ИЗВЕСТИЯ РАН. ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА, 2022, том 58, № 5, с. 543–553

УДК 550.37, 551.510, 551.551

ПЫЛЕВАЯ ПЛАЗМА ВЕТРОПЕСЧАНОГО ПОТОКА НА ОПУСТЫНЕННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

© 2022 г. Г. И. Горчаков[a], *, В. М. Копейкин[a], А. В. Карпов[a], Р. А. Гущин[a], О. И. Даценко[a], Д. В. Бунтов[a]

[a] Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер., 3., Москва, 119017 Россия

*e-mail: gengor@ifaran.ru

Поступила в редакцию 29.04.2022 г.
После доработки 16.05.2022 г.
Принята к публикации 09.06.2022 г.

На опустыненных территориях в Астраханской обл. и Калмыкии в ветропесчаном потоке выполнены измерения электрических токов сальтации и токов, обусловленных ветровым переносом частиц пылевого аэрозоля. Представлены эмпирические функции распределения удельного заряда сальтирующих частиц в ветропесчаном потоке для условий квазинепрерывной и всплесковой сальтации. Установлено, что поверхностная плотность электрических зарядов достигает +25 нКл/м^2. Показано, что локальная напряженность электрического поля на поверхности сальтирующих частиц может превышать 450 кВ/м. Предложен механизм аномально высокой электризации ветропесчаного потока, включая инициирование высокоскоростной сальтации: электрические (коронные) разряды на подстилающей поверхности, что позволяет рассматривать ветропесчаный поток как пылевую плазму. Разработана аналитическая модель вылета сальтирующих частиц с подстилающей поверхности при коронном разряде. Показано, что при инициировании сальтации коронным разрядом скорость вылета заряженных частиц может превышать 1 м/с.

Ключевые слова: опустынивание, электризация ветропесчаного потока, электрические токи сальтации, обусловленные ветровым переносом частиц пылевого аэрозоля электрические токи, плотность электрических зарядов на подстилающей поверхности, локальная напряженность электрического поля, удельный заряд, коронный разряд, пылевая плазма ветропесчанного потока, инициирование сальтации коронными разрядами, скорость вылета сальтирующих частиц

DOI: 10.31857/S0002351522050054

1. ВВЕДЕНИЕ

При наблюдаемом в настоящее время потепления климата [1] возрастает вероятность погодных аномалий, что может привести к ускорению процессов опустынивания и аридизации [2]. На песчаных и опустыненных территориях взаимодействие атмосферы и подстилающей поверхности осуществляется через ветропесчаный поток (от песчаной поземки до песчаной бури) [3–6], который переносит огромные массы песка, формирует ландшафты и выносит в атмосферу большое количество минерального пылевого аэрозоля [7, 8]. Пылевой аэрозоль прямо и косвенно влияет на радиационный режим атмосферы [9], на процессы в биосфере [10] и на здоровье населения [11]. В ветропесчаном потоке (ВПП) основным процессом является сальтация – скачкообразное перемещение песчинок [3, 4, 12]. Процессы в ВПП недостаточно изучены. Сравнительно недавно установлено, что в ВПП наряду с песчаной фракцией и пылевым аэрозолем содержится фракция алевритовых частиц [13] (с размерами примерно от 10 до 100 мкм [14]). Алевритовая фракция ВПП заслуживает особого внимания, поскольку динамика алевритовых частиц отличается от динамики песчаных частиц и от динамики частиц пылевого аэрозоля [15–18].

Интенсивность сальтации, которая, как правило, характеризуется величиной твердого расхода или проинтегрированным по высоте массовым потоком сальтации, (общий расход по терминологии [6]) зависит от скорости ветра в приземном слое атмосферы [3–5, 7] или от динамической скорости [19] (скорости трения), что лежит в основе представлений о механизме сальтации. Однако современные модели не могут объяснить ряд важных особенностей процесса сальтации. До сих пор неясно, почему вертикальная компонента скорости вылета сальтирующих частиц (СЧ) с подстилающей поверхности практически не зависит от динамической скорости [20, 21]. Не обнаружен механизм генерации “высокоскорост-

ных” СЧ, которые не могут появиться как при отскоках СЧ, так и в процессе выбивания с подстилающей поверхности (ПП) новых СЧ [22]. Недостаточно изучены и электрические процессы в ВПП.

В настоящей работе представлены результаты комплексных экспериментов по исследованию электризации ВПП на опустыненных территориях (ОТ). Приведены результаты измерений электрических токов сальтации (ЭТС). Проанализированы результаты определения удельного заряда (УЗ) сальтирующих частиц. Выполнено сопоставление вариаций напряженности, электрического поля (НЭП) в приповерхностном слое атмосферы (ППСА) и ЭТС. Получена оценка плотности электрических зарядов на ПП и локальных значений НЭП в ВПП. Представлены результаты измерений электрических токов, обусловленных переносом частиц пылевого аэрозоля в ППСА. Показано, что вариации электрических характеристик ВПП с периодами примерно от 30 с до 30 мин определяются конвективно обусловленной изменчивостью горизонтальной компоненты скорости ветра (ГКСВ) в приземном слое атмосферы. Рассмотрен механизм инициирования сальтации электрическими разрядами на ПП. Представлена аналитическая модель вылета СЧ с ПП при электрическом (коронном) разряде. Показано, что при коронном разряде скорость вылета СЧ может превышать 1 м/с.

2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТОКИ САЛЬТАЦИИ

Ветропесчаный поток отличается аномально высокой электризацией. Согласно данным измерений на опустыненной территории [23] напряженность электрического поля в ППСА достигала (на высоте 1.7 см) 167 кВ/м, а средний удельный заряд сальтирующих частиц $\gamma = q/m$, где q и m – электрический заряд и масса песчинки, оказались равным +60 мкКл/кг. Удельный заряд измерялся с помощью ловушки Фарадея. Соответствующий средний электрический заряд на сальтирующей песчинке составляет примерно +280 фемтокулон, поскольку средний размер песчинок в рассматриваемом случае равен 150 мкм. Отсюда следует, что в ветропесчаном потоке возникают сравнительно большие квазигоризонтальные электрические токи сальтации, которые на несколько порядков превышают вертикальные электрические токи хорошей погоды (1.0–2.5 пА/м^2) [24, 25].

