

Флуктуации микроструктуры грубодисперсного и субмикронного аэрозоля на опустыненной территории

А.В. Карпов*

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
119017, г. Москва, Пыжевский пер., 3

Поступила в редакцию 2.02.2008 г.

По данным измерений флуктуаций микроструктуры аридного аэрозоля на опустыненной территории восстановлена функция распределения частиц аэрозоля, генерируемого на подстилающей поверхности под воздействием ветропесчаного потока. Получена оценка пороговой скорости ветра при выносе субмикронного и грубодисперсного аэрозоля с подстилающей поверхности.

Ключевые слова: аридный аэрозоль, флуктуации концентрации аэрозоля, генерация грубодисперсного аэрозоля.

Введение

Выполненные ранее измерения флуктуаций дифференциальных счетных концентраций частиц аэрозоля на опустыненной территории в Приаралье [1–3] позволили восстановить микроструктуру компоненты аэрозоля, генерируемого на подстилающей поверхности под воздействием ветропесчаного потока, в диапазоне размеров частиц от 0,3 до 1,6 мкм [4–6]. В настоящей статье решается задача восстановления функции распределения для указанной компоненты аэрозоля в диапазоне размеров 0,5–5,0 мкм по данным измерений флуктуаций микроструктуры аэрозоля в августе 2007 г. в Харабалинском районе Астраханской области [7, 8] (заказник «Пески Берли»). Выполнено сопоставление флуктуаций микроструктуры аэрозоля с турбулентными пульсациями компонент скорости ветра [9].

Методика измерений и аппаратура

Флуктуации дифференциальных счетных концентраций частиц аэрозоля измерялись с помощью разработанного в НИФХИ им. Л.Я. Карпова оптико-электронного счетчика частиц ОЭАС-05, зарегистрированного в Госреестре средств измерений РФ (РУ.Е.31.002.А № 134713047/1). В табл. 1 указа-

ны номера каналов счетчика, границы диапазонов и средние диаметры частиц в каналах.

Диапазон измерений счетной концентрации частиц аэрозоля во всех указанных каналах — от 1 до 10^3 частиц/см³. Предел допустимой основной относительной погрешности измерения счетной концентрации частиц аэрозоля (при количестве измеренных частиц в канале не менее 100) составляет $\pm 20\%$. Управление счетчиком частиц осуществлялось через ПЭВМ: задаются интервал измерений и число серий. Результаты измерений записывались на жестком диске и в реальном времени выводились на экран монитора. Счетные концентрации во время измерений на опустыненной территории усреднялись по 9-секундным интервалам. Длительность интервала осреднения выбиралась из условия компромисса между достаточно высоким временным разрешением и статистической обеспеченностью измеряемых концентраций (подробнее см. в [1]).

Счетчик частиц был установлен на высоте 1 м, а воздухозаборное устройство было ориентировано навстречу воздушному потоку. На расстоянии около 10 м от счетчика на высоте 2 м были установлены акустические метеостанции Метео-2М (производство ИОА СО РАН, г. Томск) и Metek, с помощью которых регистрировались три компоненты скорости ветра и температура воздуха с временным разрешением 0,1 с.

Таблица 1

Параметры счетчика частиц ОЭАС-05 и характеристики аридного аэрозоля

| № канала | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Диапазоны размеров, мкм | 0,5–0,7 | 0,7–1,0 | 1,0–1,5 | 1,5–2,0 | 2,0–3,0 | 3,0–5,0 |
| Средний диаметр, мкм | 0,6 | 0,85 | 1,25 | 1,75 | 2,5 | 4,0 |
| Фоновое распределение, см ⁻³ ·мкм ⁻¹ | 2,5 | 0,73 | 0,25 | 0,12 | 0,05 | 0,02 |
| Распределение генерируемой компоненты аэрозоля, см ⁻³ ·мкм ⁻¹ | 0,86 | 0,73 | 0,26 | 0,20 | 0,07 | 0,02 |
| Коэффициент корреляции ρ_i^* | 0,912 | 0,964 | 0,958 | 0,948 | 0,907 | 0,881 |

* Алексей Владимирович Карпов (karpov@ifaran.ru).

