

ОПТИКА КЛАСТЕРОВ, АЭРОЗОЛЕЙ И ГИДРОЗОЛЕЙ

УДК 551.510; 550.37

Вариации удельного заряда сальтирующих песчинок в ветропесчаном потоке на опустыненной территории

Г.И. Горчаков¹, В.М. Копейкин¹, А.В. Карпов¹, А.А. Титов²,
Д.В. Бунтов¹, Г.А. Кузнецов¹, Р.А. Гуцин², О.И. Даценко²,
Г.А. Курбатов³, А.О. Серегин², А.В. Соколов^{1*}

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН

119017, г. Москва, Пыжевский пер., 3

²Московский государственный университет информационных технологий, радиотехники и электроники

119454, г. Москва, пр. Вернадского, 78

³Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Физический факультет

119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

Поступила в редакцию 2.11.2015 г.

Впервые получено распределение вероятностей для удельного заряда сальтирующих песчинок на опустыненной территории. По данным измерений на опустыненной территории в Калмыкии (июль 2014 г.) удельный заряд сальтирующих песчинок менялся от 10 до 150 мкКл/кг при среднем значении 48,5 мкКл/кг.

Создан оригинальный аппаратный комплекс, с помощью которого на опустыненной территории в Калмыкии выполнены синхронные измерения флуктуаций электрического тока сальтации и концентрации сальтирующих песчинок, а также турбулентных пульсаций скорости ветра. Приведены оценки пороговых скоростей сальтации и генерации электрических зарядов в ветропесчаном потоке. Впервые установлены обусловленные нелинейными процессами в ветропесчаном потоке закономерности трансформации статистических характеристик вариаций в ряду параметров: скорость ветра – концентрация песчинок – плотность электрического тока сальтации, включая изменения эмпирических функций распределения и спектров плотности мощности флуктуаций указанных параметров.

Ключевые слова: опустынивание, ветропесчаный поток, нелинейные процессы, сальтация, электрический ток сальтации, удельный заряд, эмпирические функции распределения, спектры мощности флуктуаций; desertification, wind sand flux, nonlinear processes, saltation, electric current of saltation, specific charge, empirical function distribution, fluctuation power spectra.

Введение

Опустынивание вносит ощутимый негативный вклад в изменение окружающей среды и климата. Однако процессы опустынивания до сих пор недостаточно изучены. Важную роль в этих процессах играет взаимодействие атмосферы с подстилающей поверхностью. На песчаных опустыненных территориях это взаимодействие осуществляется главным образом через ветропесчаный поток, в котором основным процессом является сальтация [1–6].

* Геннадий Ильич Горчаков (gengor@ifaran.ru); Владимир Михайлович Копейкин (kopeikin@ifaran.ru); Алексей Владимирович Карпов (karпов@ifaran.ru); Аркадий Арсеньевич Титов (dor7338@mail.ru); Дмитрий Владимирович Бунтов (dbunt@mail.ru); Герман Алексеевич Кузнецов (german-710@yandex.ru); Роман Альбертович Гуцин (roma-max7@mail.ru); Олег Игоревич Даценко (datoleg@yandex.ru); Григорий Александрович Курбатов (kurbatov_ga@physics.msu.ru); Александр Олегович Серегин (alex-270591@mail.ru); Александр Валерьевич Соколов (sav.center@gmail.com).

Ветропесчаный поток отличается аномально высокой электризацией [7–15]. В работе [7] отмечается, что напряженность электрического поля в ветропесчаном потоке может достигать +166 кВ/м (на высоте 1,7 см). Как известно, действующая на сальтирующую песчинку электрическая сила равна произведению напряженности электрического поля на заряд песчинки Q , а соответствующий вклад в суммарное ускорение песчинки равен произведению напряженности электрического поля на удельный заряд песчинки $\gamma = Q/m$, где m – масса песчинки. В [7] дана оценка среднего удельного заряда сальтирующих песчинок: $\gamma = +60$ мкКл/кг. Отметим, что при указанных в [7] значениях напряженности электрического поля и удельного заряда сальтирующей песчинки диаметром 150 мкм действующая на песчинку сила тяжести скомпенсирована электрической силой (полет песчинки в состоянии «невесомости»).

Выполненные нами в 2005 г. на опустыненной территории измерения электрических токов сальтации [8] и аналогичные измерения в последующие годы на опустыненных территориях в Астраханской обл. [10, 11], а также лабораторные эксперименты [12]

свидетельствуют о том, что процесс сальтации практически всегда сопровождается процессом электризации песчинок.

В [14] представлены результаты измерений удельного заряда сальтирующих песчинок на опустыненной территории в Астраханской обл. для трех периодов времени длительностью примерно от 1 ч 30 мин до 3 ч 50 мин. Накопленные заряды определялись путем интегрирования электрических токов сальтации. Измеренные средние удельные заряды сальтирующих песчинок варьировали в пределах примерно от 27 до 42 мкКл/кг. Однако здесь возникает неопределенность, обусловленная знакопеременностью наблюдаемых электрических токов сальтации. Если исходить из общепринятой гипотезы о том, что положительные электрические заряды переносятся крупными песчинками, и исключить из рассмотрения отрицательную составляющую электрического тока сальтации, то в этом случае, по нашим данным, удельный заряд варьирует в пределах примерно от 31 до 53 мкКл/кг. Таким образом, оказалось, что удельный заряд сальтирующих песчинок меняется в сравнительно широких пределах.

В [13] в приземном слое атмосферы были зарегистрированы значения напряженности электрического поля, достигающие десятков кВ/м. Как следует из [7], в приповерхностном слое атмосферы напряженность электрического поля может быть намного больше, чем в приземном слое.

