

О флуктуациях коэффициента направленного светорассеяния приземного аэрозоля на опустыненной территории

А.С. Емиленко, А.А. Исаков*

*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
119000, Москва, Пыжевский пер., 3*

Поступила в редакцию 17.04.2008 г.

Проведен анализ флуктуаций коэффициента направленного светорассеяния минерального аэрозоля по данным измерений в июле 2007 г. в Калмыкии. Измерения проводились с помощью двух нефелометров, которые размещались либо в одном пункте на высотах 0,5 и 2 м, либо в двух разнесенных пунктах, удаленных друг от друга на расстоянии 30 м по направлению ветра. Частота опроса нефелометров 1 Гц. Основное внимание уделено оценке роли нелокальных эффектов в процессе генерации аэрозоля в ветропесчаном потоке при скоростях ветра 5–8 м/с. В приземном слое атмосферы вид спектра плотности мощности флуктуаций коэффициента рассеяния не меняется с изменением высоты. При измерениях с разнесенными нефелометрами выявлены нелокальные эффекты в вариациях коэффициента рассеяния.

Ключевые слова: аэрозоль, коэффициент направленного светорассеяния, нефелометр, опустыненная территория.

Введение

Значительная часть минерального аэрозоля поступает в атмосферу с опустыненных территорий, поэтому механизм генерации минерального аэрозоля на подстилающей поверхности под воздействием ветропесчаного потока, а также процессы его переноса в приземном пограничном слое атмосферы нуждаются в тщательном исследовании. Важные особенности процессов генерации и переноса аэрозоля в приземном слое атмосферы могут быть выявлены по данным измерений флуктуаций его оптических и микрофизических параметров.

В работах [1, 2] установлено, что в конвективных условиях при скорости ветра на высоте 2 м примерно от 4 до 7–8 м/с реализуется всплесковый режим флуктуаций параметров и, соответственно, генерации аэрозоля [3, 4], а при скорости ветра больше 7–8 м/с – квазинепрерывный режим. Показано, что скорость вертикального переноса аэрозоля в конвективном пограничном слое атмосферы может многократно возрастать при появлении вихрей и вихревых структур [2, 5]. Важное значение для дальнейших исследований имеет воспроизводимость формы распределения частиц по размерам [2, 6] для компоненты аэрозоля, генерируемой в ветропесчаном потоке, при средней скорости ветра меньше 9–10 м/с. Отсюда, в частности, следует, что вариации коэффициента рассеяния компоненты аэрозоля, генерируемой на подстилающей поверхности, по крайней мере в грубом приближении, должны повторять вариации массовой концентрации.

Оптические методы измерения параметров аэрозоля имеют ряд преимуществ перед другими методами, например быстрдействие, надежность, оперативность и относительная простота технической реализации. В полевых экспериментах, особенно в условиях пустыни при высоких температурах и отсутствии стационарных источников электричества, нефелометрические методы исследования являются неотъемлемой составляющей комплексного аэрозольного эксперимента. В данной статье представлен анализ флуктуаций коэффициента направленного светорассеяния минерального аэрозоля по данным измерений в июле 2007 г. в Калмыкии в связи с исследованием процессов генерации аэрозоля на опустыненной территории и его переноса в приземном слое атмосферы. Основное внимание уделено оценке роли нелокальных эффектов в флуктуациях коэффициента рассеяния для генерируемой на опустыненной территории компоненты аэрозоля.

Процесс генерации аэрозоля в ветропесчаном потоке является стохастическим, следовательно, количественные оценки эффектов по необходимости должны быть статистическими. Оценка режима флуктуаций параметров аэрозоля может быть получена методами спектрального анализа [7, 8]. По трансформации спектров плотности мощности флуктуаций можно судить и о роли нелокальных эффектов при генерации аэрозоля на подстилающей поверхности под воздействием ветропесчаного потока.

Методика измерений и аппаратура

С 21 по 31 июля 2007 г. на опустыненной территории в Калмыкии в 15 км от пос. Комсомольский в рамках комплексного эксперимента проводились

* Александр Сергеевич Емиленко; Андрей Александрович Исаков (A.A.Isakov@mail.ru).

