

Г.И. Горчаков, Б.М. Копров, К.А. Шукуров

## Исследование выноса субмикронного аэрозоля с подстилающей поверхности

*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, г. Москва*

Поступила в редакцию 24.11. 1999 г.

Проанализированы результаты синхронных измерений флуктуаций метеорологических параметров и счетной концентрации частиц субмикронного аэрозоля в Приаралье. Показано, что вынос аэрозоля с подстилающей поверхности в форме всплесков связан или с порывами ветра, или с периодами повышения температуры воздуха в приземном слое атмосферы. Проанализированы спектры мощности флуктуаций концентрации аэрозоля, температуры воздуха и продольной компоненты скорости ветра.

### Введение

Процесс опустынивания является одним из основных факторов глобального изменения окружающей среды. В опустынивании аридных и полуаридных территорий существенную роль играют вынос частиц аэрозоля с подстилающей поверхности и последующий атмосферный перенос аэрозоля. Наряду с пыльными бурями на опустыненных территориях вынос аэрозоля, в том числе субмикронного, происходит регулярно при разогреве поверхности коротковолновой радиацией. Сложный механизм этого явления до сих пор изучен явно недостаточно.

Исследования процессов выноса аэрозоля и пылесо-лепереноса ведутся в Институте физики атмосферы уже много лет. Благодаря поддержке МНТЦ, РФФИ и других фондов в последние годы эти работы стали быстро развиваться. В 1995–1997 гг. были выполнены совместно с НИФХИ им. Л.Я. Карпова, Институтом экспериментальной метеорологии и другими организациями комплексные наземные и самолетные исследования, которые позволили осенью 1997 г. выявить некоторые важные особенности процесса термоконвективного выноса аэрозоля с опустыненной территории в Калмыкии в пограничный слой атмосферы. Эти работы были продолжены на опустыненной территории вблизи оз. Арал в рамках совместной российско-казахской экспедиции. Целью настоящей статьи является анализ некоторых результатов синхронных измерений вариаций концентрации частиц аэрозоля и характеристик турбулентности в приземном слое атмосферы в Приаралье в сентябре 1998 г.

### 1. Флуктуации концентрации аэрозоля

Опыт исследования закономерностей внутрисуточной трансформации атмосферного аэрозоля показал, что для понимания основных особенностей большинства процессов трансформации аэрозоля необходимо иметь данные о короткопериодных вариациях его оптических и микрофизических параметров. С целью изучения статистических характеристик короткопериодных вариаций коэффициента рассеяния нами были созданы быстродействующий проточный нефелометр с постоянной времени регистрации

сигналов 0,1 – 1 с, который использовался, в частности, при самолетном зондировании аридного аэрозоля в пограничном слое атмосферы над Калмыкией в 1996–1997 гг. [2, 4], и быстродействующий компьютеризированный счетчик частиц аэрозоля с программно регулируемым временем регистрации функции распределения частиц по размерам в пределах от 1 с до нескольких минут. Созданный на основе серийного фотоэлектрического счетчика АЗ-6 быстродействующий счетчик позволяет регистрировать распределение частиц по размерам в диапазоне изменения диаметров от 0,3 до примерно 2 мкм. Реально доступный для измерения диапазон размеров зависит от концентрации частиц, формы функции распределения и времени регистрации, поскольку при минимальных длительностях измерений число зарегистрированных счетчиком частиц часто оказывается ниже порога, определяемого допустимой погрешностью счета.

Испытания счетчика частиц в полевых условиях показали, что во многих случаях функция распределения в субмикронном диапазоне размеров может быть достаточно надежно измерена за время порядка 1 мин. В то же время счетная концентрация частиц размером около 0,3 мкм может быть определена за время порядка 1 с. Исследования временной изменчивости функции распределения частиц по размерам в приводном слое атмосферы летом 1998 г. на Каспийском море с борта малотоннажного научно-исследовательского судна с временным разрешением 1 мин [5] позволили выявить различные режимы флуктуаций микроструктуры аэрозоля. В частности, нами наблюдались почти периодические изменения концентрации аэрозоля в юго-восточном секторе Каспийского моря [5].