Обсуждение результатов

Флуктуации дифференциальных счетных концентраций аэрозоля

Измерения микроструктуры и дифференциальных счетных концентраций аридного аэрозоля проводились в августе 2007 г. на песчаной пустынной территории (Астраханская обл.). Для проведения измерений была выбрана песчаная площадка ограниченных размеров (примерно 100×150 м) с целью более надежного разделения вкладов компонент аэрозоля: фоновой и генерируемой на подстилающей поверхности под воздействием ветропесчаного потока. На рис. 1 приведены результаты измерений на пустынной территории турбулентных пульсаций (временное осреднение 1 с) модуля скорости ветра (кривая 1) и флуктуаций суммарной концентрации частиц аридного аэрозоля N размерами больше 0,5 мкм (2) 14 августа 2007 г.

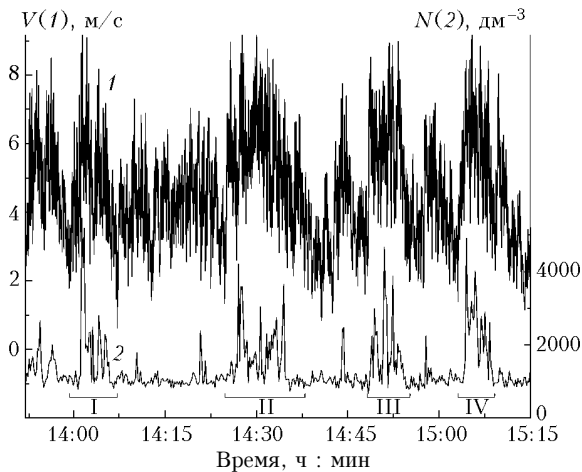


Рис. 1. Флуктуации модуля горизонтальной скорости ветра (1) и счетной концентрации частиц аэрозоля размерами больше 0,5 мкм (2) по данным измерений 14.08.07 в заказнике «Пески Берли» Астраханской обл. (I, II, III и IV — выделенные порывы ветра и всплески аэрозоля)

Согласно данным наших измерений представленные результаты являются типичными для пустынных территорий Калмыкии и Астраханской обл. при средней скорости ветра меньше 7–8 м/с. Средняя скорость ветра на высоте 2 м в рассматриваемый период времени была равна 4,6 м/с.

В соответствии с предложенной в [1] классификацией в рассматриваемый период времени имел место всплесковый режим флуктуаций микроструктуры аэрозоля, что было обусловлено всплесковым режимом генерации аэрозоля на подстилающей поверхности под воздействием ветропесчаного потока [4, 6, 10–12].

Рис. 1 иллюстрирует типичную ситуацию при ветровом выносе [2, 6] субмикронного и грубодисперсного аэрозоля с пустынных территорий. Нетрудно видеть, что всплески аэрозоля наблюдаются при порывах ветра. На рис. 1 выделены (I, II, III и IV) наиболее сильные порывы ветра и соот-

ветствующие им всплески счетной концентрации аэрозоля. Между всплесками счетная концентрация частиц аэрозоля остается практически постоянной. В условиях нашего эксперимента она определяется фоновой компонентой аэрозоля. Были рассчитаны статистические характеристики [13] вариаций концентрации частиц N . Для представленного на рис. 1 случая средняя концентрация частиц \bar{N} оказалась равной 1350 дм^{-3} , а стандартное отклонение $\sigma = 700 \text{ дм}^{-3}$. Эмпирическая функция распределения (ЭФР) N (рис. 2) имеет заметную асимметрию

$$A = n^{-1} \sigma^{-3} \sum_k (N_k - \bar{N})^3 = 2,75$$

и сравнительно большой эксцесс [13, 14]:

$$E = -3 + n^{-1} \sigma^{-4} \sum_k (N_k - \bar{N})^4 = 9,06.$$

ЭФР для N (рис. 2) в первом приближении может быть аппроксимирована суммой двух логнормальных распределений [13]:

$$p(\lg N) = 96 \exp\{-200(\lg N - 3)^2\} + 19 \exp\{-13,2(\lg N - 3,2)^2\},$$

где p — аппроксимирующее распределение вероятностей.