Из вышеизложенного следует, что, во-первых, электрические силы действительно могут играть существенную роль в ветропесчаном потоке на опустыненных территориях и, во-вторых, изменчивость электрических характеристик ветропесчаного потока, включая удельный заряд сальтирующих песчинок, слабо изучена.

Основной целью нашей работы является исследование короткопериодных вариаций удельного заряда сальтирующих песчинок на опустыненной территории. Были использованы данные синхронных измерений в конвективных условиях на опустыненной территории в Калмыкии 27.07.2014 г., когда имел место всплесковый режим сальтации [16], а именно флуктуаций счетной концентрации сальтирующих песчинок и плотности электрического тока сальтации. В этот день наблюдались только положительные всплески тока сальтации, что упростило интерпретацию данных измерений и повысило надежность оценок удельного заряда сальтирующих песчинок.

В связи с недостаточной изученностью изменчивости характеристик ветропесчаного потока была поставлена задача исследования обусловленных нелинейностью процессов в ветропесчаном потоке закономерностей изменчивости статистических характеристик флуктуаций (пульсаций) в ряду параметров: скорость ветра — концентрация сальтирующих песчинок — плотность электрического тока сальтации, включая изменчивость эмпирических функций распределения и спектров плотности мощности флуктуаций трех вышеуказанных параметров. При исследовании процессов в ветропесчаном потоке необходима также оценка пороговых скоростей изучаемых процессов при высоком временном разрешении.

Для исследования короткопериодных вариаций удельного заряда был создан оригинальный аппаратный комплекс.

Методика измерений и аппаратура

Для определения удельного заряда сальтирующих песчинок необходимо выполнить синхронные измерения накопленных за определенное время заряда и массы достаточно большого количества песчинок. В [14] с помощью специальных проточных ловушек, присоединенных к электрометрическим усилителям, измерялась временная зависимость (с разрешением 1 с) электрических токов, сальтирующих в течение периода времени примерно от одного до нескольких часов в связи с необходимостью накопления достаточно большой массы песчинок порядка 0,1–1,0 г. В настоящей статье удельный заряд сальтирующих песчинок определялся для порывов ветра и соответствующих всплесков сальтации длительностью примерно от 1 до 5 мин. Для каждого порыва ветра с помощью фотоэлектрического счетчика сальтирующих песчинок [17] измерялись с разрешением 1 с накопленная счетная концентрация сальтирующих песчинок и накопленный в течение всплеска заряд.

Согласно данным Семенова [4], распределение сальтирующих песчинок по размерам в приповерхностном слое атмосферы слабо зависит от высоты. Это обстоятельство позволяет по данным синхронных измерений счетной и массовой концентрации сальтирующих песчинок в течение 1–3 ч осуществить калибровку фотоэлектрического счетчика сальтирующих песчинок с целью восстановления короткопериодной изменчивости массовой концентрации сальтирующих песчинок.

Схема аппаратного комплекса синхронных измерений счетной концентрации сальтирующих песчинок и их заряда с временным разрешением 1 с представлена на рис. 1. Входы воздухозаборников (ВП1 и ВП2) расположены на одной и той же высоте над подстилающей поверхностью на расстоянии около 5 см друг от друга и установлены навстречу воздушному потоку. Воздушный поток ВП1 через проточный измеритель токов сальтации (ПИТС) создается побудителем расхода ПБ1 и контролируется ротаметром Р1. Влетающие в ловушку сальтирующие песчинки (ТП — схематическое изображение траекторий песчинок) осаждаются на входном электроде (ВЭ) и отдают ему заряд, который стекает через входное сопротивление электрометрического усилителя (ЭМУ). Выходной сигнал ЭМУ поступает на вход многоканального аналого-цифрового преобразователя АЦП, подключенного к персональному компьютеру (ПК). Второй воздушный поток ВП2 поступает в корпус камеры (КК) фотоэлектрического счетчика. Оптическая ось осветителя перпендикулярна воздушному потоку, прокачиваемому через фотоэлектрический счетчик. В состав осветителя входят источник излучения (ИИ), конденсор (К), диафрагма (Д2) и объектив (О2). Ловушки света (ЛС1 и ЛС2) обеспечивают снижение уровня засветок в счетчике. Свет, рассеянный песчинками, регистрируется с помощью