ЭТС были впервые измерены нами в августе 2005 г. на опустыненной территории в Калмыкии [26]. Последующие ежегодные измерения в 2006–2016 гг. [27] на опустыненных территориях в Астраханской обл. и Калмыкии показали, что ЭТС наблюдаются всегда при возникновении сальтации. В 2011 г. измерения ЭТС выполнялись синхронно на 4 уровнях (3.0, 5.0, 22 и 42 см) [28]. На рис 1а (кривая *1*) показан пример дневного хода плотности электрического тока сальтации j на высоте 2 см (*1*), а также напряжённости электрического поля E на высоте 2.5 см (*2*), по данным измерений на опустыненной территории в Астраханской обл. 15.08.2009 с временным разрешением 1 с. Результаты измерения плотности ЭТС в условиях квазинепрерывной (almost non-intermittent). Измерения ЭТС проводились в условиях всплесковой или перемежающейся (intermittent) сальтации. В частности, в период времени примерно от 14:45 до 16:50 можно выделить на рис. 1 (кривая *1*) пять интенсивных всплесков с средней длительностью около 25 мин. Сопоставление с результатами синхронных измерений горизонтальной компоненты скорости ветра (*1* на рис 1б) показало, что указанные всплески ЭТС обусловлены вариациями скорости ветра в рассматриваемый период времени, который на рис 1б выделен пунктирными линиями *2* и *3*. В [27] по данным измерений на ОТ в Калмыкии, установлено, что изменение плотности ЭТС и концентрации СЧ с периодами примерно 30 с до 30 мин определяются конвективно обусловленными вариациями скорости ветра. Результаты измерения ЭТС с временным разрешением 1 с (рис. 1) свидетельствуют о том, что вариации наблюдаемого тока сальтации определяются не только низкочастотной конвективно обусловленной изменчивостью скорости ветра, но и турбулентными пульсациями V (короткие интенсивные всплески ЭТС). В августе–сентябре 2021 г. были проведены измерения электрических токов сальтации на ОТ в Астраханской обл.

Выполнен статистический анализ осредненных вариаций (время осреднения 1 мин) плотности ЭТС в нижнем слое сальтации, толщина которого составляет около 9 см [17, 18], на высоте 4 см и в верхнем слое сальтации на высоте 12 см по данным измерений на опустыненной территории в Астраханской обл. вблизи р. Волги 31.08.2021. На рис. 2а представлены результаты измерений плотности ЭТС j_1^s на высоте 4 см (кривая *1*) и плотности ЭТС на высоте 12 см (кривая *2*) 31.08.2021 в период с 11:00 до 15:00, а на рис. 2б соответствующие результаты измерений (время осреднения 1 мин) ГКСВ на высоте 3 м (кривая *1*). Нетрудно видеть, что измерения проводились в условиях квазинепрерывной сальтации. Поскольку в процессе измерений наблюдался заметный тренд скорости ветра, указанный период был разделён на три интервала: от 11:00 до 12:00 (I), от 12:20 до 13:40 (II) и от 13:40 до 15:00 (III). Рассчитаны статистические характеристики вариаций j_s (нА/м^2) и скорости ветра V (м/с), включая средние значения и стандартные отклонения, а также значение асимметрии и эксцесса. Эмпирические функции распределения (ЭФР)

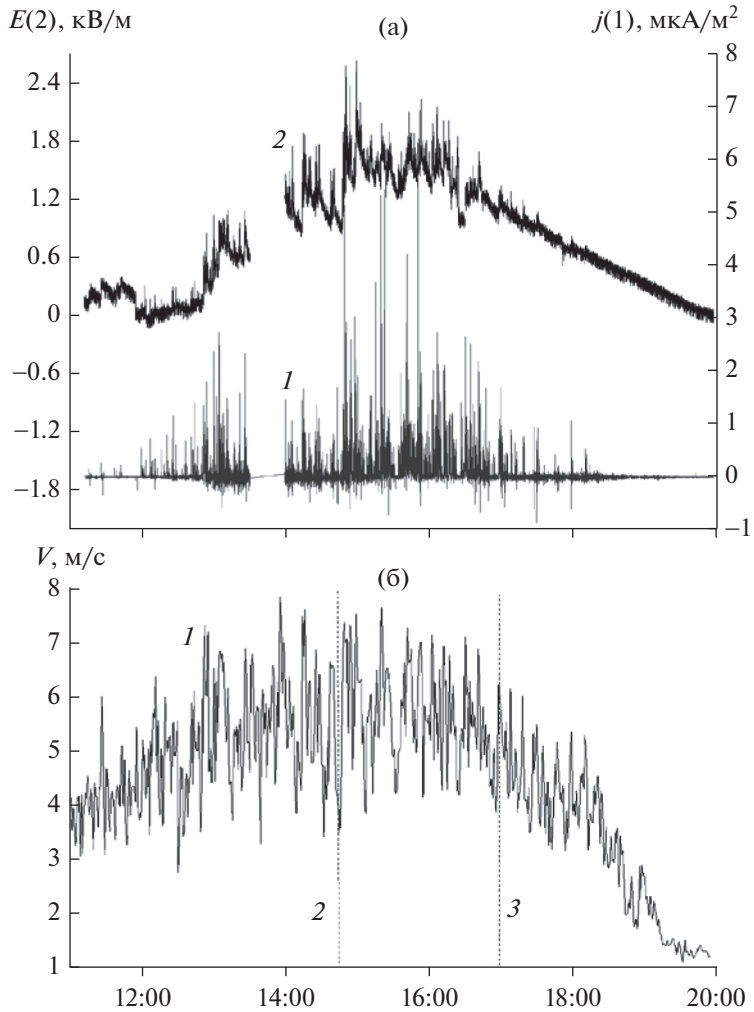

Рис. 1. Дневной ход плотности электрического тока сальтации на высоте 2.0 см (*1*), напряженности электрического поля на высоте 2.5 см (*2*) по данным измерений с временным разрешением 1 с (а) и горизонтальная компонента скорости ветра (*1*) в приземном слое атмосферы на высоте 2 м (б) с осреднением 1 мин на опустыненной территории в Астраханской обл. 15.08.2009 (*2* и *3* – выделение периода интенсивной всплесковой сальтации).

j_s на высотах 4 и 12 см для периода измерений 31.08.2021 с 11:00 до 15:00 представлены на рис. 3а и 3б.

Видно, что плотность ЭТС на высоте 4 см в рассматриваемом случае оказалась знакопостоянной, а на высоте 12 см знакопеременной с незначительным преобладанием в среднем положительного тока. Следует отметить, что на интенсивность сальтации и плотности ЭТС влияет не скорость ветра V, а разность $V–V_0$ [15, 17, 18, 29], где V_0 – пороговая скорость сальтации, которая в данном случае примерно равна 5.0 м/с.

3. УДЕЛЬНЫЙ ЗАРЯД САЛЬТИРУЮЩИХ ЧАСТИЦ

Для оценки влияния электризации ВПП на динамику сальтации необходимо изучить вариации удельного заряда сальтирующих частиц. В июле 2014 г. по данным измерений ЭТС на ОТ в Калмыкии были определены значения среднего удельного заряда в нижнем слое сальтации на высоте 5 см в условиях всплесковой сальтации [27]. В, частности, для режима неотрицательных токов сальтации 27.07.2014 показано, что УЗ менялся примерно от +10 до +150 мкКл/кг (среднее значение +48.5 мкКл/кг). Эмпирическая функция распределения УЗ для условий всплесковой сальтации показана на рис. 4а.