нефелометрические измерения аридного аэрозоля [9]. Измерялся коэффициент направленного светорассеяния [10] D ($\text{км}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$) для длины волны света 520 нм и угла рассеяния 45° с помощью двух малогабаритных проточных нефелометров, созданных в ИФА РАН [11]. Высокая корреляция между коэффициентом рассеяния σ (км^{-1}) и коэффициентом направленного светорассеяния [12], в том числе для угла рассеяния 45° , позволяет получить достаточно надежную оценку σ (для длины волны 520 нм) по данным измерений D :

$$\sigma = kD, \quad (1)$$

где k – размерный коэффициент. Перед экспериментом сотрудниками ИФА РАН и ИОА СО РАН было выполнено сравнение градуировок малогабаритных нефелометров ИФА РАН с калибровочными характеристиками серийных нефелометров ФАН-А, используемых в ИФА РАН и в ИОА СО РАН.

При проведении измерений нефелометры размещались либо в одном пункте (рис. 1) на высоте $H_1 = 0,5$ м и на высоте $H_2 = 2$ м, либо в двух разнесенных пунктах, удаленных друг от друга на расстоянии $L = 30$ м, причем в первом пункте первый нефелометр по-прежнему размещался на высоте $H_1 = 0,5$ м, а второй нефелометр – во втором пункте на высоте $H_2 = 2$ м.

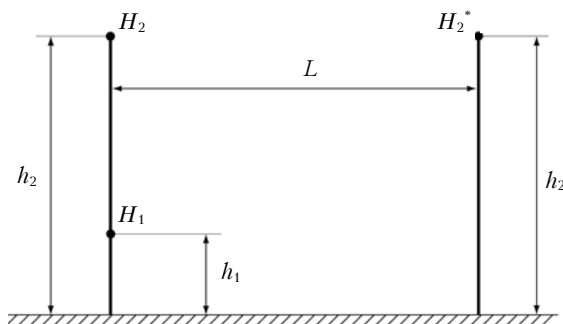


Рис. 1. Схема размещения воздухозаборников нефелометров

На указанных высотах располагались воздухозаборники нефелометров. От воздухозаборников наружный воздух поступал в нефелометры через круглые шланги с внутренним диаметром 2 см. Указанные шланги не имели резких изгибов, что обеспечивало при скорости прососа 1–2 м/с доставку частиц аэрозоля с размерами вплоть до 5 мкм без заметных потерь в рабочие камеры нефелометров. В этих условиях объем осреднения составлял примерно $0,3 \text{ дм}^3$, что гарантирует статистическую обеспеченность измерений коэффициента направленного светорассеяния при всплесковой генерации аэрозоля на опустыненной территории [1].

Постоянная времени (время осреднения) проточного нефелометра лимитируется аэродинамикой прососа воздуха и оценивается в 1–2 с.

Нефелометры были подключены к компьютеру типа Notebook через многоканальный аналого-цифровой преобразователь Е14-140. Частота опроса нефелометров была выбрана равной 1 Гц.

Обсуждение результатов

На первом этапе полевого эксперимента измерения коэффициента направленного светорассеяния выполнялись в одном пункте на двух уровнях на $H_1 = 0,5$ м и $H_2 = 2$ м. Пример результатов синхронных измерений коэффициента направленного светорассеяния на высоте 0,5 м (1) и 2 м (2) представлен на рис. 2.