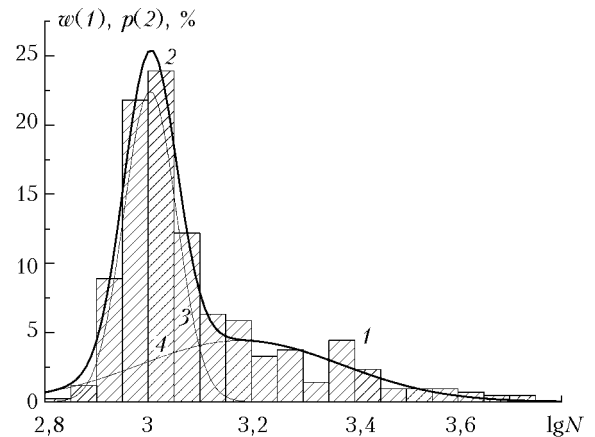


Рис. 2. Эмпирическая функция распределения $w(t)$, первая (3), вторая (4) моды и суммарное (2) аппроксимирующее распределение для логарифма счетной концентрации частиц размерами больше 0,5 мкм по данным измерений 14.08.07 в заказнике «Пески Берли» Астраханской обл.

Анализ данных измерений флуктуаций микроструктуры аэрозоля показал, что дифференциальные счетные концентрации частиц N_i ($i = 1 \div 6$) субмикронного и грубодисперсного аэрозоля в диапазоне размеров частиц от 0,5 до 5,0 мкм флуктуируют синхронно, что согласуется с полученными ранее результатами для диапазона размеров частиц 0,3–1,6 мкм [1]. В качестве примера на рис. 3 показаны результаты измерений дифференциальных счетных концентраций частиц для диапазонов размеров частиц 0,5–0,7 (кривая 1) и 1,0–1,5 мкм (2).

Была рассчитана матрица коэффициентов корреляции ρ_{1k} (табл. 2) между вариациями счетных

концентраций частиц в различных диапазонах размеров. В частности, коэффициенты корреляции ρ_{1k} между концентрацией частиц в первом канале и концентрациями частиц в остальных каналах варьируют в пределах 0,747–0,835 (см. табл. 2).

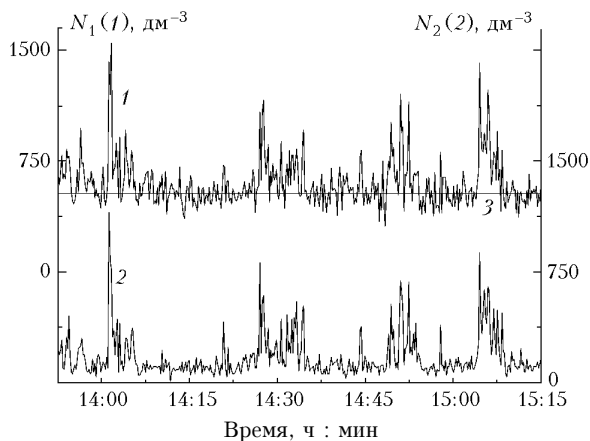


Рис. 3. Флуктуации счетных концентраций частиц аэрозоля размерами 0,5–0,7 мкм (1) и 1,0–1,5 мкм (2) по данным измерений 14.08.07 в заказнике «Пески Берли» Астраханской обл. (3 – концентрация фонового аэрозоля)

Таблица 2

Коэффициенты корреляции между дифференциальными счетными концентрациями частиц аэрозоля

| Диапазоны размеров, мкм | 0,7–1,0 | 1,0–1,5 | 1,5–2,0 | 2,0–3,0 | 3,0–5,0 |
|-------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 0,5–0,7 | 0,835 | 0,826 | 0,821 | 0,776 | 0,747 |
| 0,7–1,0 | 1 | 0,912 | 0,899 | 0,851 | 0,823 |
| 1,0–1,5 | | 1 | 0,906 | 0,858 | 0,843 |
| 1,5–2,0 | | | 1 | 0,859 | 0,844 |
| 2,0–3,0 | | | | 1 | 0,818 |

Коэффициенты корреляции ρ_i^* дифференциальных счетных концентраций N_i с суммарной концентрацией N (размер частиц больше 0,5 мкм) еще больше: 0,881–0,964 (см. табл. 1). Наблюдаемые коэффициенты корреляции ρ_{1k} и ρ_i^* могут быть и больше, если использовать счетчики частиц аэрозоля с величиной счетного объема, оптимизируемой по параметрам статистической обеспеченности измерений счетных концентраций аэрозоля.