Вариации УЗ в условиях квазинепрерывной сальтации проанализированы по данным измерений на ОТ Астраханской обл. в августе 2011 г. Согласно данным измерений 23.08.2011 УЗ менялся от +20 мкКл/кг до +80 мкКл/кг [25] (среднее значение +42.3 мкКл/кг). ЭФР удельного заряда для рассматриваемого случая показана на рис. 4б. В

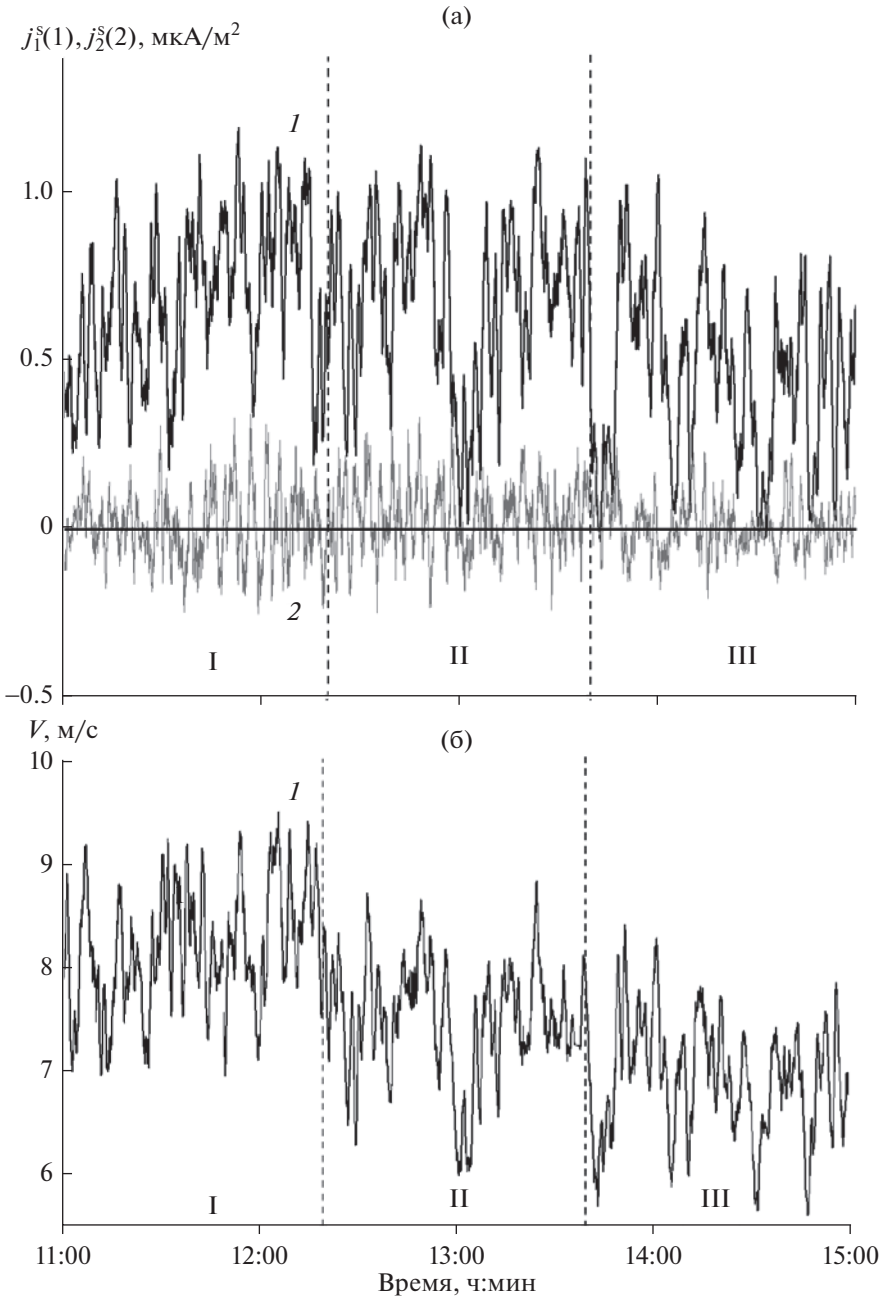

Рис. 2. Временная изменчивость плотности электрических токов сальтации на высоте 4 (*1*) и 12 см (*2*) (а) и горизонтальная компонента скорости ветра в приземном слое атмосферы на высоте 2 м (б) на опустыненной территории в Астраханской обл. 31.08.2021 (временное осреднение 1 мин).

этот день ЭТС измерялись на четырех высотах (3.0, 5.0, 22 и 42 см) и токи сальтации оказались знакопеременными. Доля УЗ положительных токов на высотах 5 см в среднем составляла 0.81, а в верхнем слое сальтации (22-42 см) она снижалась до 0.75. В общем случае при оценке УЗ кроме γ необходимо использовать дополнительные параметры, как, например, модуль УЗ и УЗ для периодов положительного тока сальтации [28].

Отметим также, что 23.08.2011 на опустыненной терриории наблюдалось уменьшение массовой концентрации сальтирующих частиц в слое от 22 до 42 см больше чем на порядок [28] при сравнительно небольшом уменьшении суммарного электрического заряда частиц. Отсюда следует, что на высотах от 22 до 42 см происходит уменьшение среднего размера сальтирующих частиц, что обусловлено увеличением доли алеври-

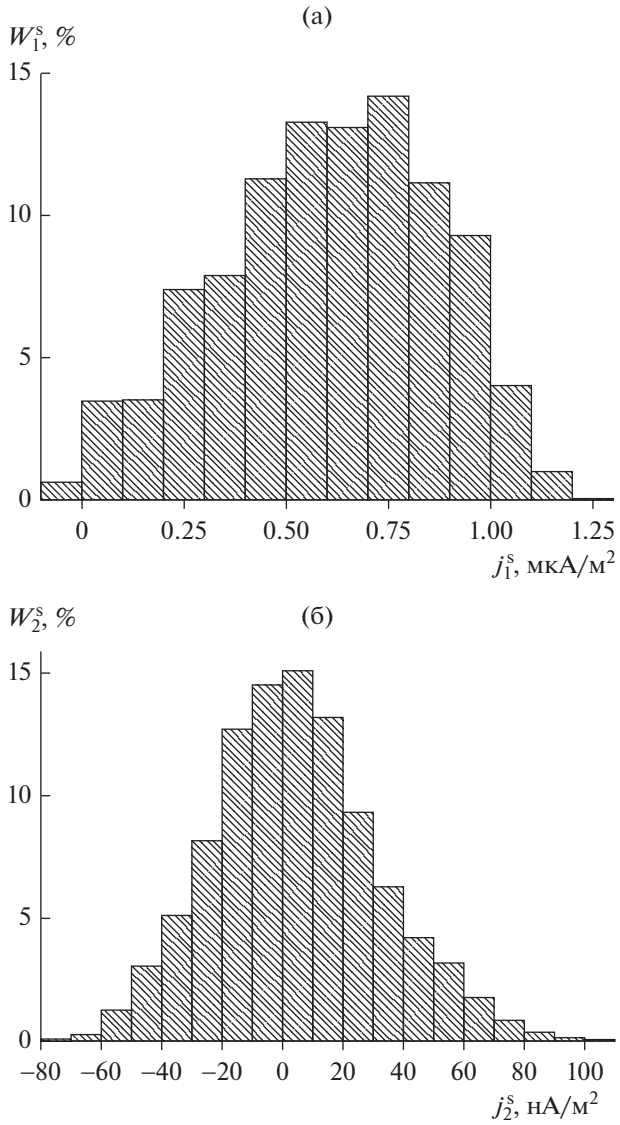

Рис. 3. Эмпирические функции распределения плотности электрического тока сальтации на высотах 4 (а) и 12 см (б).