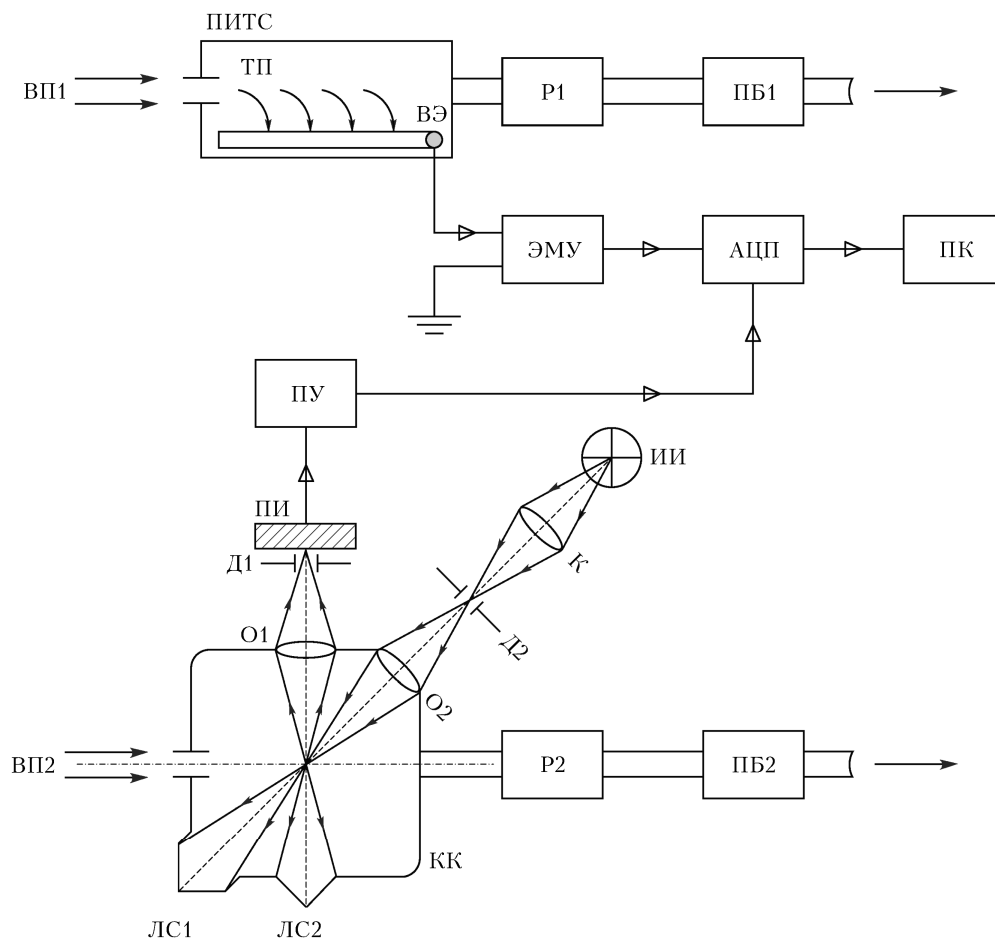


Рис. 1. Схема измерения концентрации сальтирующих песчинок и электрического тока сальтации

фотометра, в состав которого входят объектив (О1), диафрагма (Д1) и приемник излучения (ПИ). Входной сигнал с приемника излучения через предварительный усилитель (ПУ) поступает в многоканальный АЦП. Фотометр регистрирует излучение, рассеянное песчинками под углом 90°. В состав фотоэлектрического счетчика также входит побудитель расхода (ПБ2) и ротаметр (Р2). Аппаратура для измерений параметров распределения сальтирующих песчинок по размерам и электрического тока сальтации была использована нами в полевых условиях летом 2014 г.

Для контроля вариаций скорости ветра в приземном слое атмосферы на высоте 2 м над уровнем подстилающей поверхности была установлена акустическая метеостанция «Метео-2».

Вариации концентрации сальтирующих песчинок и плотности электрического тока сальтации в конвективных условиях

В июле 2014 г. на опустыненной территории в Калмыкии с помощью вышеописанного аппаратного комплекса были выполнены с разрешением 1 с син-

хронные измерения счетной концентрации сальтирующих песчинок N и плотности электрического тока сальтации j в нижнем слое сальтации [18] на высоте 5 см, а также модуля V горизонтальной компоненты скорости ветра в приземном слое атмосферы. В данной работе проанализированы результаты указанных измерений 27.07.2014 г. в период времени с 10:00 до 18:00. Этот день отличался сильно выраженной конвекцией в приземном слое атмосферы. В порывах скорость ветра достигала 10–11 м/с, а между порывами снижалась до 1–2 м/с (среднее значение около 5 м/с). Важно то, что в этот день на высоте 5 см практически не наблюдались отрицательные значения электрического тока сальтации, что снимало неоднозначность определения удельного заряда сальтирующих песчинок [14]. Согласно Bagnold [1], твердый расход или проинтегрированный по высоте массовый поток сальтации R может аппроксимироваться нелинейной зависимостью от скорости ветра:

$$R = A(V - V_0)^m, \quad (1)$$

где A – константа; V_0 – так называемая пороговая скорость сальтации. По данным Bagnold, показатель степени $m = 3$ и $V_0 \approx 4$ м/с.

Такая же нелинейность имеет место и для зависимостей от скорости ветра массовых и счетных потоков сальтации на конкретных высотах в нижнем слое сальтации.

Следует иметь в виду, что пороговая скорость сальтации обычно определяется при осреднении за сравнительно большой промежуток времени (от нескольких минут до примерно 30 мин). В нашей работе [5] показано, что в нестационарных условиях такой подход не вполне корректен, поскольку в отдельные промежутки времени в порывах скорость ветра может намного превосходить ее среднее значение. Поэтому в настоящей статье мы оцениваем пороговую скорость по данным измерений с временным разрешением 1 с («мгновенная» пороговая скорость).

Вследствие указанной нелинейности (1) временная изменчивость интенсивности сальтации и плотности электрического тока сальтации в конвективных условиях представляет собой последовательность всплесков, что вполне аналогично всплесковому режиму генерации аэрозоля на опустыненных территориях под воздействием ветропесчаного потока [16].

Пример результатов синхронных измерений концентрации сальтирующих песчинок N (кривая 2) плотности электрического тока сальтации j (кривая 1) и скорости ветра V (кривая 3) 27.07.2014 г. на опустыненной территории в Калмыкии представлен на рис. 2. Полученные данные позволяют достаточно надежно выделить на зависимости $V(t)$, где t – время, периоды времени, в которые наблюдаются всплески сальтации и всплески электрического тока