Измерения короткопериодных вариаций характеристик аэрозоля особенно необходимы при исследовании процесса выноса аэрозоля с подстилающей поверхности и его последующего переноса в турбулентной атмосфере. Несмотря на определенные преимущества нефелометрических измерений (высокая точность и чувствительность), они имеют серьезный недостаток, связанный с большой неопределенностью оценки эффективного размера частиц аэрозоля. Поэтому при исследовании выноса аэрозоля предпочтением было отдано быстродействующему счетчику частиц.

Измерения функции распределения частиц по размерам в аральской экспедиции в сентябре 1998 г. выполня-

лись с временным разрешением 1 с. Здесь будут обсуждаться только результаты измерений интегральной или суммарной концентрации частиц в субмикронном диапазоне размеров, которая близка к дифференциальной счетной концентрации частиц для диапазона от 0,3 до 0,5 мкм. Пробоотбор аэрозоля осуществлялся через короткий воздухозаборник с высоты около 2 м. Наблюдения проводились на равнинной местности с длинными (порядка 10 м) пологими песчаными барханами высотой примерно 1 м.

Анализ данных измерений флуктуаций счетной концентрации в Приаралье [6, 7] позволил обнаружить существенные различия режимов выноса субмикронного аэрозоля с подстилающей поверхности. Наряду с режимом квазинепрерывной генерации при скоростях ветра на высоте 2 м больше 8–10 м/с, при меньших значениях средней скорости ветра вынос субмикронного аэрозоля с подстилающей поверхности осуществляется в форме отдельных выбросов или всплесков длительностью порядка 100 с или в форме последовательностей таких всплесков.

На рис. 1 в качестве примера показана измеренная нами 22.09.98 в течение 1500 с зависимость концентрации частиц  $N$  от времени (кривая 1). В этот отрезок времени зарегистрировано четыре аэрозольных всплеска с длительностями примерно от 50 до 100 с. Как правило, аэрозольные всплески имеют крутые передние и задние фронты, что свидетельствует о нелинейности механизма генерации частиц.

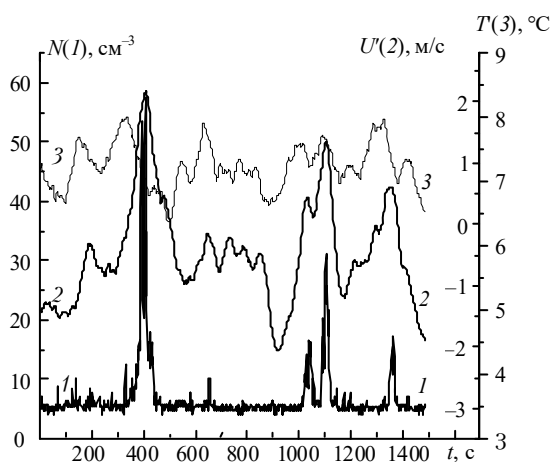
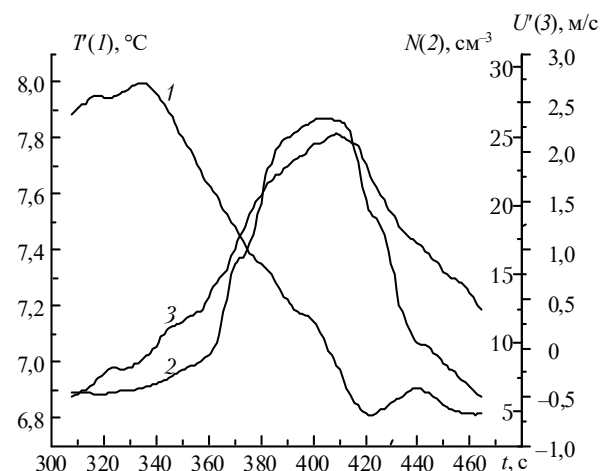