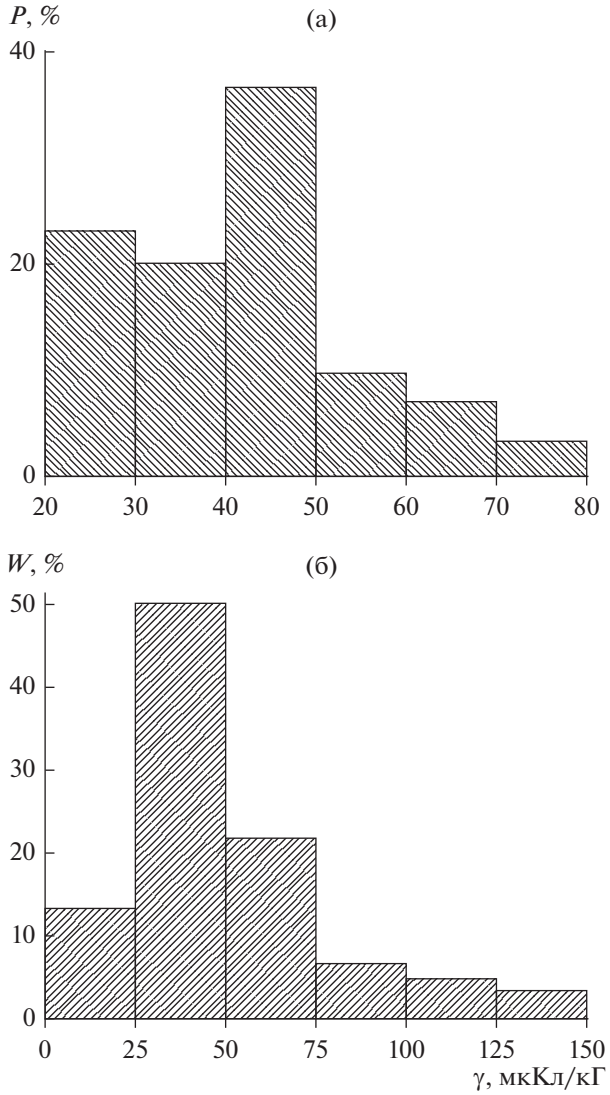

Рис. 4. Эмпирические функции распределения удельного заряда на высоте 5 см в условиях квазинепрерывной сальтации по данным измерений 23.08.2011 на опустыненной территории в Астраханской обл. (а) и в условиях всплесковой сальтации по данным измерений 27.07.2014 на опустыненной территории в Калмыкии (б).

товых частиц [13] в этом слое ветропесчаного потока [6].

4. НАПРЯЖЕННОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ПРИПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ

На заряженную частицу действует электрическая сила $\vec{F}_p = q\vec{E}$, где q – заряд частицы и $\vec{E}$ – вектор напряженности электрического поля. В большинстве работ предполагается, что отличается от нуля только вертикальная компонента поля E_z. Как отмечено выше, рекордно высокое значение напряженности электрического поля (167 кВ/м) было зарегистрировано в [23]. В [30] наблюдались большие значения (порядка 100 кВ/м) горизонтальной и вертикальной компоненты электрического поля, что может быть обусловлено перемещением вблизи пункта наблюдения заряженных вихревых структур, например, пылевых смерчей (dust devils [31]).

Следует отметить, что при наблюдавшихся в [23] максимальной напряженности электрического поля 167 кВ/м, среднем удельным заряд +60 мкКл/кг и среднем значением размера сальтирующих частиц 150 мкм действующая на частицу электрическая сила компенсирует силу тяжести, что приводит к значительному удлинению траектории сальтирующей частицы.

На опустыненных территориях в Калмыкии и Астраханской обл. при проведении нами полевых экспериментов напряженность электрического поля в ВПП, как правило, не превышала 3 кВ/м.

На рис. 1а представлен пример дневного хода напряжённости электрического поля E (кривая *2*) в ветропесчаном потоке на ОТ в Астраханской области 15.08.2009. Напряженность поля E определялись на высоте 2.5 см с помощью "Измерителя напряжённости электрического поля ЭСПИ-301А" (ООО МПО "Омега Инженеринг" г. Москва) с временным разрешением 1 с. В наблюдаемую на высоте 2.5 см напряженность поля вносят вклад сальтирующие в слое от 0 до 2.5 см заряженные частицы, о чем свидетельствует синхронные "высокочастотные" вариации напряжённости поля и электрического тока сальтации (кривая *1* на рис. 1а). Следует отметить, что напряженность электрического поля в ВПП не падает до ноля при отсутствии ЭТС в периоды между всплесками сальтации. Медленно меняющаяся в течение дня компонента E обусловлена эволюцией плотности поверхности заряда σ, которая 25.08.2009 достигала +25 нКл/м^2 [29].

Результаты синхронных измерений НЭП, ЭТС и скорости ветра в приземном слое атмосферы свидетельствует о том, что наблюдаемые "высокочастотные" вариации напряженности электрического поля в ВПП обусловлены турбулентными пульсациями с периодами от 1 с примерно до 1 мин и конвективно обусловленными вариациями с периодами от 1 до 30 мин горизонтальной компоненты скорости ветра. Отметим, что четкой границы между турбулентными и конвективно обусловленными вариациями V в приземном слое атмосферы нет.

5. ЛОКАЛЬНАЯ НАПРЯЖЁННОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ВЕТРОПЕСЧАНОМ ПОТОКЕ

Электрическое поле в ВПП неоднородно. В частности, должны иметь место неоднородности НЭП, обусловленные неоднородностью распределения зарядов на подстилающей поверхности, в том числе, зарядами отдельных песчаных частиц.

Из представленных в [23] данных следует что сальтирующая частица с средним размером 150 мкм при удельном заряде +60 мкКл/кг несет электрический заряд равный примерно +280 фКл. Оказалось, что в приближении идеальной сферической частицы напряженность электрического поля на ее поверхности

$$E_p = \frac{q_p}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r_p^2}, \qquad (1)$$

примерно равна 450 кВ/м. В (1) $(4\pi\varepsilon_0)^{-1} = 9 \times \times 10^9$ Н М^2/Кл^2, q_p и r_p – заряд и радиус частицы, ε – диэлектрическая проницаемость воздуха, которая близка к единице.

