозоля с показателем преломления частиц, использовавшихся для калибровки счетчика. При больших концентрациях возможны искажения спектра размеров вследствие одновременного попадания в счётный объем двух и более частиц [8]. Расхождения в данных счетчиков и импакторов могут быть вызваны различием оптического и аэродинамического диаметров частиц, зависимостью коэффициента аспирации от размера частиц аэрозоля [8]. Ошибки в определении спектра размеров по ореольным индикаторам связаны с некорректностью обратных задач светорассеяния [9].

Тем не менее следует отметить, что все приборы дают близкие оценки относительной интенсивности пылевых выбросов. Вся совокупность данных наблюдений свидетельствует о наличии нескольких фракций аридного аэрозоля с ярко выраженной среднедисперсной фракцией (1–10 мкм). Во время пыльных бурь уменьшается относительный вклад тонкодисперсного аэрозоля ( $D < 1$  мкм). Можно предположить, что в пыльных бурях средне- и грубодисперсный аэрозоль является стоком для субмикронного, что подтверждается анализом структуры больших частиц с помощью электронного микроскопа [6].

Сопоставление одновременных измерений распределений частиц по размерам счетчиками АЗ-5 (Главная геофизическая обсерватория) и Дельта (Институт экспериментальной метеорологии) в Шаартузе (рис. 2) показывает, что в области размеров 0,5–5 мкм два типа приборов дают близкие результаты. Из рис. 2 также следует, что увеличение замутненности атмосферы в пылевых эпизодах происходит прежде всего за счет роста числа частиц среднедисперсной фракции (1–10 мкм). Данные, полученные в условиях пыльной бури 20.IX методом фильтров (кривая 1 на рис. 2) не противоречат при  $D = 0,5$ –5 мкм показаниям счетчиков по виду зависимости  $dN/d\log D$ . Примерно трехкратное отличие концентраций объясняется тем, что измерения лазерными и фотозелектрическими анализаторами проводились после периода максимального развития пыльной бури.

В [4] указывается, что импактор большого объема дал результаты, аналогичные фильтровым. На рис. 3 приведены спектры массовых концентраций для второго пылевого эпизода, полученные в Шаартузе (нуклеопорные фильтры, пересчет проводился для плотности вещества аэрозоля 2,5 г/см<sup>3</sup>) [4] и в Эсанбае [3]. Несмотря на значительное расстояние между пунктами ( $\approx 90$  км) общий вид зависимостей  $dM/d\log D$  оказался сходным. Совпало положение максимумов (5 мкм), а величины дифференциальных массовых концентраций в максимуме отличаются менее чем в 1,5 раза.

Для оценки радиационно-оптических эффектов пылевого аэрозоля важен вопрос, насколько данные наземных измерений representative для всей нижней тропосферы. На рис. 4 представлены распределения по размерам, полученные с помощью счетчика АЗ-5 и по ореольным индикаторам в предположении, что высота слоя аэрозоля составляет 3 км (Душанбе 17.IX, 12 ч местного времени). Там же нанесена кривая для фильтровых измерений 16.IX в Шаартузе [4] (пылевое облако пришло в Душанбе позже, чем в Шаартуз). В области больших размеров ( $D > 8$  мкм) счетчик и фильтры дают за-