Рис. 1. Пример результатов синхронных измерений в Приаралье 22.09.98 счетной концентрации частиц  $N$  (кривая 1), флуктуаций продольной компоненты скорости ветра  $U'$  (кривая 2) и флуктуаций температуры  $T'$  (кривая 3)

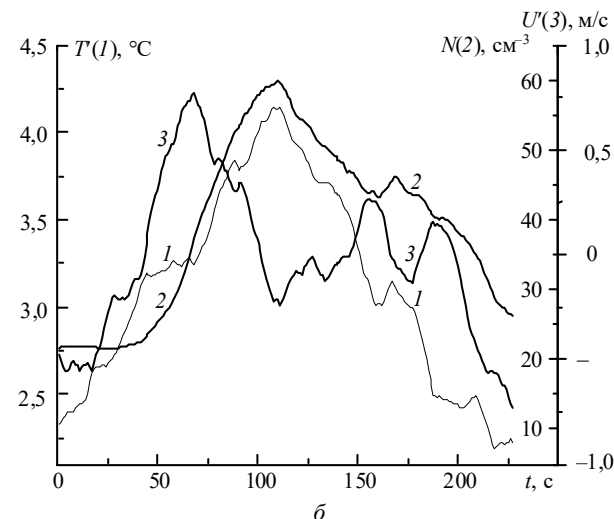
Концентрация частиц аэрозоля и метеоэлементы в зоне выноса подвержены, как правило, сильным флуктуациям в широком диапазоне изменения временных масштабов. Поэтому при анализе процесса выноса аэрозоля целесообразно отдельно рассмотреть «низкочастотные» и «высокочастотные» вариации наблюдаемых параметров. Для выделения низкочастотной составляющей отдельных событий, содержащих аэрозольные всплески, нами было выполнено 50-секундное осреднение данных измерений концентрации аэрозоля и метеоэлементов. Пример сглаженного всплеска показан на рис. 2.

Отметим, что показанные на рис. 2 флуктуации температуры воздуха и продольной компоненты скорости ветра представляют собой отклонения от их средних значений на интервалах, длительность которых заметно пре-

вышает временные интервалы, представленные на рис. 2. Поэтому, в частности, приведенные на температурных шкалах значения  $T'$  оказались только положительными.



a



б

Рис. 2. Пример сглаженной (50-секундное скользящее среднее) временной зависимости счетной концентрации частиц  $N$  (кривая 2), сглаженных флуктуаций температуры воздуха  $T'$  (кривая 1) и продольной компоненты скорости ветра  $U'$  (кривая 3): а – в период аэрозольного всплеска 20.09.98; б – 22.09.98

Важной характеристикой аэрозольного всплеска является режим флуктуаций концентрации частиц  $N$ . Нами были проанализированы короткопериодные или «высокочастотные» (от 1 до примерно 100 с) вариации концентрации как вне, так и в периоды аэрозольных всплесков. Оказалось, что во время всплеска уровень флуктуаций счетной концентрации увеличивается примерно на порядок (десятичный) и более. На рис. 3 представлены аппроксимированные спектры мощности флуктуаций  $S_N$  счетной концентрации частиц во время одного из наблюдавшихся нами 22.09.98 аэрозольных всплесков (прямая 1), который изображен на рис. 2, б и непосредственно перед этим всплеском (прямая 4). Коэффициент пропорциональности (наклон прямой) между  $\lg(S_N)$  и  $\lg(f)$  ( $f$  – частота) составляет в период всплеска – 1,24 и – 0,98 до всплеска.