Реальные песчаные частицы на опустыненных территориях заметно отличаются от сферических. Допустим, что минимальный радиус кривизны для несферической частицы равен 30 мкм. В этом случае максимальная напряженность электрического поля на поверхности частицы будет близка к напряженности электрического пробоя в сухом воздухе [32].

6. ПЕРЕНОС ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗАРЯДОВ ЧАСТИЦАМИ ПЫЛЕВОГО АЭРОЗОЛЯ

Опустыненные территории являются источником пылевого минерального аэрозоля, который генерируется на ПП под воздействием ВПП (процесс sandblasting [33]). Нами выполнены прямые измерения вертикальных турбулентных потоков пылевого аэрозоля с опустыненных территорий [34, 35]. Получены оценки скорости выноса пылевого аэрозоля с подстилающей поверхности.

Значительный интерес представляет электризация частиц пылевого аэрозоля в ветропесчаном потоке [29]. При электризации ПА на ОТ в приповерхностном и приземном слоях атмосферы появляются соответствующие объемные заряды Q_a. Благодаря ветровому переносу заряженных частиц пылевого аэрозоля возникает квазигоризонтальный электрический ток (ЭТПА), плотность которого $j_a(z) = Q_a(z)V(z)$, где V – скорость ветра и z – высота.

Измерения ЭТПА были впервые выполнены нами ОТ в Калмыкии 30.07.2014 на высотах 5, 12 и 30 см и затем на ОТ в Астраханской обл. в период с 12.08 по 26.08.2015 в течение 5 дней на высотах 4 и 32 см и в период с 5.08 по 28.08.2016 течение 6 дней на высотах 5 и 32 см. Измерения проводились с использованием модифицированных проточных ловушек Фарадея с большей эффективной площадью поверхности приемного электрода, на котором осаждаются частицы ПА.

В августе–сентябре 2021г на ОТ в Астраханской обл. были выполнены измерения ЭТПА на высотах 4 и 12 см синхронно с измерениями ЭТС на указанных высотах. На рис. 5 представлены результаты измерений ЭТПА 31.08.2021 на высотах 4 см (рис. 5а) и 12 см (рис. 5б). Рассчитаны статистические характеристики осредненных значений (время осреднения 1 мин). На рис. 6 показаны эмпирические функции распределения плотности электрических токов обусловленных ветровым переносом частиц ПА на высотах 4 см рис. 6а и 12 см рис 6б. ЭТС как в нижнем, так и в верхнем слое сальтации оказались знакопеременными с преобладанием положительных токов. Зависимость от высоты для ЭТПА значительно слабее, чем для ЭТС. Как и следовало ожидать в

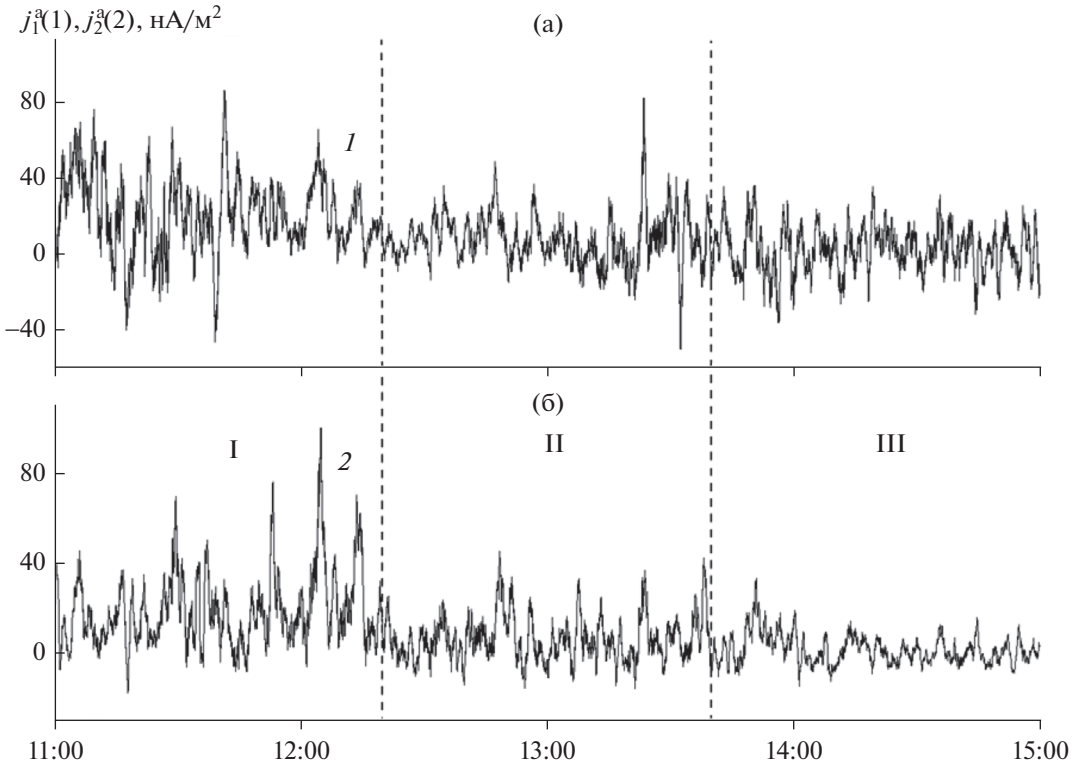

Рис. 5. Временная изменчивость плотности электрических токов, обусловленных ветровым переносом заряженных частиц пылевого аэрозоля, по данным измерений 31.08.2021 на высотах 4 (а) и 12 см (б). Время осреднения 1 мин.

приповерхностном слое атмосферы (в слое сальтации) ЭТС слабее ЭТПА.

В [29] показано, что низкочастотные вариации объемного заряда ПА и, соответственно, ЭТПА коррелирует с конвективно обусловленными вариациями ЭТС. Однако в целом следует иметь в виду, что на ЭТС и ЭТПА действуют и другие факторы. В частности, на формирование вертикального распределения ЭТПА, в-первую очередь влияет турбулентная диффузия.

7. ЭЛЕКТРИЗАЦИЯ ВЕТРОПЕСЧАНОГО ПОТОКА

Как показали экспериментальные исследования, ветропесчаный поток отличается аномально высокой электризацией. Во-первых, во всех 14 экспедициях на ОТ в Астраханской обл. и Калмыкии в период 2005—2021 гг. регистрировались большие значения электрических токов сальтации. При этом по порядку величины, наблюдаемые средние удельные заряды сальтирующих частиц оказались сопоставимыми с удельным зарядам частиц, измеренным в [23]. Во-вторых, в экстремальных случаях [23, 30], напряженность электрического поля в ветропесчаном потоке может достигать 100 кВ/м и даже больших значений, что радикально влияет на параметры сальтации, включая высоту и дальность полета сальтирующих частиц [36, 37]. В-третьих, локальная напряженность электрического поля на поверхности сальтирующих частиц может достигать значений порядка сотен кВ/м и даже критических для электрического пробоя в атмосфере значений. В-четвертых, генерируемые на подстилающей поверхности под воздействием ветропесчаного потока частицы пылевого аэрозоля также оказались заряженными, что может влиять на вертикальный перенос пылевого аэрозоля в приповерхностном и приземном слоях атмосферы. В данной работе показано, что заряжены не только частицы, но и подстилающая поверхность.