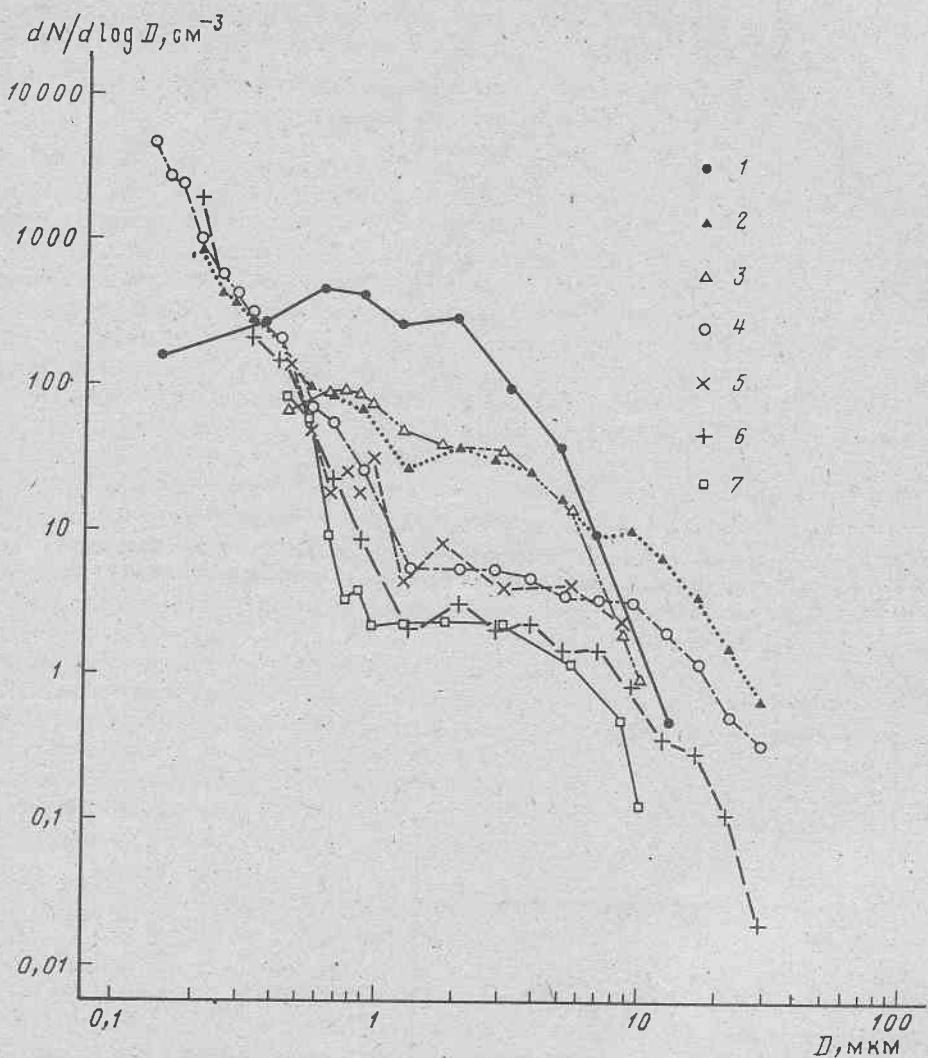


Рис. 2. Распределения частиц по размерам в Шаартузе, сентябрь 1989; 1–3 – 20.IX, 4, 5 – 11.IX, 6, 7 – 21.IX; 1 – измерения с помощью фильтров; 2, 4, 6 – анализаторы Дельта-1,2; 3, 5, 7 – счетчик АЗ-5

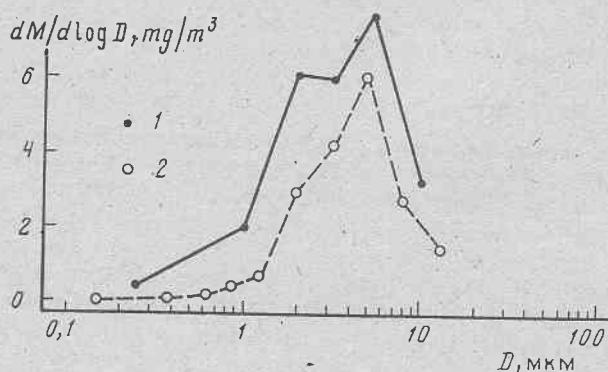


Рис. 3. Массовые распределения аэрозоля в пыльной буре 20.IX: 1 – Эсанбай, каскадный импактор; 2 – Шаартуз, мембранные фильтры