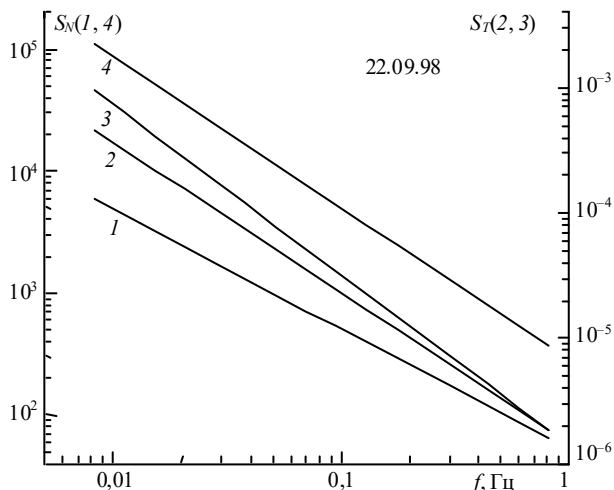


Рис. 3. Аппроксимированные спектры мощности флуктуаций счетной концентрации частиц  $S_N$  (прямые 1 и 4) и флуктуаций температуры воздуха  $S_T$  (прямые 2 и 3) в период аэрозольного всплеска (3 и 4) и перед всплеском (1 и 2)

Рассмотрение более тонких особенностей временной изменчивости счетной концентрации аэрозоля выходит за рамки данной статьи.

## 2. Флуктуации температуры и компонент скорости ветра

Вынос аэрозоля с подстилающей поверхности в форме всплесков наблюдается в конвективных условиях [4, 7]. Методом лидарно-нефелометрического самолетного зондирования пространственного распределения аэрозоля в пограничном слое атмосферы над Калмыкией [4] были выявлены горизонтальные неоднородности с масштабами от десятков метров до десятков километров. Эти неоднородности тесно связаны с формированием в пограничном слое атмосферы различных конвективных режимов [2, 4]. Измерения флуктуаций температуры воздуха и горизонтальной компоненты скорости ветра в Калмыкии (пески Маштак) продемонстрировали тот факт, что в приземном слое атмосферы отчетливо проявляются флуктуации метеопараметров с периодами порядка 1000 с, что обусловлено прохождением через пункт наблюдения восходящих и нисходящих конвективных ячеек с горизонтальными размерами около нескольких километров, и флуктуациями с более короткими периодами, порядка 100 с. Прямыми измерениями (с временным разрешением 1 с в конвективных условиях) были обнаружены значительные вариации вертикального градиента температуры [7] вплоть до смены знака градиента, что свидетельствует о сравнительно быстрых изменениях режима устойчивости приземного слоя атмосферы.

В аральской экспедиции 1998 г. измерения флуктуаций компонент скорости ветра проводились с помощью трехкомпонентного акустического анемометра с частотой около 30 Гц, а измерения флуктуаций температуры воздуха – с помощью малоинерционных термометров с той же частотой, что и измерения скорости ветра [8]. При интерполяции временной изменчивости метеопараметров будем раздельно рассматривать их «низкочастотные» (сглаженные) и «высокочастотные» вариации.

Примеры сглаженных (50 с) флуктуаций продольной компоненты скорости ветра  $U'$  (кривая 2) и температуры  $T'$  (кривая 3) по данным измерений 22.09.98 в Приаралье показаны на рис. 1. При средней скорости около 5 м/с амплитуда низкочастотных вариаций (с периодами около 100 – 300 с) достигает примерно  $\pm 2$  м/с. Амплитуда низкочастотных вариаций температуры воздуха (периоды около 100 – 200 с) равна примерно  $\pm (0,7 - 0,8)^\circ\text{C}$ . Обращает на себя внимание заметное отличие наблюдаемых низкочастотных вариаций температуры воздуха от низкочастотных вариаций продольной компоненты скорости ветра. Существенно также, что кроме достаточно длительных периодов усиления ветра наблюдаются и довольно длительные положительные аномалии температуры с амплитудой порядка  $1^\circ$  в приземном слое атмосферы. Эти положительные аномалии условно будем называть «термиками». Длительные («низкочастотные») аномалии температуры воздуха и продольной компоненты скорости ветра также хорошо видны на рис. 2.

Кратко остановимся на взаимосвязи «низкочастотных» и «высокочастотных» флуктуаций температуры воздуха и продольной компоненты скорости ветра. На рис. 3 приведены аппроксимированные спектры мощности флуктуации температуры воздуха  $T'$  (прямые 2 и 3) по данным измерений в Приаралье 22.09.98 в период аэрозольного всплеска (прямая 3), который показан на рис. 2,б, и до всплеска (прямая 2). Существенно то, что мощность флуктуаций температуры воздуха до и во время аэрозольного всплеска примерно одинакова.