Высокая корреляция между флуктуациями концентраций частиц разных размеров свидетельствует о синхронности генерации [1] субмикронных и грубодисперсных частиц в ветропесчаном потоке. По нашим данным, синхронно с субмикронным аэрозолем генерируются частицы грубодисперсного аэрозоля размерами вплоть до 5 мкм.

Функции распределения для фонового аэрозоля и аэрозоля, генерируемого на подстилающей поверхности

При измерениях флуктуаций микроструктуры аэрозоля на ограниченных по размеру опустыненных (песчаных) территориях концентрации частиц

субмикронного и грубодисперсного аэрозоля между всплесками определяются почти исключительно фоновой составляющей аэрозоля, параметры которой в рассматриваемом нами случае варьировали в узких пределах (см. рис. 1 и 3). Поэтому дифференциальные счетные концентрации фонового аэрозоля N_i^Φ в рассматриваемый период времени можно считать постоянными. В частности, прямая 3 на рис. 3 определяет фоновый уровень концентрации частиц аэрозоля размерами 0,5–0,7 мкм. Таким образом, дифференциальные счетные концентрации частиц аэрозоля, генерируемого на подстилающей поверхности, можно получить из соотношения

$$N_i^T(t) = N_i(t) - N_i^\Phi, \quad (1)$$

где t – время.

Полученная нами функция распределения частиц по размерам $g_\Phi(D)$ показана на рис. 4 (кривая 1).

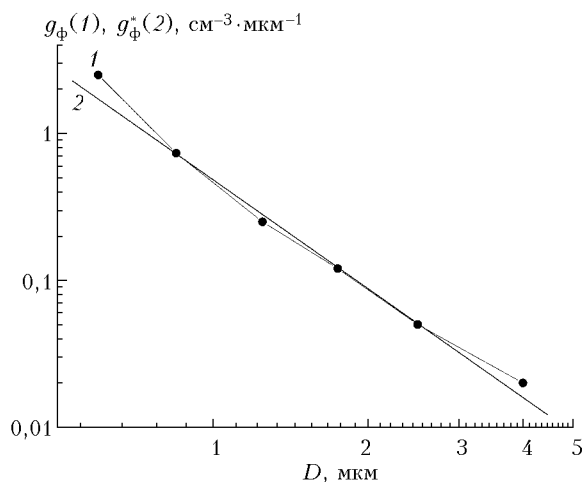


Рис. 4. Функция распределения частиц по размерам фоновой компоненты аридного аэрозоля в диапазоне размеров 0,5–5,0 мкм (1) по данным измерений 14.08.07 в Харабалинском р-не Астраханской обл. (заказник «Пески Берли») и аппроксимирующее степенное распределение (2) с показателем $-2,5$

Она с удовлетворительной точностью аппроксимируется степенной функцией

$$g_\Phi^*(D) = C_\Phi (D/D_0)^{\nu_\Phi}, \quad (2)$$

где C_Φ – константа и $D_0 = 1$ мкм. Показатель степени ν_Φ в нашем случае равен $-2,50$. Аппроксимирующая функция $g_\Phi^*(D)$ (2) для фоновой компоненты аэрозоля занижает по сравнению с наблюдаемым распределением (см. рис. 4) концентрацию частиц в диапазоне размеров 0,5–0,7 мкм, и, по-видимому, она не может быть экстраполирована в субмикронный диапазон размеров частиц меньше 0,5 мкм. Значения $g_\Phi(D)$ для шести интервалов размеров приведены в табл. 1.

Функции распределения частиц по размерам для компоненты аэрозоля $g_i(D)$, генерируемой на подстилающей поверхности, определялись раздель-

но для отмеченных на рис. 1 (I, II, III и IV) четырех всплесков. Осредненная по указанным всплескам функция распределения представлена на рис. 5 (кривая 1), а в табл. 1 приведены значения этой функции в указанных выше диапазонах размеров частиц. Следует иметь в виду, что суммарная длительность всплесков достигает 40–45% от полной длительности анализируемой реализации. Указанное распределение с удовлетворительной точностью аппроксимируется степенной функцией (кривая 3 на рис. 5):

$$g_r^*(D) = C_r \left(\frac{D}{D_0} \right)^{v_r}, \quad (3)$$

где $v_r = -2,25$.