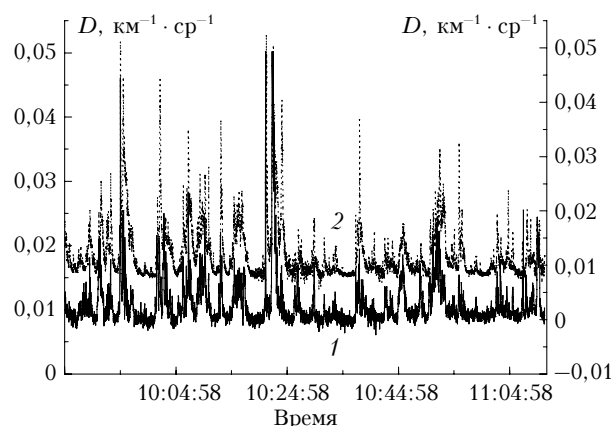


Рис. 2. Временная изменчивость коэффициента направленного светорассеяния (длина волны 520 нм, угол рассеяния 45°) 24.07.07

Среднее значение коэффициента направленного светорассеяния в первом пункте 24 июля в период времени с 9:45 по 11:10 равно $0,012 \text{ км}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$. Среднее значение коэффициента направленного светорассеяния на высоте 2 м примерно на 15% меньше его значения на высоте 0,5 м (таблица), а стандартное отклонение σ_D в этот период времени на высоте 0,5 м превышает примерно на 40% стандартное отклонение на высоте 2 м ($D_{\text{ф}}$ – уровень фона в паузах между всплесками D).

| Дата, время | Высота, м | D , $\text{км}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$ | σ_D , $\text{км}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$ | $D_{\text{ф}}$, $\text{км}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$ | V , м/с | φ , град | T , $^\circ\text{C}$ |
|----------------------|-----------|---|--|--|-----------|------------------|------------------------|
| 24.07 9:45–11:10 | 0,5 | 0,012 | 0,0051 | 0,0092 | 5,6 | 145 | 29,9 |
| | 2 | 0,011 | 0,0037 | | | | |
| 31.07 10:45–12:25 | 0,5 | 0,024 | 0,0364 | 0,015 | 5,9 | 113 | 34,2 |
| | 2 | 0,021 | 0,00285 | | | | |

В таблице приведены также значения средней скорости ветра, средней температуры и направления ветра. Флуктуации коэффициента направленного светорассеяния имеют вид всплесков длительностью от долей минуты и примерно до 3 мин, что качественно согласуется с результатами исследований всплесковых флуктуаций дифференциальных счетных концентраций аэрозоля в Приаралье [1],

возникающих в случае всплескового режима генерации аэрозоля на подстилающей поверхности под воздействием ветропесчаного потока [1, 2]. Важно подчеркнуть, что всплески, как правило, представляют собой последовательности выбросов (коротких импульсов) с длительностями порядка секунд [1]. В некоторые периоды времени всплески идут друг за другом с достаточно определенными частотами, которые по порядку величины близки к частотам вариаций метеоэлементов, обусловленных переносом конвективных структур [13]. Максимальные амплитуды выбросов D на высоте 0,5 м, как правило, заметно превышают соответствующие амплитуды на высоте 2 м.

Обращает на себя внимание синхронность всплесков коэффициента направленного светорассеяния на двух уровнях. Отметим, что синхронность выбросов выражена гораздо слабее, что снижает корреляцию между рассматриваемыми временными рядами. Максимальная корреляция между флуктуациями коэффициента направленного светорассеяния наблюдается при временной задержке $\tau = 2$ с, что обусловлено различной длиной заборных шлангов для измерений на двух высотах.

Спектральный анализ флуктуаций коэффициента направленного светорассеяния

Наряду со стандартным отклонением флуктуации коэффициента направленного светорассеяния можно также характеризовать спектром плотности мощности флуктуаций D [7, 8]. Для некоторых реализаций $D(t)$, где t – время, были рассчитаны спектры плотности мощности флуктуаций коэффициента рассеяния на двух указанных выше уровнях. Пример результатов расчета спектра $S(D)$ по данным измерений D 24.07.07 в период времени с 9:45 по 11:10 на высоте 0,5 м представлен на рис. 3 (кривая 1). Анализ показал, что приведенный на рис. 3 спектр удовлетворительно аппроксимируется степенной функцией

$$R_{0,5}(f) = \beta_{0,5} f^{-q_{0,5}} \quad (2)$$

с показателем $q_{0,5} = -5/3$ (кривая 3 на рис. 3). Нетрудно видеть, что спектр $S_2(D)$ флуктуаций D_2 (кривая 2 на рис. 3) отличается от соответствующего спектра $S_{0,5}(D)$ флуктуаций D на высоте 0,5 м практически только несколько меньшей мощностью (см. результаты расчетов стандартного отклонения в таблице).