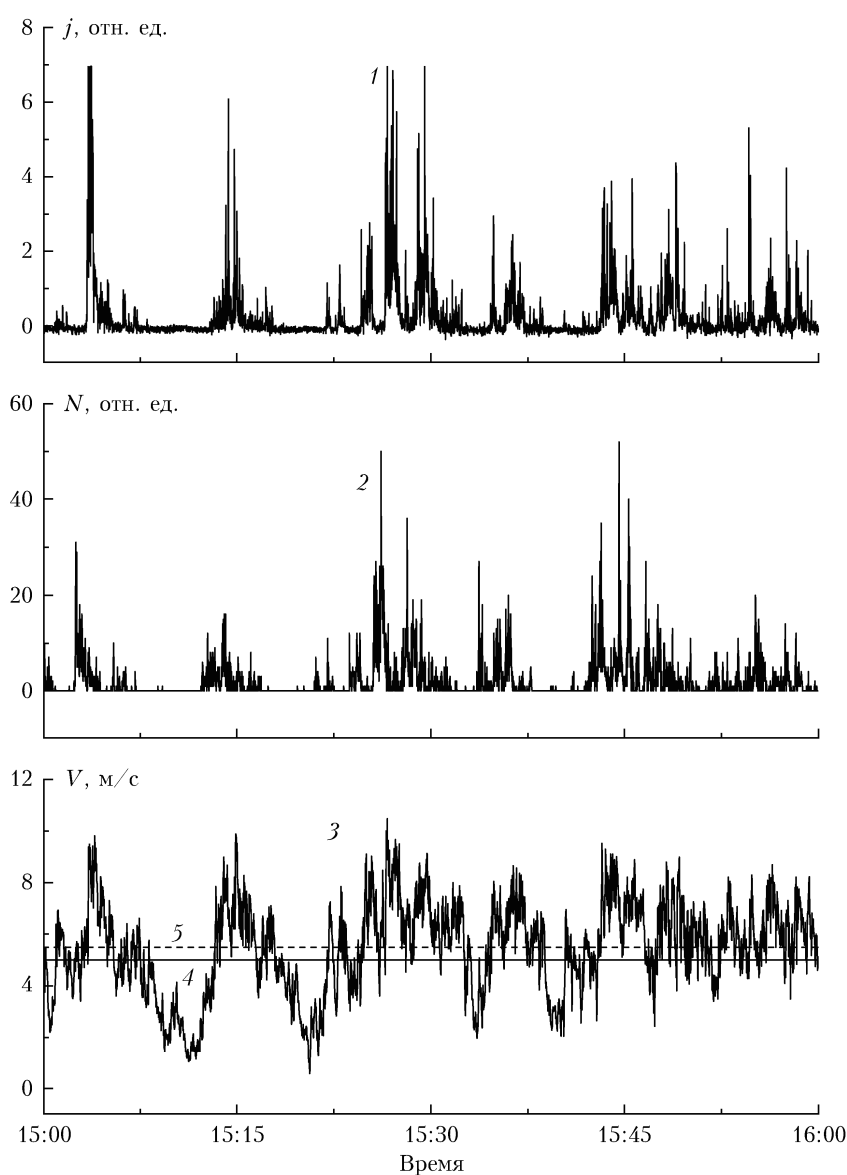


Рис. 2. Плотность электрического тока сальтации (1), концентрация сальтирующих песчинок (2) и модель горизонтальной компоненты скорости ветра (3) по данным измерений на опустыненной территории в Калмыкии 27.07.2014 г. с временным разрешением 1 с (4 и 5 – пороговые скорости ветра для генерации электрических зарядов и для сальтации песчинок)

сальтации. Из данных измерений 27.07.2014 г. следует, что среднее значение пороговой скорости сальтации V_0 при временном разрешении 1 с примерно равно 5 м/с (см. также [19]), что заметно превышает значение V_0 по данным Bagnold.

Генерация зарядов при сальтации, как это следует из результатов измерений электрических токов сальтации, также является нелинейным процессом типа (1). Однако пороговая скорость генерации сальтации V_0^* несколько отличается от V_0 и примерно равна 5,5 м/с в рассматриваемом нами случае. По-видимому, показатель степени m^* для генерации электрических зарядов превышает значение $m = 3$.

Анализ показал, что длительность всплесков N и j меняется в пределах примерно от 0,5 до 5 мин. Нами были определены накопленные за периоды всплесков с длительностями от 1 до 5 мин суммарные счетные концентрации сальтирующих песчинок, которые были пересчитаны на массовые концентрации с учетом калибровки, и накопленные за периоды всплесков тока электрические заряды. Следует отметить, что всплески концентрации песчинок практически всегда сопровождалась всплесками тока.

Статистический анализ вариаций концентрации сальтирующих песчинок и плотности электрического тока сальтации

Наблюдаемая в конвективных условиях изменчивость параметров ветропесчаного потока N и j (см. рис. 2), определяющих вариации удельного заряда сальтирующих песчинок, существенно отличается от изменчивости скорости ветра, от которой, согласно современным представлениям, зависит интенсивность сальтации. Однако изменчивость концентрации сальтирующих песчинок [5, 19] и плотности электрических токов сальтации [8, 10, 11, 14, 20, 21], которая в значительной степени обусловлена нелинейностью процессов в ветропесчаном потоке, до сих пор недостаточно изучена. В частности, представляет интерес трансформация эмпирических функций распределения и спектров плотности мощности флуктуаций при переходе от скорости ветра к концентрации сальтирующих песчинок и далее к плотности электрического тока сальтации.

Нами были рассчитаны статистические характеристики [21, 22] вариаций V , N и j по данным измерений 27.07.2014 г. в период с 13:00 до 16:00. В частности, для скорости ветра были рассчитаны средняя скорость ветра \bar{V} , которая оказалась равной 5 м/с, стандартное отклонение σ_v и дисперсия $\sigma_v^2 = (n-1)^{-1} \sum_{k=1}^n v_k^2$, где $v_k = V_k - \bar{V}$; n – число измерений; k – текущий номер измерения; V_k – текущее значение скорости ветра; v_k – соответствующее отклонение скорости ветра от среднего значения \bar{V} , коэффициент вариации $\gamma_v = \sigma_v / \bar{V}$, асимметрия рас-

пределения $A_v = n^{-1} \sum_{k=1}^n v_k^3$ и эксцесс $E_v = -3 + n^{-1} \sum_{k=1}^n v_k^4$. Одновременно для рассматриваемого ан-

самбля наблюдательных данных были рассчитаны аналогичные характеристики вариаций N и j .