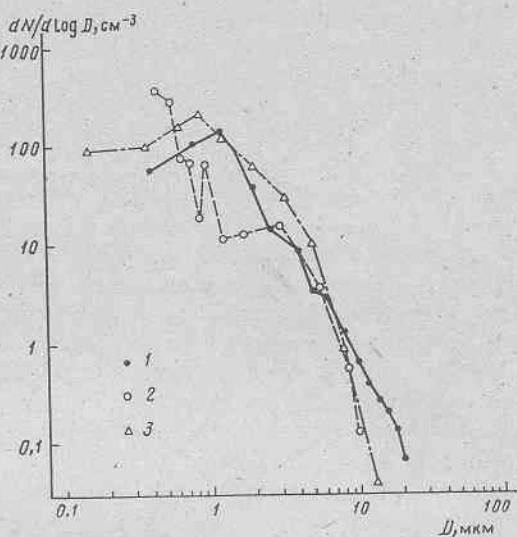


Рис. 4. Распределение частиц по размерам для Душанбе 17.IX (1, 2) и Шаартуза 16.IX (3); 1 – по индикаторам солнечного ореола; 2 – фотоэлектрический счетчик АЭ-5; 3 – мембранные фильтры

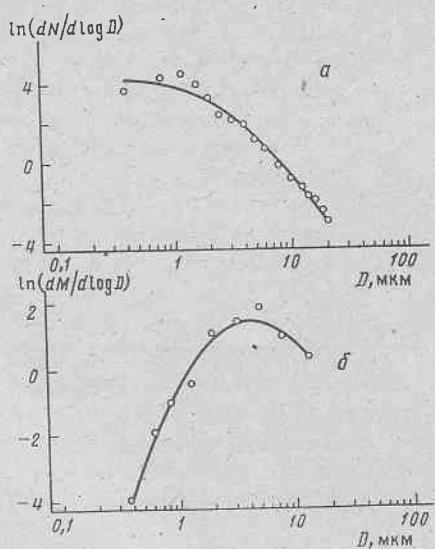


Рис. 5

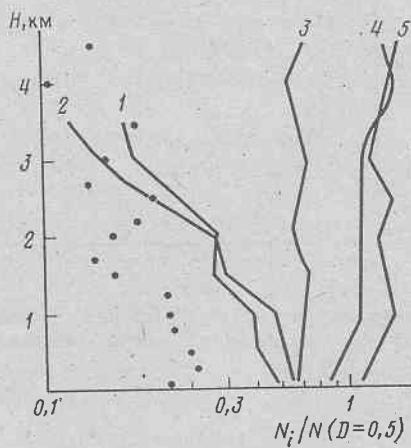


Рис. 6

Рис. 5. Аппроксимация экспериментальных данных логарифмически нормальными функциями

Рис. 6. Вертикальные профили отношения концентрации частиц различных поддиапазонов размеров

к концентрации частиц с  $D = 0,4\text{--}0,5 \mu\text{м}$ ; 1, 2 – "чистые" условия; 3–5 – пыльная буря (3 –  $D = 0,7\text{--}0,8 \mu\text{м}$ ; 4 –  $D = 1\text{--}1,5 \mu\text{м}$ ; 5 –  $D = 2\text{--}4 \mu\text{м}$ , + – 4–7  $\mu\text{м}$ )

нижнюю концентрацию по сравнению с ореольными данными. В диапазоне  $0,5\text{--}8 \mu\text{м}$  спектры размеров частиц в толще атмосферы и в приземном слое в Шаартузе подобны. Наибольшее отличие (почти на порядок) этих данных от результатов измерений с помощью фотоэлектрического счетчика проявляется при  $D \approx 1 \mu\text{м}$ .

Измерения с использованием коллектора пассивных частиц свидетельствуют о присутствии у поверхности земли во время пыльной бури частиц с диаметрами более

60 мкм [4]. Анализ грубодисперсных частиц под электронным микроскопом [6] дает максимум распределения крупных частиц по размерам в диапазоне 40–50 мкм.

### Аналитическая аппроксимация спектра размеров среднедисперсной фракции пылевого аэрозоля

Большинство использовавшихся в эксперименте методик дают сопоставимые результаты в диапазоне размеров частиц 0,5–8 мкм. Эта фракция, как отмечалось выше, во многом определяет оптические характеристики пылевого аэрозоля (более крупные частицы обладают малым временем жизни в атмосфере, а роль субмикронного аэрозоля в аридной зоне меньше, чем в других регионах). На диапазон 1–10 мкм приходится максимум объемной (массовой) концентрации пылевого аэрозоля.