В [1] было показано, что при всплесковой генерации аэрозоля спектры плотности мощности флуктуаций дифференциальных счетных концентраций частиц субмикронного и грубодисперсного аэрозоля (оценки точности приведены в [1]) аппроксимируются степенными функциями с показателями от 1,3 до 1,7.

Таким образом, летом 2007 г. на опустыненной территории в Калмыкии наблюдается всплесковый режим флуктуаций коэффициента направленного светорассеяния и, соответственно, всплесковый режим генерации аэрозоля под воздействием ветро-

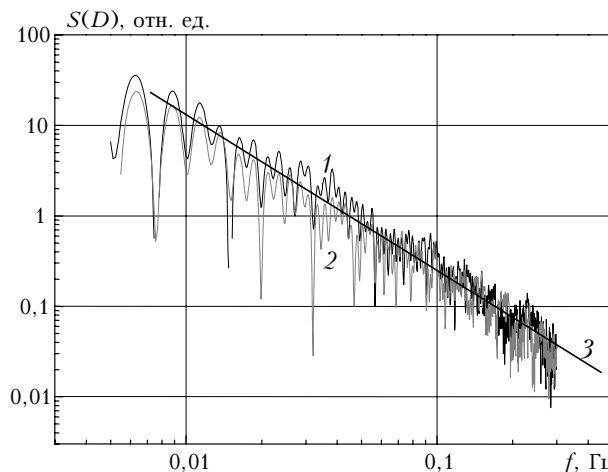


Рис. 3. Спектральные плотности мощности флуктуаций коэффициента направленного светорассеяния на высотах 0,5 м (1) и 2 м (2) по данным измерений 24.07.07 (длина реализации 5100 с, временное разрешение 1 с). Кривая 2 – аппроксимирующий степенной спектр мощности флуктуаций на $H = 0,5$ м с показателем $-5/3$, 3 – на $H = 2$ м с показателем $-5/3$

песчаного потока [1, 2]. Для постановки последующих экспериментов важно, что форма спектров $S(D)$ в приземном слое атмосферы (0,5–2 м) практически не зависит от высоты.

Расчеты показали, что средние уровни флуктуаций коэффициента направленного светорассеяния на двух высотах заметно различаются (см. таблицу). Это различие обусловлено не только процессом вертикального перемешивания в приземном слое атмосферы, но и пространственными неоднородностями генерации аэрозоля на подстилающей поверхности, задача контроля которых выходит далеко за рамки нашей статьи.

Влияние нелокальных эффектов на флуктуации параметров аэрозоля

Во время второго этапа эксперимента были выполнены синхронные измерения флуктуаций коэффициента направленного светорассеяния в двух пунктах, находящихся на расстоянии 30 м друг от друга. Второй пункт располагался на трассе переноса в восточном направлении ($\varphi = 90^\circ$) от первого пункта. Во время измерений оба пункта не всегда находились на одной «линии тока» в приземном слое атмосферы. В первом пункте воздухозаборник нефелометра располагался на высоте 0,5 м, а во втором – на высоте 2 км.

На рис. 4 приведен пример результатов синхронных измерений коэффициента направленного светорассеяния в двух разнесенных пунктах. Измерения проводились 31.07.07 (длина реализации 6000 с, частота выборки 1 с).

Нетрудно видеть, что результаты измерений в двух пунктах заметно отличаются. Характер основных различий лучше виден на короткой реализации (рис. 5), на которой приведен только один всплеск.