Естественно предположить, что существует единый механизм электризации всех компонент ветропесчаного потока. Представляет также интерес электризация аэрозоля в аридных регионах в отсутствие сальтации [38, 39].

8. ВЕТРОПЕСЧАНЫЙ ПОТОК КАК ПЫЛЕВАЯ ПЛАЗМА

“Универсальным” механизмом электризации ВПП являются электрические разряды на подстилающей поверхности. В газовых разрядах могут существовать достаточно устойчивые дисперсные структуры, состоящие из заряженных частиц. Эти структуры в совокупности с газовой плазмой элек-

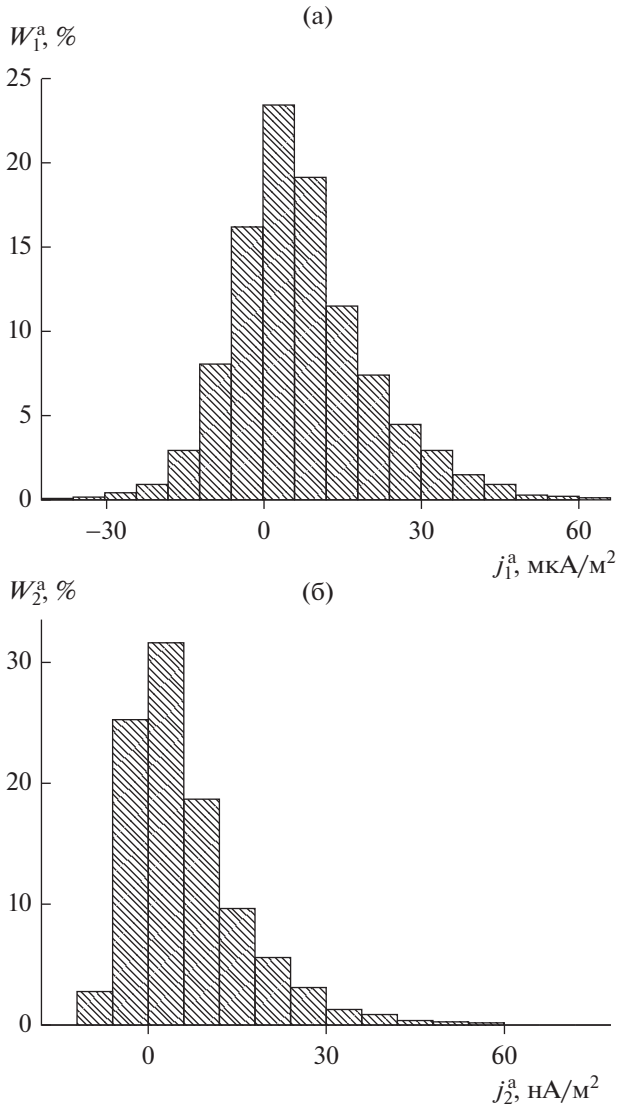

Рис. 6. Эмпирические функции распределения плотности аэрозольного тока на высотах 4 (а) и 12 см (б).

трического разряда называют пылевой плазмой [40, 41]. Как известно, пылевые (пыльные) и песчаные бури являются источниками радиоизлучения [42].

В атмосферном воздухе возможны коронный и искровой разряды. Отметим, что при коронном разряде возникает плазма, состоящая из электронов и легких ионов [42].

9. КОРОННЫЙ РАЗРЯД В АТМОСФЕРЕ И В ВЕТРОПЕСЧАНОМ ПОТОКЕ

При напряженности электрического поля больше примерно 30 кВ/м [43] возникают коронные разряды (положительная или отрицательная корона) на предметах с малым радиусом кривизны [42, 44]. Известно, что “тихие разряды” на подстилающей поверхности являются важной составной частью глобальной электрической цепи и вносят значительный вклад в глобальный электрический ток [45]. Коронные разряды играют существенную роль в электризация облаков [46].

Для возникновения коронного разряда необходим источник высокого напряжения. В случае ветропесчаного потока таким источником является большой заряд на сальтирующей частице, что обеспечивает высокое напряжение на ее поверхности. Важное значение имеет геометрия коронирования, которая обеспечивает усиление напряженности электрического поля (с коэффициентом до 10^4 [42]). В случае ветропесчаного потока достаточно усиления напряженности электрического поля в несколько раз, что может быть достигнуто при столкновении заряженной сальтирующей частицы с другой (несферической) частицей с достаточно малым минимальным радиусом кривизны поверхности.

10. ИНИЦИИРОВАНИЕ САЛЬТАЦИИ ПРИ КОРОННОМ РАЗРЯДЕ

Сальтация возникает при взаимодействии воздушного потока на ПП, когда скорость ветра превышает так называемую пороговую скорость сальтации и крупные частицы с размером больше 50–60 мкм отрываются от ПП (аэродинамическое инициирование сальтации [4–7]). Ускоренные ветром крупные частицы либо отскакивают от ПП (rebounding), либо выбивают с ПП новые сальтирующие частицы (splashing), либо остаются на ПП [4, 7]. При неизменной скорости ветра, что легко осуществить в ветровых каналах, наблюдается режим квазистационарной сальтации. Однако процессы гидродинамического инициирования, отскока от ПП и выбивания новых сальтирующих частиц с ПП не могут объяснить наличие в ВПП высокоскоростных сальтирующих частиц (скорость вылета с ПП порядка 1 м/с) [22].

В [42] показано, что слаботочные коронные разряды в лабораторных условиях представляют собой последовательность импульсных разрядов. Отдельные импульсы коронных разрядов в ВПП могут инициировать вылет сальтирующих частиц с ПП. В.В. Смирнов установил [42], что при коронном разряде выделяется электрический заряд порядка десятков пикокулон.

Предположим, что при столкновении упомянутый выше песчинки с размером 150 мкм и зарядом $q_p = +280$ фКл с находящимися на ПП частицами алевритовой и песчаной фракций или частицами минеральной пыли может произойти перераспределение зарядов между частицами, которое приведет к локальному повышению напряженности электрического поля и последующему пробою и к высвобождению электрическо-

го заряда $q_c = +20$ пКл. Поэтому на указанную частицу будет действовать электрическая сила

$$F_p = q_p q_c / 4\pi\varepsilon\varepsilon_0 z^2, \quad (2)$$

где z – расстояние между центрами зарядов. Рассмотрим случай, когда разгоняемая электрическим полем заряженная песчинка вылетает вертикально вверх.