На рис. 3 представлено для рассматриваемого периода времени распределение вероятностей для скорости ветра V (гистограмма 1), которое с удовлетворительной точностью аппроксимируется (кривая 2 на рис. 3) усеченным нормальным или гауссовым распределением $w(V) = 10 \exp(-0,12(V-5)^2)$ с параметрами $\bar{V} = 5$ м/с и $\sigma_v = 2,04$ м/с, где значение w дано в процентах. Наблюдаемое распределение V имеет незначительную асимметрию ($A_v = 0,04$), отрицательный эксцесс ($E_v = -0,59$) и коэффициент вариаций $\gamma_v = 0,365$.

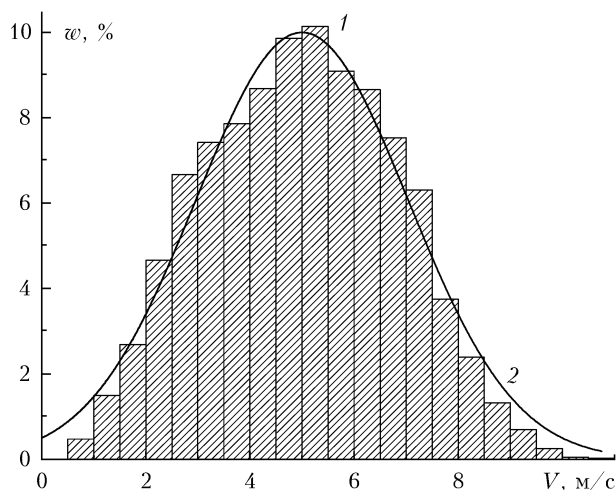


Рис. 3. Эмпирическая функция распределения скорости ветра (1) по данным измерений 27.07.2014 г. в период с 13:00 до 16:00 и аппроксимирующее усеченное нормальное распределение (2)

Вследствие нелинейности процесса сальтации эмпирическая функция распределения (ЭФР) концентрации сальтирующих песчинок N радикально отличается от ЭФР для скорости ветра V (рис. 4, кривая 1). Она с удовлетворительной точностью, за исключением узкого диапазона малых концентраций, аппроксимируется экспоненциальным распределением (рис. 4, кривая 2), которое можно представить в виде $\lg w(N) = 2,95 - 0,145N$. Особенности статистических характеристик вариаций концентрации N обусловлены существенными отличиями ЭФР N от гауссового: коэффициент вариаций, параметр асимметрии и эксцесс равны 2,36; 4,3 и 27,2 соответственно.

Эмпирическая функция распределения плотности электрического тока сальтации (рис. 4, кривая 3) свидетельствует о нелинейности другого процесса – процесса генерации электрических зарядов в ветропесчаном потоке. Она с приемлемой точностью может быть аппроксимирована сложной функцией (рис. 4,

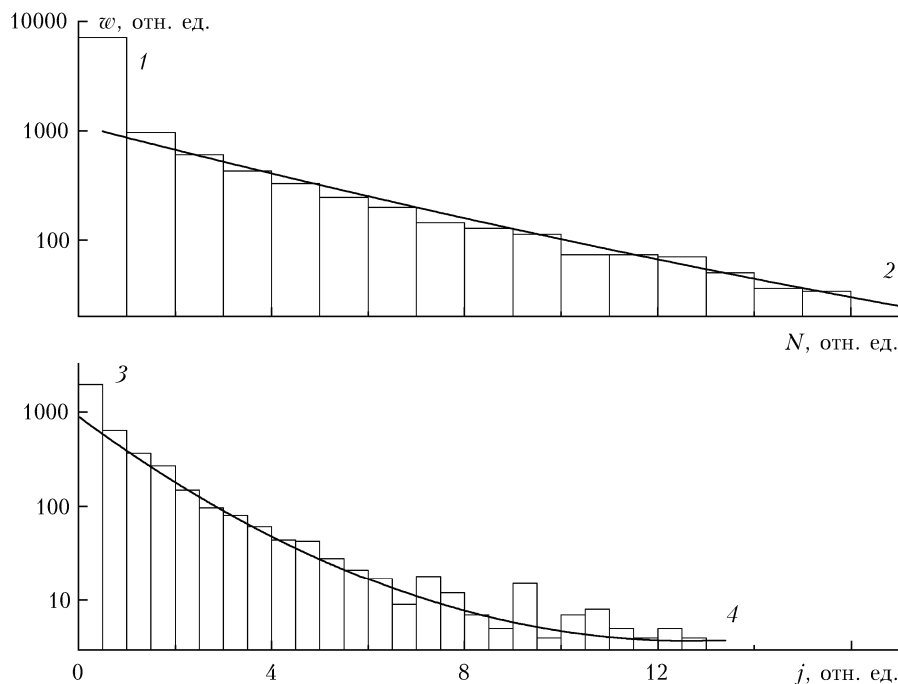


Рис. 4. Эмпирические функции распределения концентрации сальтирующих песчинок (1) и плотности электрического тока сальтации (3) по данным измерений 27.07.2014 г. в период с 13:00 до 16:00 и аппроксимирующие распределения (2 и 4)

кривая 4): экспонентой, зависящей от полинома второй степени переменной j (отн. ед.): $\lg w(j) = 2,98 - 0,38j + 0,05j^2$.