Для аэрозольного всплеска 20.09.98 (см. рис. 2,а) нами был рассчитан спектр мощности флуктуаций продольной компоненты скорости ветра  $S_U$  (кривая 1 на рис. 4). Там же дана соответствующая аппроксимирующая прямая. Сопоставление показало, что уровень мощности флуктуаций продольной компоненты скорости ветра  $S_U$  до аэрозольного всплеска существенно ниже, чем во время всплеска. Вид спектра при этом немного изменился (наклон спектра  $-1,20$  до всплеска и  $-1,36$  во время всплеска).

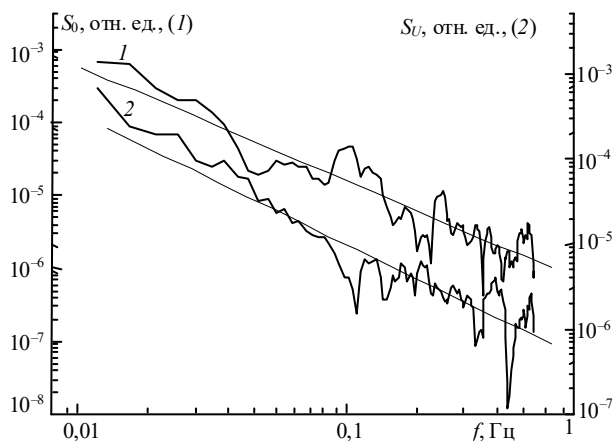


Рис. 4. Спектры мощности флуктуаций продольной компоненты скорости ветра  $S_U$  и соответствующие аппроксимирующие прямые в период аэрозольного всплеска 20.09.98 (1) и перед всплеском (2)

Результаты анализа других компонент скорости ветра в данной статье не рассматриваются.

### 3. Влияние флуктуаций скорости ветра и температуры воздуха на вынос аэрозоля

Анализ результатов синхронных нефелометрических измерений коэффициента рассеяния и градиентных измерений температуры воздуха и скорости ветра летом 1997 г. в Калмыкии позволил обнаружить связь между всплесками концентрации аэрозоля в приземном слое атмосферы и порывами ветра, т.е. периодами увеличения горизонтальной компоненты скорости ветра, причем длительность аэрозольных всплесков и порывов ветра составляла (по порядку величины) 100 с [2].

Синхронные измерения флуктуаций счетной концентрации аэрозоля и метеопараметров осенью 1998 г. в Приаралье подтвердили этот результат. На рис. 1 сопоставлены данные измерений счетной концентрации частиц аэрозоля  $N$  и сглаженных флуктуаций температуры воздуха  $T$  и продольной компоненты скорости ветра  $U'$ . Отчетливо видно, что аэрозольные всплески совпадают по времени с периодами усиления ветра. Заметим, что второй и третий всплески совпадают каждый со своим порывом ветра [7], а на рис. 1 эти два порыва перекрываются, поскольку 50-секундное усреднение для данного случая является чрезмерно большим. Низкочастотные флуктуации температуры на рис. 1 явно не согласуются с временным ходом концентрации частиц аэрозоля. Только перед четвертым всплеском можно выделить период (около 150 с) повышения температуры. Наиболее отчетливо согласованное изменение счетной концентрации частиц и продольной компоненты скорости ветра в период аэрозольных всплесков выявляется при сопоставлении сглаженных временных зависимостей концентрации частиц аэрозоля и сглаженных флуктуаций скорости ветра (см. рис. 2,а).

Однако последующий анализ данных показал, что всплески аэрозоля далеко не всегда совпадают с периодами усиления скорости ветра или с порывами.