Для описания спектра размеров наиболее адекватно логарифмически нормальное распределение [10]. В [11] показано, что в диапазоне  $D = 1–20$  мкм во многих пунктах земного шара распределения почвенно-эрзационного аэрозоля имеют логнормальную форму. Не является исключением и район эксперимента 1989 г. На рис. 5, а, б показана аппроксимация логнормальными зависимостями счетной и объемной концентрации аэрозоля по измерениям 17.IX в Душанбе (индикаторы солнечного ореола) и 16.IX в Шаартузе (фильтры). В первом случае медианный диаметр  $D_{mn}$  равен 0,5 мкм, а дисперсия логарифма диаметра  $\nu^2 = 0,95$ . Во втором  $D_{mv} = 4,4$  мкм,  $\nu^2 = 0,55$ . Обе аппроксимации дают близкие значения моды объемного распределения. Большая полуширина первого распределения связана с отклонениями от логнормальной зависимости. Приближение двумя логнормальными функциями позволяет учесть особенности функции распределения, однако такое разделение на две подфракции было бы достаточно условным. На основании рассмотрения данных различных приборов в первом приближении можно предложить в качестве модели микроструктуры аридного аэрозоля логарифмически нормальную функцию с параметрами  $D_{mv} = 3,5–6$  мкм,  $\nu^2 = 0,5–0,8$ , причем меньшим значением  $D_{mv}$  соответствуют большие значения  $\nu^2$ , и наоборот.

Результаты измерений микроструктуры среднедисперсной фракции аридного аэрозоля не противоречат данным для других регионов [11, 12].

### Высотный ход микрофизических параметров пылевого аэрозоля

Исследования вертикальной структуры пылевого аэрозоля проводились с борта самолета-лаборатории АН-30 Института оптики атмосферы с помощью счетчика АЗ-5 [2]. Измерения профилей коэффициентов рассеяния, концентрации аэрозоля, метеопараметров показали, что в пыльных бурях ярко выраженная температурная инверсия на высотах  $\approx 3$  км оказывает запирающее воздействие на аэрозольное облако, хорошо перемешанное в подынверсионном слое вследствие развитой турбулентности. На рис. 6 приведены вертикальные профили отношения концентрации частиц разных диапазонов размеров к концентрации для  $D = 0,4–0,5$  мкм. В "чистых" условиях относительное содержание частиц с  $D > 0,7$  мкм с ростом высоты монотонно снижается (кривые 1 и 2). В пыльной мгле, благодаря интенсивному перемешиванию, отношение  $N(D)/N$  ( $D = 0,4–0,5$ ) практически не меняется с высотой и только при  $D > 4$  мкм проявляется тенденция к некоторому убыванию. Аналогичный результат был получен над Сахарой [13]. Стабильность спектров размеров в подынверсионном слое объясняет соответствие наземных и усредненных по высоте функций распределения частиц по размерам.

В прилегающем к земле слое во время пылевых эпизодов отмечалась разница в счетных концентрациях между пробами, отобранными в Шаартузе на двух высотах – 1,51 и 5,84 м. Более высокая концентрация на верхнем уровне объясняется тем, что поверхность в районе станции Шаартуз служила стоком для принесенных пылевых частиц [4]. Во время пыльной бури 20.IX в течение примерно 1 ч имела место ветровая эрозия, и район Шаартуза был источником пыли. После 12 ч местного времени скорость ветра была меньше пороговой и наблюдалось увеличение концентрации с высотой.