В пункте 1 флуктуации коэффициента направленного светорассеяния по данным измерений 31.07.07 (кривая 1, рис. 5) и 24.07.07 (кривая 2, рис. 2)

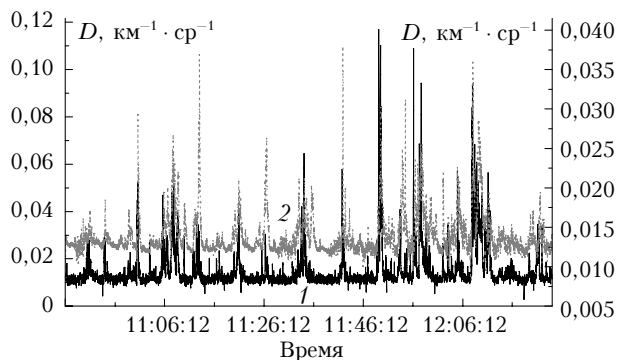


Рис. 4. Временная изменчивость коэффициента направленного светорассеяния ($\lambda = 520$ нм, угол рассеяния 45°) на $H = 0,5$ м в первом пункте (1, левая ось) и на $H = 2$ м во втором пункте (2, правая ось) по данным измерений 31.07.07

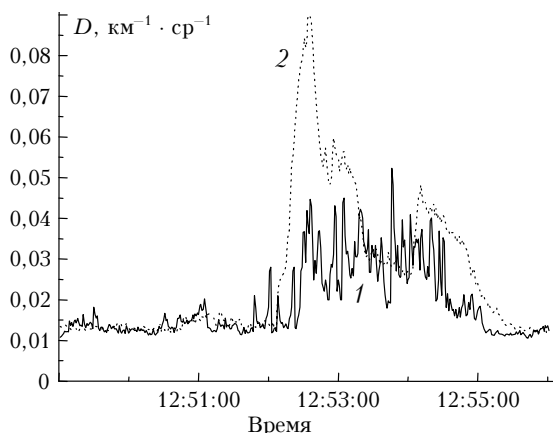


Рис. 5. Всплеск коэффициента направленного светорассеяния по данным синхронных измерений 31.07.07 в первом пункте на $H = 0,5$ м (1) и во втором пункте на $H = 2$ м (2)

качественно подобны. В то же время в пункте 2 на высоте 2 м наблюдается «замывание» или «подавление» высокочастотных флуктуаций, что можно объяснить увеличением длительности выбросов, обусловленным дополнительной генерацией аэрозоля при перемещении элементов объема воздуха из пункта 1 в пункт 2. Из предыдущего раздела статьи следует, что перемещение по высоте воздухозаборника нефелометра принципиально не изменит эффект замывания.

Из рис. 5 видно, что наряду с замыванием «высокочастотных» флуктуаций растет амплитуда флуктуаций на периодах, сопоставимых с периодами, определяемыми длительностями всплесков, и, что естественно, также на периодах, сравнимых с интервалами между всплесками.

Отдельные примеры не определяют характеристику реализации в целом. Поэтому нами были рассчитаны спектры плотности мощности флуктуаций коэффициента направленного светорассеяния по данным измерений 31.07.07. Такой спектр по данным измерений 31.07.07 в пункте 2 показан на рис. 6 (кривая 1).

На этом же рисунке приведен спектр флуктуаций в пункте 1 (кривая 2) и его степенная аппроксимация (прямая 4); спектр флуктуаций 31.07.07, так же как и 24.07, аппроксимируется степенным спектром с показателем $-5/3$.

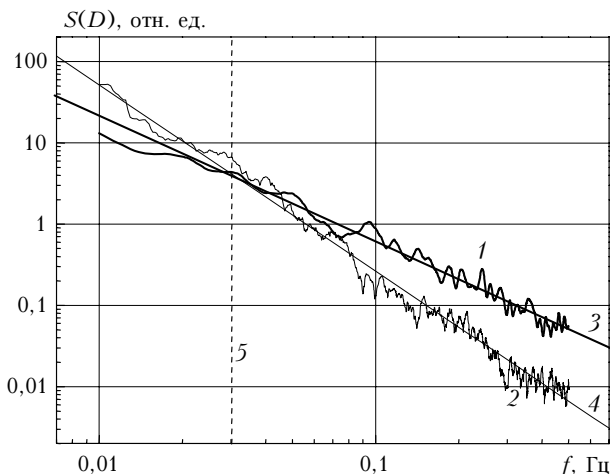


Рис. 6. Спектральные плотности мощности функций коэффициента направленного рассеяния на $H = 0,5$ м в первом пункте и $H = 2$ м во втором пункте (1) 31.07.07 (длина реализации 6000 с, временное разрешение 1 с). Степенная аппроксимация спектра в диапазоне частот $f > 0,03$ Гц с показателем $-1,47$ (2) и $1,32$ (3); с показателем $-5/3$ на высоте 0,5 м в первом пункте (4)