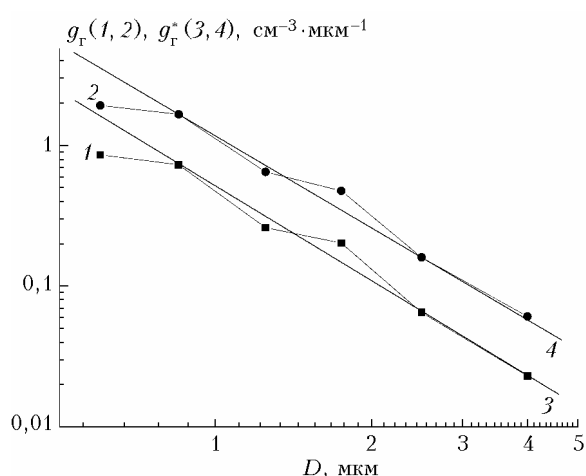


Рис. 5. Функция распределения частиц по размерам компоненты аридного аэрозоля, генерируемой на подстилающей поверхности, в диапазоне размеров 0,5–5,0 мкм (по данным измерений 14.08.07 в Харабалинском р-не Астраханской обл.): среднее по четырем всплескам (1) и среднее по четырем максимальным выбросам (2). Аппроксимирующие степенные спектры с показателями $-2,25$ (3) и $-2,17$ (4)

В каждом из четырех всплесков были выделены интервалы времени длительностью 2–3 мин с максимальными концентрациями частиц аэрозоля («выбросы»). Среднее по этим выбросам распределение частиц по размерам $g_r(D)$ представлено кривой 2 (см. рис. 5). Видно, что форма распределения качественно подобна распределению 1. Однако показатель степени аппроксимирующей степенной функции $g_r^*(D)$ (кривая 4 на рис. 5) равен $-2,17$, что больше соответствующего показателя степени для предыдущей функции (кривая 3 на рис. 5).

Существующих данных пока недостаточно для выяснения зависимости функции $g_r(D)$ от скорости ветра [15–24]. Поэтому для оценок параметров микроструктуры аэрозоля, генерируемого на подстилающей поверхности, будем использовать данные, полученные для «широких» всплесков (см. табл. 1 и кривую 1 на рис. 5). Конечно, предложенная нами степенная аппроксимация $g_r^*(D)$ за-

метно искажает распределение $g_r(D)$ в субмикронном диапазоне размеров частиц. При необходимости наблюдаемая функция распределения $g_r(D)$ может быть аппроксимирована суммой двух или трех логнормальных распределений, что позволит воспроизвести наблюдаемые экстремумы $g_r(D)$. Из вышеизложенного следует, что самое существенное различие между $g_r(D)$ и $g_\phi(D)$ заключается в особенностях их временной изменчивости.

Влияние ветра на генерацию аэрозоля

Из рис. 1 видно, что всплески концентрации аэрозоля наблюдаются при порывах ветра. Следует отметить, что концентрация и вертикальные потоки минерального аэрозоля на опустыненных территориях сопоставляются со средним значением скорости ветра или с динамической скоростью [18], которая характеризует режим турбулентности за достаточно большой промежуток времени, с характеристиками процесса сальтации песчинок [11, 12, 15]. Для понимания механизмов генерации аэрозоля на подстилающей поверхности необходимо сопоставлять флуктуации параметров аэрозоля с турбулентными пульсациями компонент скорости ветра и температуры воздуха [4–6, 10, 16, 17]. В частности, по данным синхронных измерений флуктуаций микроструктуры аэрозоля и турбулентных пульсаций скорости ветра нетрудно оценить пороговую скорость генерации аэрозоля на подстилающей поверхности. Согласно рис. 1 она составила около 5 м/с в период проведения измерений в заказнике «Пески Берли».

Приведенные в статье результаты измерений микроструктуры аэрозоля получены в конвективных условиях. Это, в частности, следует из рис. 6, на котором показан спектр плотности мощности флуктуаций модуля скорости ветра (1), рассчитанный по данным измерений 14.08.07.