Статистические характеристики вариаций j еще больше (по сравнению с характеристиками N) отличаются от статистических характеристик вариаций скорости ветра (значения коэффициента вариаций, параметров асимметрии и эксцесса равны соответственно 4,58; 5,17 и 36,1). Это, в частности, свидетельствует о заметном отличии процесса генерации электрических зарядов в ветропесчаном потоке от процесса сальтации при их несомненном родстве.

Спектральный анализ вариаций концентрации сальтирующих песчинок и плотности электрического тока сальтации

Особенности нелинейных процессов в ветропесчаном потоке отчетливо проявляются на временной изменчивости концентрации сальтирующих песчинок N и электрического тока сальтации j (см. рис. 2) и прежде всего через всплесковый режим их вариаций.

Важной характеристикой временной изменчивости N и j являются спектры плотности мощности [23, 24] их флуктуаций. На рис. 5 представлены результаты расчетов спектров плотности мощности флуктуаций турбулентных пульсаций модуля горизонтальной компоненты скорости ветра V (кривая 1), флуктуаций концентрации сальтирующих песчинок N (кривая 2) и плотности электрического тока сальтации j (кривая 3) для диапазона частот примерно

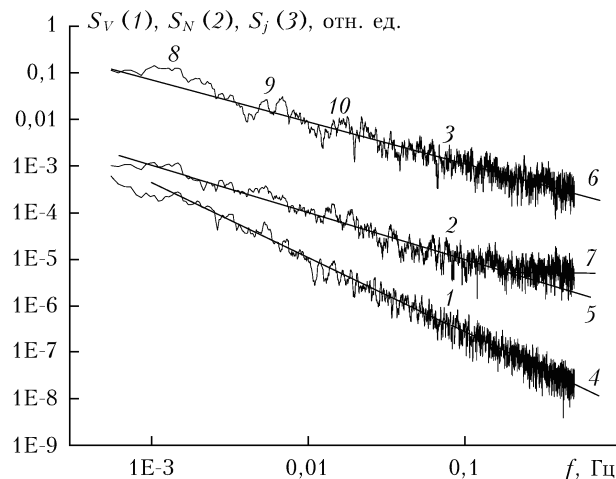


Рис. 5. Спектральная плотность мощности турбулентных пульсаций модуля горизонтальной компоненты скорости ветра (1), флуктуаций концентрации сальтирующих песчинок (2) и плотности электрического тока сальтации (3) по данным измерений 27.07.2014 г. с временным разрешением 1 с. Аппроксимирующие степенные спектры 4, 5 и 6 и аппроксимация (7) высокочастотной части спектра флуктуации концентрации песчинок. Обусловленные конвекцией моды в спектре флуктуаций тока сальтации (8, 9 и 10)

от 0,5 мГц до 0,5 Гц (спектры рассчитаны по данным синхронных измерений с временным разрешением 1 с в Калмыкии 27.07.2014 г. в период с 13:00 до 16:00). Спектры $S_V(f)$, $S_N(f)$ и $S_j(f)$ с удовлетворительной точностью аппроксимируются степенными функциями (кривые 4, 5 и 6, рис. 5) типа $G(f) = Cf^\alpha$, где C – константа, причем $\alpha_V = -1,55$, $\alpha_N = -1,0$ и $\alpha_j = -0,84$.

На рассматриваемых спектрах достаточно отчетливо выражены (особенно в представлении $fS(f) - \lg f$) конвективные моды в низкочастотной части спектров, что обусловлено всплесковым режимом флуктуаций N и j и порывистостью ветра в диапазонах частот от 5 до 30, от 1,5 до 5 и от 0,5 до 1,5 мин (см. рис. 5). Низкочастотная мода (5–30 мин), по-видимому, обусловлена модуляцией амплитуд более коротких (с периодами меньше примерно 5 мин) всплесков N и j . На рис. 5 видно, что указанные конвективные моды наиболее отчетливо выражены на спектрах $S_j(f)$.

Следует также отметить, что в области высоких частот на спектре $S_N(f)$ присутствует интервал частот с «белым» шумом (кривая 7, рис. 5).

Таким образом, спектры плотности мощности флуктуаций N и j заметно отличаются от спектра турбулентных пульсаций скорости ветра. Отчетливо выражена закономерная трансформация эмпирических функций распределения и спектров мощности флуктуаций при переходе от скорости ветра к концентрации сальтирующих песчинок и далее к плотности электрического тока сальтации.

Удельный заряд сальтирующих песчинок

По данным синхронных измерений N и j на опустыненной территории в Калмыкии 27.07.2014 г. в период с 10:00 до 18:00 были определены накопленные заряды и суммарные концентрации сальтирующих песчинок для всплесков длительностью примерно от 1 до 5 мин. Была выполнена калибровка счетчика, позволяющая определять накопленные в течение всплесков суммарные массы сальтирующих песчинок [25], и для каждого всплеска были рассчитаны средние удельные заряды.

На рис. 6 представлена эмпирическая функция распределения удельного заряда сальтирующих песчинок γ , который, согласно данным измерений

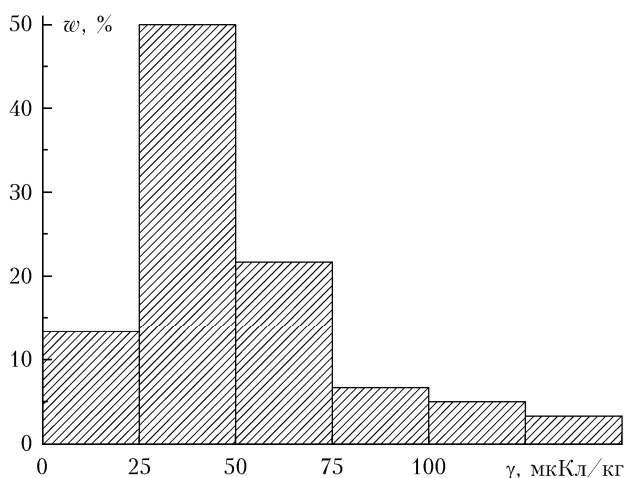


Рис. 6. Эмпирическая функция распределения удельного заряда сальтирующих песчинок по данным измерений на опустыненной территории Калмыкии

27.07.2014 г., менялся в пределах от 10 до 150 мкКл/кг. Среднее значение удельного заряда оказалось равным 48,5 мкКл/кг, что согласуется по порядку величины с результатами работ [7, 14]. Распределение вероятностей для удельного заряда получено впервые.