Спектр плотности мощности флуктуаций 31.07.07 в пункте не удалось аппроксимировать степенной функцией. Поэтому была использована кусочно-степенная аппроксимация указанного спектра. В области «высоких» частот $f > 0,03$ Гц рассматриваемый спектр аппроксимируется степенной функцией с показателем 1,47 (кривая 3, рис. 6), а в области частот от 0,001 до 0,03 Гц — степенной функцией с показателем 1,32. Предложенная аппроксимация описывает как эффект подавления «высокочастотных» флуктуаций коэффициента направленного светорассеяния, так и усиление мощности флуктуации в диапазоне «средних» частот. Конечно, возможны и другие варианты аппроксимации анализируемого спектра, но они принципиально не изменят характер полученного результата.

Таким образом, выявлен нелокальный эффект трансформации спектра плотности мощности флуктуаций коэффициента направленного светорассеяния, обусловленный нелокальными эффектами генерации аэрозоля, а также его переноса и перемешивания в приземном слое атмосферы.

О корреляционных связях между вариациями коэффициентов направленного светорассеяния в двух разнесенных пунктах

С целью оценки корреляционных связей при флуктуациях в разнесенных пунктах была рассчитана взаимная корреляционная функция $F(\tau)$, где τ — временная задержка [7], по данным измерений 31.07.07. Из рис. 7 следует, что максимальная корреляция между флуктуациями коэффициента направленного светорассеяния имеет место при $\tau = 10$ с, что удовлетворительно согласуется с результатами измерений средней скорости ветра U на высоте 2 м. При расчетах использовалась та же реализация, что и при вычислении спектров мощности флуктуаций.

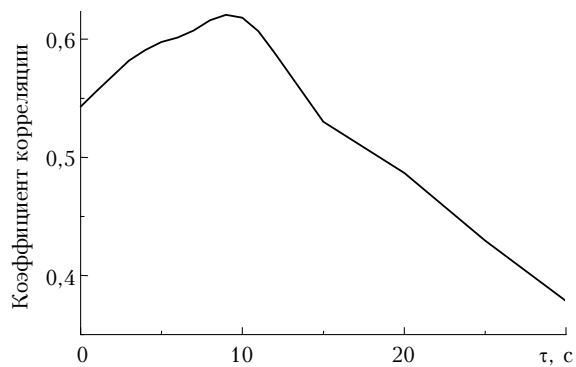


Рис. 7. Взаимная корреляционная функция флуктуаций коэффициента направленного светорассеяния в первом пункте на высоте 0,5 м и во втором пункте на высоте 2 м 31.07.07 (длина реализации 6000 с, временное разрешение 1 с)

Для коротких выборок при большей скорости ветра τ уменьшается примерно до 9 с, а при меньшей скорости — увеличивается. Слабая выраженность максимума у функции $F(\tau)$ (см. рис. 7) объясняется большим разбросом скорости ветра в период проведения измерений.

Заключение

1. Выполнены измерения флуктуаций коэффициента направленного светорассеяния при ветровом выносе аэрозоля с опустыненной территории.

2. Подтвержден тот факт, что при средней скорости ветра меньше 7–8 м/с на опустыненных территориях реализуется всплесковый режим флуктуаций параметров аэрозоля и, соответственно, генерации аэрозоля на подстилающей поверхности. Спектры плотности мощности флуктуаций коэффициента рассеяния сходны со спектрами флуктуаций счетных концентраций в Приаралье.