## Заключение

Полученные в эксперименте данные позволяют получить общее представление о микроструктуре аридного аэрозоля в широком диапазоне размеров (0,005–100 мкм). Апроксимация оптически активной фракции аридного аэрозоля логнормальным распределением с параметрами  $D_{mv} = 3,5\text{--}6$  мкм;  $\sigma^2 = 0,5\text{--}0,8$  может быть использована в оценочных радиационных расчетах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирнов В.В. Характерные особенности дисперсного состава аридного аэрозоля // Советско-американский эксперимент по изучению аридного аэрозоля. СПб: Гидрометеоиздат, 1992. С. 143–154.
2. Белан Б.Д., Кабанов Д.М., Панченко М.В. и др. Самолетное зондирование параметров атмосферы в полевом эксперименте // Советско-американский эксперимент по изучению аридного аэрозоля. СПб: Гидрометеоиздат, 1992. С. 26–38.
3. Андронова А.В., Костица Е.М., Минашкин В.М., Обвинцев Ю.И. Микрофизические свойства пылевого аэрозоля // Советско-американский эксперимент по изучению аридного аэрозоля. СПб: Гидрометеоиздат, 1992. С. 157–165.
4. Джиллетт Д.А., Нагамото К. Распределение по размерам и состав частиц по результатам наблюдений двух полевых бурь в Средней Азии в сентябре 1989 г. // Советско-американский эксперимент по изучению аридного аэрозоля. СПб: Гидрометеоиздат, 1992. С. 130–140.
5. Исааков А.А. и др. О микроструктуре аэрозоля пыльной мглы и городской дымки. г. Душанбе // Советско-американский эксперимент по изучению аридного аэрозоля. СПб: Гидрометеоиздат, 1992. С. 165–170.
6. Смирнов В.В. Морфологические, структурные и химические особенности аэрозолей пылевых бурь в Таджикистане // Советско-американский эксперимент по изучению аридного аэрозоля. СПб: Гидрометеоиздат, 1992. С. 110–118.
7. Розенберг Г.В. Возникновение и развитие атмосферного аэрозоля – кинетически обусловленные параметры // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1983. Т. 19. № 1. С. 21–35.
8. Беляев С.П., Никифорова Н.К., Смирнов В.В., Щеглов Г.И. Оптико-электронные методы изучения аэрозолей. М.: Энергоиздат, 1981. С. 232.
9. Розенберг Г.В. Определение микрофизических параметров золя по данным комплексных оптических измерений // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1976. Т. 12. № 11. С. 1159–1167.
10. Whiby K. T. Modeling of atmospheric aerosol particle size distributions // Progress Report, Particle Technology Lab. USA. Univ. of Minnesota, 1971. 42 p.
11. Patterson E.M., Gillette D.A. Commonalities in measured size distributions for aerosols, having a soil derived component // J. Geophys. Res. 1977. V. 82. P. 2074–2082.
12. Levin Z., Joseph J.H., Mekler Y. Properties of Sharav (Khamsin) Dust-Comparison of Optical and Direct Sampling Data // J. Atmqs. Sci. 1980. V. 37. № 4. P. 882–8917.
13. Fouquart Y. et al. Observations of Saharan Aerosols: Results of ECLATS Field Experiment. Pt 1: Optical Thicknesses and Aerosol Size Distributions // J. Clim. and Appl. Met. 1986. V. 26. № 1. P. 28–37.
14. Hobbs P.V., Lyons I.H., Radke L.E. Background particle size distribution over North America // Proc. 12th Intern. Conf. on atmos. aerosols and ice nuclei. Vienna, 1988. 228 p.

Российская академия наук  
Институт физики атмосферы

Поступила в редакцию  
3. III 1992

A.V. ANDRONOVA, B.D. BELAN, D.A. CILLETTE, A.A. ISAKOV,  
V.M. ZHUKOV, D.A. ZHUKOVSKY, S.M. KOLOMIETS, M.V. PANICHENKO,  
M.A. SVIRIDENKOV, V.V. SMIRNOV, I.N. SOKOLIK

## MICROPHYSICAL CHARACTERISTICS OF THE DUST AEROSOL BY THE RESULTS OF THE SOVIET-AMERICAN EXPERIMENT (TADJIKISTAN, 1989)

The comparison of dust aerosol microstructure data obtained by different techniques during the Soviet-American experiment in Tadzhikistan is presented. The analytical approximation of the optically most active fraction of the dust aerosol (1–10  $\mu\text{m}$ ) by the lognormal distribution is proposed.