Без учета упругой силы, возникающий при соударении частицы с ПП, уравнение движения песчинки имеет вид

$$d^2z/dt^2 = bz^{-2}, \quad (3)$$

где $b = \gamma q_c / 4\pi\varepsilon_0$, которое представляет собой "уравнение свободного падения" [47]. В рассматриваемом случае $b = 10.8 \times 10^{-6}$ м^3/с^2. Уравнение (3) имеет решение [47]

$$z\left(\frac{dz}{dt}\right)^2 + 2b = Cz, \quad (4)$$

где C – константа.

Предположим, что начальное расстояние между центрами зарядов $z_0 = 0.1d_p = 15$ мкм.

С учетом начальных условий получаем

$$\left(\frac{dz}{dt}\right)^2 = \frac{2b}{z_0}\left(1 - \frac{z_0}{z}\right). \quad (5)$$

Асимптотическая скорость ($z \gg z_0$) сальтирующие песчинки

$$w_{as} = \sqrt{2b/z_0} = 1.2 \text{ м/с}, \quad (6)$$

поскольку $w(z) = w_{as}\sqrt{\frac{1 - z_0}{z}}$. Скорость песчинки достигает 0.95 w_{as}, когда она смещается на величину размера частицы 150 мкм.

Таким образом, электрические разряды на ПП могут инициировать сальтацию высокоскоростных частиц в ВПП.

Отметим, что при этом характеристики электрических разрядов не зависят от динамической скорости [19], что позволяет объяснить установленную ранее в эксперименте особенность процесса сальтации [20, 21].

Параметры задачи q_p, q_c, d_p и z_0 могут меняться в сравнительных широких пределах, что может привести к большому разбросу скорости вылета сальтирующих частиц с ПП.

При разрядах на ПП возможна фрагментация алевритовых и песчаных частиц и генерация заряженных частиц ПА.

Электрические разряды на ПП не объясняют все процессы электризации ВПП и, в частности, начальный этап накопления зарядов на частицах. На начальном этапе электризации ВПП существенную роль может играть трибоэлектричество и туннельный эффект передачи заряда [48].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы заключаются в следующем:

Выполнено экспериментальное исследование электризации ветропесчаного потока на опустыненных территориях. Приведены результаты синхронных измерений электрических токов сальтации и электрических токов, обусловленных переносом заряженных частиц пылевого аэрозоля в нижнем (на высоте 4 см) и верхнем (на высоте 12 см) слоях сальтации. Получены эмпирические функции распределения удельного заряда сальтирующих частиц для условий квазинепрерывной и всплесковой сальтации.

Определена поверхностная плотность электрических зарядов на подстилающей поверхности.

Установлено, что локальная напряженность электрического поля на поверхности сальтирующих частиц в ветропесчаном потоке может достигать 450 кВ/м и больше.

Предложен механизм инициирования сальтации и электризации ветропесчаного потока коронными разрядами на подстилающей поверхности.

Разработана аналитическая модель вылета заряженных сальтирующих частиц с подстилающей поверхности.

Показано, что при инициировании вылета частиц с подстилающей поверхности коронными разрядами начальная скорость сальтирующих частиц может превышать 1 м/с.

Авторы благодарят Г.С. Голицына за полезные советы и О.Г. Чхетиани за обсуждение результатов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 20-17-00214).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IPCC. Special Report "Global Warming of 1.5°C. 2018.
2. *Золотокрылин А.Н.* Климатическое опустынивание. М.: Наука, 2003. 247 с.
3. *Bagnold R.A.* The Physics of Blown Sand and Desert Dunes. London: Methuen, 1941. 265 p.
4. *Shao Y.* Physics and Modeling of Wind Erosion. N.Y.: Springer, 2000. 393 p.
5. *Zheng X.Y.* Mechanics of windblown sand movements. Berlin: Springer-Verburg, 2009. 290 p.
6. *Семенов О.Е.* Введение в экспериментальную метеорологию и климатологию песчаных бурь. Алматы: КазНИИЭК, 2011. 580 с.
7. *Kok J.F., Parteli E.J.R., Michaels T.I., Karam D.B.* The physics of wind-blown sand and dust // Rep. Prog. Phys. 2012. V. 75. 106901. P. 1–119.

8. *Mahowald N., Albani S., Kok J.F., Engelstaeder S., Scanza R., Ward D.S., Flanner M.G.* The size distribution of desert dust aerosols and its impact on the Earth system // Aeolian Research. 2014. V. 15. P. 53–71.

9. *Miller R., Tegen I., Perlwitz J.* Surface radiative forcing by soil dust aerosol and the hydrologic cycle // J. Geophys. Res. 2004. V. 109. DO4203.

10. *Mather B.A., Prospero J.M., Mackie D., Gaiero D., Hesse P.P., Balkanski Y.* Global connections between aeolian dust, climate and ocean biogeochemistry at the present day and at the last glacial maximum // Earth Sci. Rev. 2010. V. 99. P. 61–97.

11. *Brunekreef B., Holgate S.T.* Air Pollution and Health // Lancet. 2002. V. 360. P. 1233–1242.

12. *Бютнер Э.К.* Динамика приповерхностного слоя воздуха Л.: Гидрометеоиздат, 1978. 158 с.

13. *Горчаков Г.И., Бунтов Д.В., Карпов А.В., Копейкин В.М., Мирсаитов С.Ф., Гущин Р.А., Даценко О.И.* Алевритовая фракция сальтирующих частиц в ветропесчаном потоке на опустыненной территории // Доклады РАН. Науки о Земле. 2019. Т. 488. № 2. С. 193–196.

14. *Pettijohn F.G.* Sedimentary Rocs. New York: Harper, 1957. 526 p.

15. *Горчаков Г.И., Бунтов Д.В., Карпов А.В., Копейкин В.М., Мирсаитов С.Ф., Гущин Р.А., Даценко О.И.* Влияние ветра на распределение сальтирующих частиц по размерам // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 10. С. 848–855.

16. *Karpov A.V., Gorchakov G.I., Gushchin R.A., Datsenko O.I.* Aleurite particle saltation modeling // Proc. SPIE 11208. 2020. 112084Y.

17. *Горчаков Г.И., Карпов А.В., Гущин Р.А., Даценко О.И., Бунтов Д.В.* Вертикальные профили концентраций сальтирующих частиц на опустыненной территории // Доклады РАН. Науки о Земле. 2021, Т. 496. № 2. С. 211–214.

18. *Горчаков Г.И., Карпов А.В., Гущин Р.А., Даценко О.И., Бунтов Д.В.* Вертикальное распределение алевритовых и песчаных частиц в ветропесчаном потоке над опустыненной территорией // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 5. С. 555–564.

19. *Обухов А.М.* Турбулентность и динамика атмосферы // Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 414 с.

20. *Namikas S.L.* Field measurement and numerical modelling of aeolian mass flux distributions on a sandy beach // Sedimentology. 2003. V. 50. P. 303–326.

21. *Rasmussen K.R., Sorensen M.* Vertical variation of particle speed and flux in aeolian saltation: Measurement and modeling // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. FO2S12.

22. *Ho T.D., Dupont P., Moctar A.O.E., Valance A.* Particle velocity distribution in saltation transport // Physical Review E. 2012. V. 85. № 5. 052301.