3. В приземном слое атмосферы вид спектра плотности мощности флуктуаций коэффициента рассеяния не меняется с изменением высоты.

4. При измерениях с разнесенными нефелометрами выявлены нелокальные эффекты в вариациях коэффициента рассеяния.

5. Выявлен эффект «подавления» высокочастотных флуктуаций ($f > 0,03$ Гц), коэффициента направленного светорассеяния при одновременном усилении его флуктуаций в области спектра примерно от 0,001 до 0,03 Гц.

6. Получена оценка времени запаздывания всплесков при разнесенных измерениях флуктуаций коэффициента направленного светорассеяния.

Очевидно, что результаты, полученные при анализе флуктуаций коэффициента направленного светорассеяния, приложимы к флуктуациям многих

других параметров аэрозоля, генерируемого на подстилающей поверхности (коэффициент рассеяния, дифференциальные счетные концентрации, массовая счетная концентрация), а также в целом к процессу генерации минерального аэрозоля на опустыненной территории.

Авторы выражают благодарность Г.И. Горчакову за полезное обсуждение и И.Г. Гранбергу за организацию комплексной экспедиции в Калмыкии.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты № 05-07-01080_а и 05-07-10080_к) и Программы Отделения наук о Земле РАН «Геофизика межгеосферных взаимодействий».

1. Горчаков Г.И., Шукуров К.А. Флуктуации концентрации субмикронного аэрозоля в конвективных условиях // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2004. Т. 39. № 1. С. 85–97.
2. 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.
3. Chatenet B., Marticorena B., Gomes L., Bergametti G. Assessing the microped size distributions of desert soils erodible by wind // Sedimentol. 1996. V. 43. P. 901–911.
4. Shao Y., Raupach M.R., Findlater P.A. Effect of saltation and bombardment on the entrainment of dust by wind // J. Geophys. Res. D. 1993. V. 98. N 12. P. 12,719–12,726.
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. 596–598.
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. Бендат Д., Пирсон А. Прикладной анализ случайных данных. М.: Мир, 1989. 541 с.
8. Ламли Д.Л., Пановский Г.А. Структура атмосферной турбулентности. М.: Мир, 1966. 264 с.
9. Емиленко А.С., Исаков А.А. О флуктуациях массовой концентрации аэрозоля в ветропесчаном потоке // Аэрозоли Сибири. XIV: Тезисы докл. Томск: ИОА СО РАН, 2007. С. 22.
10. Розенберг Г.В. Сумерки. М.: Физматгиз, 1963. 363 с.
11. Исаков А.А. О межгодовой изменчивости вариаций оптических и микрофизических параметров приземного аэрозоля на Звенигородской научной станции // Оптика атмосфер. и океана. 2007. Т. 20. № 8. С. 682–686.
12. Горчаков Г.И., Исаков А.А., Свириденков М.А. Статистические связи между коэффициентом рассеяния и коэффициентом направленного светорассеяния в области углов 0,5–165° // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. 1976. Т. 12. № 12. С. 1261–1268.
13. Иванов В.Н. Особенности условий возникновения и структуры конвективных ячеек в пограничном слое атмосферы // Вопросы физики атмосферы. СПб.: Гидрометеоиздат, 1998. С. 467–487.

A.S. Emilenko, A.A. Isakov. On fluctuations of the directed scattering coefficient of mineral aerosol of a desert area.

The analysis of fluctuations of the directed scattering coefficient of mineral aerosols was carried out. The data were obtained in July 2007 in Kalmykia. Measurements were made with the use of two nephelometers. Nephelometers were mounted at the same site at heights of 0.5 and 2 m or at two sites. The distance between instruments in the second case was about 30 m in the direction of wind. The frequency of the analog-digital converter operation was 1 Hz. The main attention was put to the non-local effects during aerosol generation in wind-sand stream with wind speed in the range 5–8 m/s. In near-ground layer of the atmosphere, the character of fluctuations power law spectrum does not change with height. The non-local effects in scattering coefficient variations were registered in measurements by nephelometers.