Оказалось, что во многих случаях аэрозольные всплески ассоциируются с периодами повышения температуры воздуха, т.е. с протяженными (по горизонтали) зонами повышенной температуры воздуха («термиками»). Характерный пример такого события (АТ-событие) показан на рис. 2,б. Очевидно, что этот тип выноса аэрозоля коренным образом отличается от предыдущего (АУ-событие).

Выше было показано, что в порывах ветра уровень мощности флуктуаций продольной компоненты скорости ветра значительно возрастает. Эти флуктуации могут быть существенным фактором образования аэрозольного всплеска при воздействии порыва ветра на подстилающую поверхность [9].

Что касается флуктуаций температуры воздуха, то они, как это видно из рис. 3, практически одинаковы как в

период повышения температуры и появления аэрозольного всплеска, так и до всплеска. Обращает на себя внимание заметное отличие спектров мощности флуктуаций температуры воздуха и концентрации частиц субмикронного аэрозоля.

Сопоставление данных наших измерений с результатами измерений в условиях, когда вынос аэрозоля с подстилающей поверхности не ожидается [10], выявило некоторые различия в спектрах флуктуаций характеристик аэрозоля и скорости ветра, однако, на наш взгляд, опубликованных данных пока еще слишком мало для того, чтобы делать серьезные геофизические выводы.

#### Заключение

Показано, что вынос аэрозоля с подстилающей поверхности на опустыненных территориях в форме всплесков длительностью порядка 100 с может быть связан с порывами ветра, длительность которых близка к длительности всплесков. В других случаях всплески связаны с периодами повышения температуры воздуха в приземном слое атмосферы (с «термиками») в течение периодов времени, также близких к длительности соответствующих всплесков.

При порывах мощность флуктуаций скорости ветра существенно больше соответствующей мощности вне порывов, а мощность флуктуаций температуры в «термиках» остается примерно на том же уровне, что и вне «термиков».

Работа выполнена при поддержке гранта МНТЦ-035 и гранта РФФИ № 95-05-66170.

1. Голицын Г.С., Гранберг И.Г., Алоян А.Е. и др. // Естественные и антропогенные аэрозоли. СПб.: СПбГУ, 1998. С. 342–348.
2. Горчаков Г.И., Шишков П.О., Копейкин В.М., Шукуров К.А. и др. // Там же. С. 408–413.
3. Андропова А.В., Минашкин В.М., Иорданский М.А. и др. // Там же. С. 414–446.
4. Горчаков Г.И., Емиленко А.С., Исаков А.А., Шукуров К.А. и др. // Оптика атмосферы и океана. 1998. Т. 11. № 10. С. 1118–1123.
5. Шукуров К.А. // Физика атмосферного аэрозоля: Труды конф. М.: Диалог-МГУ, 1999. С. 512–516.
6. Шукуров К.А. // Физика атмосферного аэрозоля: Труды конф. М.: Диалог-МГУ, 1999. С. 319–320.
7. Горчаков Г.И., Копейкин В.М., Тихонов А.В., Шукуров К.А. и др. // Физика атмосферного аэрозоля: Труды конф. М.: Диалог-МГУ, 1999. С. 151–159.
8. Kopriv V.M., Zubkovsky S.L., Kopriv V.M. et. al. // Boundary-Layer Meteorol. 1998. V. 88. P. 399–423.
9. Горчаков Г.И., Шукуров К.А. // Естественные и антропогенные аэрозоли: Тезисы докл. СПб.: СПбГУ, 1999. С. 76.
10. Разенков И.А., Ростов А.П., Шефер Н.А. // Оптика атмосферы и океана. 1999. Т. 12. № 7. С. 578–588.

*G.I. Gorchakov, V.M. Kopriv, K.A. Shukurov. Investigation of submicron aerosol lifting from surface.*

Results of synchronic measurements of meteorological parameters fluctuations on the one hand and number concentration of submicron aerosol on the other hand, obtained at Aral region, are analyzed. It is shown, that aerosol lifting from surface in the form of «flash» is connected with wind squalls or with periods of air temperature growth in the ground atmospheric layer. Power spectra of fluctuation of the aerosol concentration, air temperature, and horizontal wind component have been analyzed.