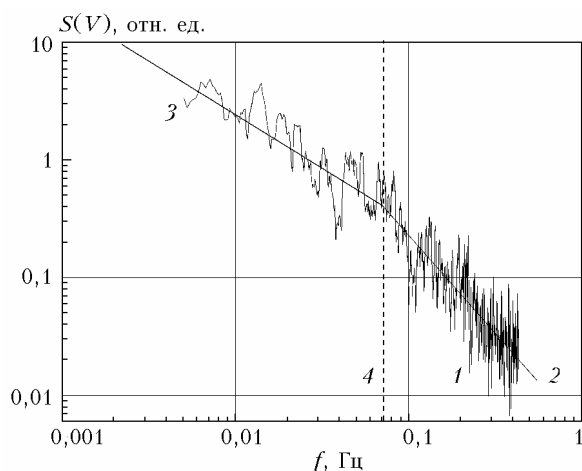


Рис. 6. Спектральная плотность мощности пульсаций модуля скорости ветра (1) по данным измерений 14.08.07 в заказнике «Пески Берли» Астраханской обл.: 4 – граница режимов турбулентности; 2 и 3 – аппроксимирующие степенные спектры

Наблюдаемый спектр $S(V)$ с удовлетворительной точностью аппроксимируется кусочно-степенной функцией, составляющие которой совмещены на частоте около $f_0 \approx 0,07$ Гц (4 на рис. 6). В области частот $f > f_0$ показатель степени аппроксимирующей функции (2 на рис. 6) равен примерно $-\frac{5}{3}$, что имеет место для локально изотропной турбулентности [18]. На низких частотах ($f < f_0$) показатель степени аппроксимирующей функции составляет около $-0,9$ (прямая 3), что характерно для конвективных условий. В низкочастотной области на рис. 6 достаточно отчетливо выделяются некоторые максимумы или конвективные моды [19], что обычно ассоциируется с квазипериодическими (когерентными) вихревыми структурами [5, 20–22] или ячейковой конвекцией [10, 17, 23].

Заклучение

1. На опустыненной территории в Харабалинском районе Астраханской области выполнены измерения флуктуаций микроструктуры субмикронного и грубодисперсного аэрозоля и турбулентных пульсаций компонент скорости ветра.

2. Выявлена синхронность вариаций дифференциальных счетных концентраций частиц аридного аэрозоля в диапазоне размеров 0,5–5,0 мкм.

3. Для всплескового режима генерации аэрозоля на подстилающей поверхности восстановлены функции распределения частиц по размерам для фонового аэрозоля и аэрозоля, генерируемого на подстилающей поверхности под воздействием ветропесчаного потока.

4. Показано, что всплески дифференциальных счетных концентраций аэрозоля обусловлены порывами ветра. По данным измерений в заказнике «Пески Берли» пороговая скорость генерации аэрозоля равна примерно 5 м/с.

5. Показано, что во время измерений флуктуаций микроструктуры аридного аэрозоля в диапазоне частот менее 0,07 Гц турбулентные пульсации модуля скорости ветра определялись конвективными движениями.

Автор благодарит Г.И. Горчакова за внимание к работе, а также Г.А. Курбатова за помощь в проведении измерений.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 07-05-01080-а, 07-05-10080-к и 07-05-13610-офи_ц) и Отделения наук о Земле РАН (программа «Геофизика межгеосферных взаимодействий»).

1. Горчаков Г.И., Шукуров К.А. Флуктуации концентрации субмикронного аэрозоля в конвективных условиях // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2003. Т. 39. № 1. С. 85–97.
2. Горчаков Г.И., Копров Б.М., Шукуров К.А. Исследование выноса субмикронного аэрозоля с подстилающей поверхности // Оптика атмосфер. и океана. 2000. Т. 13. № 2. С. 166–170.