Рассмотренные результаты свидетельствуют о том, что удельный заряд сальтирующих песчинок меняется в широких пределах. При значениях напряженности электрического поля в приповерхностном слое атмосферы порядка десятков кВ/м, которые наблюдались рядом авторов [7, 14], и удельных зарядах порядка десятков мкКл/кг влияние электрических сил на перенос песчинок становится значительным, что может потребовать пересмотра подхода к исследованию динамики сальтации в ветропесчаном потоке.

Заключение

Представлены результаты впервые выполненного экспериментального исследования короткопериодных вариаций удельного заряда сальтирующих песчинок в ветропесчаном потоке на опустыненной территории.

Создан оригинальный аппаратный комплекс для проведения синхронных измерений концентрации сальтирующих песчинок и электрического тока сальтации в приповерхностном слое атмосферы с временным разрешением 1 с.

На опустыненной территории в Калмыкии в конвективных условиях проведены синхронные измерения флуктуаций концентрации сальтирующих песчинок и плотности электрического тока сальтации. Измерения проводились в нижнем слое сальтации в условиях положительной определенности электрического тока сальтации. Измерения флуктуаций концентрации песчинок и тока сальтации сопровождались измерениями турбулентных пульсаций скорости ветра в приземном слое атмосферы.

Характерной особенностью наблюдавшихся в конвективных условиях вариаций исследуемых параметров ветропесчаного потока являлся всплесковый режим сальтации и генерации электрического тока сальтации, обусловленный порывами ветра.

Согласно данным измерений в Калмыкии пороговая скорость сальтации при временном разрешении 1 с составляла 5 м/с, а пороговая скорость генерации электрических зарядов в ветропесчаном потоке была равна примерно 5,5 м/с.

Выявлены обусловленные нелинейностью процессов в ветропесчаном потоке закономерности изменчивости статистических характеристик при переходе от скорости ветра к концентрации сальтирующих песчинок и плотности электрического тока сальтации. Для скорости ветра распределение вероятностей оказалось близким к усеченному нормальному с небольшой асимметрией (0,04), отрицательным эксцессом (-0,59) и сравнительно небольшим коэффициентом вариаций (0,365). Коэффициенты вариаций для концентрации песчинок и плотности электрического тока сальтации оказались довольно

большими (2,36 и 4,58 соответственно), а распределения вероятностей для этих параметров сильно асимметричными (параметры асимметрии 4,3 и 5,17) с большими значениями эксцессов (27,2 и 36,1). В отличие от скорости ветра распределение вероятностей для концентрации песчинок оказалось экспоненциальным, а распределение вероятностей для плотности тока сальтации удалось аппроксимировать экспонентой, аргументом которой является полином второй степени.

Проанализированы спектры плотности мощности флуктуаций концентрации сальтирующих песчинок и электрического тока сальтации, а также турбулентных пульсаций скорости ветра в приземном слое атмосферы. Показано, что в диапазоне частот примерно от 0,5 мГц до 0,5 Гц спектры плотности мощности флуктуаций (пульсаций) скорости ветра, концентрации песчинок и плотности электрического тока сальтации с удовлетворительной точностью аппроксимируются степенными спектрами с показателями спектра $-1,55$ для скорости ветра, примерно $-1,0$ для концентрации сальтирующих песчинок и $-0,84$ для плотности электрического тока сальтации. Наряду с существенными изменениями наклона спектра (в логарифмических координатах) при переходе от скорости ветра к концентрации песчинок и электрическому току сальтации имеет место увеличение степени выраженности на рассматриваемых спектрах конвективных мод в диапазонах частот примерно от 5 до 30, от 1,5 до 5 и от 0,5 до 1,5 мин при переходе от скорости ветра к концентрации песчинок и далее к плотности электрического тока сальтации.

Объектами анализа были порывы ветра длительностью примерно от 1 до 5 мин и соответствующие всплески концентрации сальтирующих песчинок и электрического тока сальтации. Для указанных порывов определялись накопленные концентрации сальтирующих песчинок и накопленные заряды, что позволило впервые получить эмпирическую функцию распределения удельного заряда сальтирующих песчинок, характеризующую его короткопериодную изменчивость. Согласно данным измерений удельный заряд сальтирующих песчинок менялся в пределах от 10 до 150 мкКл/кг при среднем значении 48,5 мкКл/кг.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 14-05-00523).

1. *Bagnold R.A.* The physics of blown sand and desert dunes. London: Methuen, 1941. 265 p.
2. *Shao J.* Physics and modeling of wind erosion. N.Y.: Springer, 2000. 393 p.
3. *Zheng X.* Mechanics of wind blown sand movements. Berlin: Springer, 2009. 290 p.
4. *Семенов О.Е.* Введение в экспериментальную метеорологию и климатологию песчаных бурь. Алматы: КазНИИЭК, 2011. 580 с.
5. *Горчаков Г.И., Титов А.С., Бунтов Д.В.* Параметры нижнего слоя сальтации на опустыненной территории // Докл. РАН. 2009. Т. 424, № 1. С. 102–106.
6. *Горчаков Г.И., Карпов А.В., Копейкин В.М., Злобин И.А., Бунтов Д.В., Соколов А.В.* Исследование динамики сальтирующих песчинок на опустыненных территориях // Докл. РАН. 2013. Т. 452, № 6. С. 669–676.