23. *Schmidt D.S., Schmidt R.A., Dent Y.D.* Electrostatic force on saltating sand // J.Geophys.Res. 1998. V. 103. № D8. P. 8997–9001.

24. *Анисимов С.В., Мареев Е.А., Шихова Н.М., Дмитриев Э.М.* Механизмы формирования пульсаций электрического поля приземной атмосферы // Изв. Вузов. Радиофизика. 2001. Т. 44. № 7. С. 8–18.

25. *Донченко В.А., Кабанов М.В., Кауль Б.В., Нагорский П.М., Самохвалов И.В.* Электрооптические явления в атмосфере // Томск: НТЛ, 2015. 314 с.

26. *Горчаков Г.И., Ермаков В.И., Копейкин В.М., Исаков А.А., Карпов А.В., Ульяненко А.В.* Электрические токи сальтации в ветропесчаном потоке // Доклады АН. 2006. Т. 410. № 2. С. 259–262.

27. *Горчаков Г.И., Копейкин В.М., Карпов А.В., Титов А.А., Бунтов Д.В., Кузнецов Г.А., Гущин Р.А., Даценко О.И., Курбатов Г.А., Серегин А.О., Соколов А.В.* Вариации удельного заряда сальтирующих песчинок в ветропесчаном потоке на опустыненной территории // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 1. С. 31–39.

28. *Горчаков Г.И., Копейкин В.М., Карпов А.В., Бунтов Д.В., Соколов А.В.* Удельный заряд сальтирующих песчинок на опустыненных территориях // Доклады АН. 2014. Т. 456. № 4. С. 476–480.

29. *Gorchakov G.I., Karpov A.V., Kopeikin V.M., Buntov D.V., Gushchin R.A., Datsenko O.I.* Dust aerosol emission on the desertified area // Proc. SPIE 11560, 26th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics, 2020. 1156076.

30. *Bo T.L., Zheng X.J.* A field observational study of electrification within a dust storm in Minqin, China // Aeolian Research. 2013. V. 8. P. 39–47.

31. *Sinclair P.C.* General characteristics of dust devils // Journal of Applied Meteorology and Climatology. 1969. V. 8. № 1. P. 32–45.

32. *Саранин В.А.* Напряженность электрического поля заряженных проводящих шаров и пробой воздушного промежутка между ними // Успехи физических наук. 2002. Т. 172. № 12. С. 1449–1454.

33. *Alfaro S.C., Gaudichet A., Gomes L., Maille M.* Modeling the size distribution of a soil aerosol produced by sandblasting // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. P. 11 239–11 249.

34. *Горчаков Г.И., Карпов А.В., Гущин Р.А.* Турбулентные потоки пылевого аэрозоля на опустыненной территории // Доклады РАН. Науки о земле, 2020, Т. 494. № 2. С. 53–57.

35. *Карпов А.В., Горчаков Г.И., Гущин Р.А., Даценко О.И.* Вертикальные турбулентные потоки пылевого аэрозоля // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 5. С. 565–574.

36. *Kok J.F., Renno N.O.* Electrostatics in wind-blown sand // Phys. Rev. Lett. 2008. V. 100. № 1. 01450L.

37. *Горчаков Г.И., Карпов А.В., Копейкин В.М., Соколов А.В., Бунтов Д.В.* Влияние силы Сэфмана, подъёмной силы и электрической силы на перенос частиц в ветропесчаном потоке // Доклады АН. 2016. Т. 467. № 3. С. 336–341.

38. *Esposito F. Molinaro R., Popa C.I., Molfese C., Cozzolino F., Marty L., Taj-Eddine K., Di Achille G., Franzese G., Silvestro S., Ori G.G.* The role of the atmospheric electric field in the dust-lifting process // Geophysical Research Letters. 2016. V. 43. № 10. P. 5501–5508.

39. *Малиновская Е.А., Чхетиани О.Г. Панчишкина И.Н. Петрова Г.Г., Петров А.Н.* О связи приземного электрического поля и аридного аэрозоля при

различных ветровых условиях // Доклады РАН. Науки о земле. 2022. Т. 502. № 2. С. 69–78.

40. *Фортов В.Е., Храпак А.Г., Храпак С.А., Молотков В.И., Петров О.Ф.* Пылевая плазма // Успехи физических наук. 2004. Т. 174. № 5. С. 495–544.
41. *Фортов В.Е., Храпак А.Г., Якубов И.Т.* Физика неидеальной плазмы. М.: Физматиз, 2010, 528 с.
42. *Смирнов В.В.* Ионизация в тропосфере СПб: Гидрометеоиздат, 1992. 312 с.
43. *Сивухин Д.В.* Электричество: Общий курс физики. М.: Наука: ФМЛ, 1983. 687.
44. *Стишков Ю.К., Самусенко А.В., Ашихмин И.А.* Коронный разряд и электрогазодинамические течения в воздухе // Успехи физических наук. 2018. Т. 188. №. 12. С. 1331–1345.
45. *Кашлева Л.В.* Атмосферное электричество // СПб: РГГУ, 2008. 116 с.
46. *Синькевич А.А., Довгалюк Ю.А.* Коронный разряд в облаках // Изв. вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56. № 11–12. С. 908–919.
47. *Камке Э.* Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. М.: Физматиз. 1961. 703 с.
48. *Kok J.F., Lacks D.J.* Electrification of granular systems of identical insulators // Physical Review E. 2009. V. 79. № 5. 051304.

Dusty Plasma of Windsand Flux on Desertified Areas

G. I. Gorchakov[1, *], V. M. Kopeikin[1], A. V. Karpov[1], R. A. Gushchin[1], O. I. Datsenko[1], and D. V. Buntov[1]

[1]*Institute of Atmospheric Physics A.M. Obukhov RAS, Pyzhyovskiy pereulok, 3, Moscow, 119017 Russia*

**e-mail: gengor@ifaran.ru*

Electric currents of the saltation and electric currents of the dust aerosol transport measurements have been carried out in the lower and the upper layers of the saltation on the desertified areas in Astrakhan oblast and Kalmykia: Statistical characteristic of the electic currents variations were calculated. Empirical function distributions of the specific charge for the saltating particle in the windsand flux are presented for the conditions of the almost non-intermittent and intermitted saltation. It is established that the electric charge surface density reaches +25 nC/m^2. It is shown that local electrical field on the saltating particle surface can exceed 450 kV/m. Abnormal high electrization of the windsand flux, including high-energy saltation initiation: electric corona discharged on the underlying surface has been suggested, that the windsand flux can be treated as dusty plasma. Analytical model of the saltating particle lift-off from the underlying surface by corona discharge has been worked out. It is shown that the saltating particle launch velocity can exceed 1 m/s.

Keywords: desertification, windsand flux, electrization, electric currently of saltation, electric current of the dust aerosol transport, electric charge density, local electrical field, specific charge, corona discharge, dusty plasma of windsand flux, electric saltation initiation, saltating particle launch velocity