3. Gorchakov G.I., Shukurov K.A. Submicron aerosol concentration fluctuations // Междунар. аэрозольная конф. (Москва, 26–30 июня 2000 г.): Сб. трудов. М.: НИФХИ, 2000. С. 249–255.
4. Gorchakov G.I., Koprov B.M., Shukurov K.A. Vertical Turbulent Aerosol Fluxes over Desertized Areas // Izvestia, Atmospheric and Oceanic Physics. 2002. V. 38. Suppl. 1. P. S138–S147.
5. Горчаков Г.И., Копров Б.М., Шукуров К.А. Вихревой вынос аридного субмикронного аэрозоля // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2003. Т. 39. № 5. С. 596–608.
6. Горчаков Г.И., Копров Б.М., Шукуров К.А. Влияние ветра на вынос аэрозоля с подстилающей поверхности // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2004. Т. 40. № 6. С. 774–790.
7. Карпов А.В. Флуктуации дифференциальных счетных концентраций грубодисперсного аэрозоля на опустыненной территории // Аэрозоли Сибири. XIV: Тезисы докл. Томск: ИОА СО РАН, 2007. С. 25–26.
8. Горчаков Г.И., Пхалагов Ю.А. Оптические, микрофизические и электрические характеристики аридного аэрозоля // Аэрозоли Сибири. XIV. Тезисы докл. Томск: ИОА СО РАН, 2007. С. 25.
9. Горчаков Г.И., Карпов А.В., Курбатов Г.А., Юшков В.П. Режимы турбулентности на опустыненной территории // Аэрозоли Сибири. XIV. Тезисы докл. Томск: ИОА СО РАН, 2007. С. 24.
10. Gorchakov G.I., Koprov B.M., Shukurov K.A. Relations between aerosol concentration fluctuations and turbulent pulsations // Междунар. аэрозольная конф. (Москва, 26–30 июня 2000 г.): Сб. трудов. М.: НИФХИ, 2000. С. 237–248.
11. Bagnold R.A. The Physics of Blown Sand and Desert Dunes. New York: Morrow, 1941. 265 p.
12. Бютнер Э.К. Динамика приповерхностного слоя воздуха. Л.: Гидрометеониздат, 1978. 158 с.
13. Смирнов Н.В., Душин-Барковский И.В. Краткий курс математической статистики для технических приложений. М.: Физматгиз, 1959. 436 с.
14. Ламли Д.Л., Пановский Г.А. Структура атмосферной турбулентности. М.: Мир, 1966. 264 с.
15. Tegen I., Fung I. Modeling of Mineral Dust in the Atmosphere: Sources, Transport and Optical Thickness // J. Geophys. Res. D. 1994. V. 99. N 11. P. 22897–22914.
16. Горчаков Г.И. Оптика, микрофизика и кинетика тропосферного аэрозоля // Оптика атмосфер. и океана. 2000. Т. 13. № 1. С. 106–118.
17. Горчаков Г.И., Емиленко А.С., Конейкин В.М., Шишков П.О., Сидоров В.Н., Захарова П.В., Шукуров К.А. Аэрозоль в конвективном пограничном слое атмосферы // Естественные и антропогенные аэрозоли: Сб. трудов. СПб.: СПбГУ, 1998. С. 408–413.
18. Обухов А.М. Турбулентность и динамика атмосферы. Л.: Гидрометеониздат, 1988. 414 с.
19. Иванов В.Н. Особенности условий возникновения структуры конвективных ячеек в пограничном слое атмосферы // Вопросы физики атмосферы. СПб.: Гидрометеониздат, 1998. С. 467–487.
20. Михайлова Л.А., Орданович А.Е. Когерентные структуры в пограничном слое атмосферы // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. 1991. Т. 27. № 6. С. 593–612.
21. Копров Б.М., Копров В.М., Макарова Т.И. Конвективные структуры приземного слоя воздуха // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2000. Т. 36. № 1. С. 44–54.

22. Горчаков Г.И., Шукуров К.А. Вертикальный перенос аэрозоля в конвективных условиях // Физика атмосферы: электрические процессы, радиофизические методы исследований: Сб. трудов. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2004. С. 43–47.
23. Горчаков Г.И., Шишков П.О., Копейкин В.М., Емиленко А.С., Исаков А.А., Шукуров К.А. Лидарно-нефелометрическое зондирование аридного аэрозоля // Оптика атмосф. и океана. 1998. Т. 11. № 10. С. 1118–1123.
24. Горчаков Г.И., Иелев Л.С. Экспериментальные наблюдения пыления барханов в Калмыкии летом 1997 г. // Естественные и антропогенные аэрозоли. СПб.: СПб.ГУ, 1998. С. 401–407.

A.V. Karlov. Microstructure fluctuations of the coarse and submicron aerosol over desertized area.

Size distribution function of the aerosol, generated on sand surface by sandblasting, was retrieved from measurement data of the arid aerosol microstructure over desertized area. Threshold velocity of the wind for the uplift of submicron and coarse aerosol from the underlying surface has been determined.