7. *Schmidt D.S., Schmidt R.A., Dent Y.D.* Electrostatic force on saltating sand // J. Geophys. Res. D. 1998. V. 103, N 8. P. 8997–9001.
8. *Горчаков Г.И., Ермаков В.Н., Копейкин В.М., Исаков А.А., Карпов А.В., Ульяненко А.В.* Электрические токи сальтации в ветропесчаном потоке // Докл. РАН. 2006. Т. 410, № 2. С. 259–262.
9. *Kok J.F., Renno N.O.* Electrostatics in wind-blown sand // Phys. Rev. Lett. 2008. V. 100, N 1. Art. N 014501.
10. *Горчаков Г.И., Карпов А.В., Копейкин В.М., Бунтов Д.В., Курбатов Г.А.* Пылевая плазма ветропесчаного потока // VII Всерос. конф. по атмосферному электричеству. Сб. трудов. Т. 1. СПб.: ГГО, 2012. С. 57–58.
11. *Копейкин В.М., Горчаков Г.И., Карпов А.В., Колесникова А.Б.* Экспериментальное исследование электрических потоков сальтации // VII Всерос. конф. по атмосферному электричеству. Сб. трудов. Т. 1. СПб.: ГГО, 2012. С. 139–141.
12. *Zheng X.J., Huang N., Zhou Y.N.* Laboratory measurement of electrification of wind-blown sands and simulation of its effect on sand saltation movement // J. Geophys. Res. D. 2003. V. 108, N 10. Art. ACL13. 9 p.
13. *Vo T-L., Zheng X-Y.* A field observational study of electrification with a dust storm in Minkin, China // Aolian Res. 2013. V. 8, N 1. P. 39–47.
14. *Горчаков Г.И., Копейкин В.М., Карпов А.В., Бунтов Д.В., Соколов А.В.* Удельный заряд сальтирующих песчинок на опустыненных территориях // Докл. РАН. 2014. Т. 456, № 4. С. 476–480.
15. *Горчаков Г.И., Исаков А.А., Карпов А.В., Копейкин В.М.* Электрические процессы и массоперенос в ветропесчаном потоке на опустыненных территориях // VI Рос. конф. по атмосферному электричеству. Сб. трудов. Н/Новгород: ИПФ РАН, 2007. С. 75–76.
16. *Горчаков Г.И., Шукуров К.А.* Флуктуации концентрации субмикронного аэрозоля в конвективных условиях // Изв. РАН. Физика атмосф. и океана. 2003. Т. 39, № 1. С. 85–97.
17. *Бунтов Д.В.* Четырехканальный фотоэлектрический счетчик сальтирующих песчинок // VIII Междунар. конф. «Естественные и антропогенные аэрозоли». Тезисы докл. СПб.: СПбГУ, 2012. С. 17–18.
18. *Бютнер Э.К.* Динамика приповерхностного слоя воздуха. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. 158 с.
19. *Горчаков Г.И., Бунтов Д.В.* Флуктуации концентрации сальтирующих песчинок на опустыненных территориях // Естественные и антропогенные аэрозоли. VII. Сб. трудов. СПб.: СПбГУ, 2011. С. 38–43.
20. *Gorchakov G.I., Karpov A.V., Kopeikin V.M., Buntov D.V., Titov A.A., Kuznetsov G.A., Kurbatov G.A., Seregin A.O., Sokolov A.V.* Some key problems of the atmospheric aerosol physics // Proc. Int. Symp. (ISARD-2015). Saint-Peterburg: Saint-Peterburg State University, 2015. P. 13–14.
21. *Смирнов Н.В., Дунин-Барковский Н.В.* Краткий курс математической статистики для технических приложений. М.: Физматгиз, 1959. 436 с.
22. *Малинин В.Н.* Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. СПб.: РГГМ, 2008. 408 с.
23. *Ламли Дж., Пановский Г.А.* Структура атмосферной турбулентности. М.: Мир, 1966. 264 с.
24. *Бендат Дж., Пирсол А.* Прикладной анализ случайных данных. М.: Мир, 1989. 542 с.
25. *Горчаков Г.И., Копейкин В.М., Карпов А.В., Титов А.А., Бунтов Д.В., Серегин А.О., Соколов А.В., Кузнецов Г.А.*

G.I. Gorchakov, V.M. Kopeikin, A.V. Karpov, A.A. Titov, D.V. Buntov, G.A. Kuznetsov, R.A. Gushchin, O.I. Dazenko, G.A. Kurbatov, A.O. Seregin, A.V. Sokolov. **Specific charge variations of saltating sand in wind sand flux over desertified area.**

First the specific charge probability distribution of the saltating sand over the desertified area has been obtained. The specific charge of the saltating sand was varied between 10 and 150 $\mu\text{C}/\text{kg}$ (at the average 48.5 $\mu\text{C}/\text{kg}$) according to the measurement data in Kalmykia over the desertified area. An original setup has been designed whereby the synchronous measurements of the saltating sand concentrations and electric current fluctuations and also the turbulent pulsations of the wind velocity have been carried out over the desertified area in Kalmykia.

First transformation peculiarities determined by nonlinear processes in the wind sand flux of the statistical characteristics from the wind velocity to the sand grain concentration and further to the electric current of the saltation have been established. In particular, empirical function distributions and fluctuation power spectra were analyzed.