ДОКЛАДЫ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. НАУКИ О ЗЕМЛЕ, 2022, том 502, № 2, с. 115–124

ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ

УДК 537.572; 551.594; 551.435.7; 532.5; 551.510; 551.510.522

О СВЯЗИ ПРИЗЕМНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ И АРИДНОГО АЭРОЗОЛЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВЕТРОВЫХ УСЛОВИЯХ

© 2022 г.
Е. А. Малиновская[1,*], О. Г. Чхетиани[1], И. Н. Панчишкина[2], Г. Г. Петрова[2], А. И. Петров[2]

Представлено академиком РАН Г.С. Голицыным 15.07.2021 г.
Поступило 15.07.2021 г.
После доработки 24.09.2021 г.
Принято к публикации 21.10.2021 г.

По данным полевых измерений, выполненных на опустыненной территории в Калмыкии в 2020 г., исследуются связи концентрации аридного аэрозоля размерами 0.2–0.4 мкм и напряженности электрического поля. Показано, что усиление и ослабление напряженности электрического поля связаны с изменением скорости и направления ветра по отношению к основному направлению дюнных гряд. При околопороговых значениях скорости ветра и направлениях ветра, близких к касательному, происходит увеличение напряженности электрического поля. Аналитическая оценка относительного изменения напряженности электрического поля показывает квадратичную зависимость от числа генерируемых микрочастиц. В момент накопления на сальтирующей частице критического заряда появляются свободные микрочастицы, выталкиваемые электрическим полем вверх из слоя сальтации. При небольших подскоках частиц, как при касательном направлении или при околопороговой скорости ветра, зарядка частиц происходит интенсивнее. При направлениях ветра, составляющих примерно 22–45° с линией стыка наветренного и подветренного склонов проявляется влияние эоловой ряби на перемещение и высоту подскоков сальтирующих частиц, как относительное уменьшение электрического поля при одновременном увеличении числа микрочастиц.

Ключевые слова: ветровой перенос пыли, атмосферное электричество, эоловые структуры

DOI: 10.31857/S2686739722020104

Движущиеся в сальтационном потоке частицы накапливают заряд, противоположный электростатическому заряду неподвижных частиц на поверхности [1]. Такая электризация создает силы, дополнительные к силам тяжести и аэродинамического сопротивления, определяющих траектории частиц, переносимых при сальтации. На сальтирующих частицах в результате туннельного перехода [2] в момент касания с поверхностью набирается отрицательный заряд, поверхность оказывается положительно заряженной [3, 4]. Максимум величины напряженности электрического поля отмечается на высоте около 1 см и выше, несколько меньшие значения до высоты 20 см над поверхностью земли. При появлении потока сальтирующих частиц поле резко возрастает, достигает максимума и далее медленно убывает [5]. В [5] полагают, что наличие электрического поля влияет на профиль скорости ветра до высот 1 м над поверхностью, уменьшая соответственно величину динамической скорости трения. Величина электрического поля связывается с величиной критической скорости ветра [6], а ее увеличение в [7] с нелинейным пороговым эффектом, определяемым скоростью ветра около 5 м/с. Конвективные потоки усиливаются электрическим полем на 30% [5]. В частности, отмечается линейная связь напряженности электрического поля с концентрациями пылевых микрочастиц [8]. Электрическое поле вблизи земной поверхности при росте общей концентрации аэрозольных частиц с диаметром >0.1 мкм, как в развитом сальтационном потоке, уменьшается [5, 9]. При наличии

[1] *Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук, Москва, Россия*
[2] *Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия*
**E-mail: elen_am@inbox.ru*

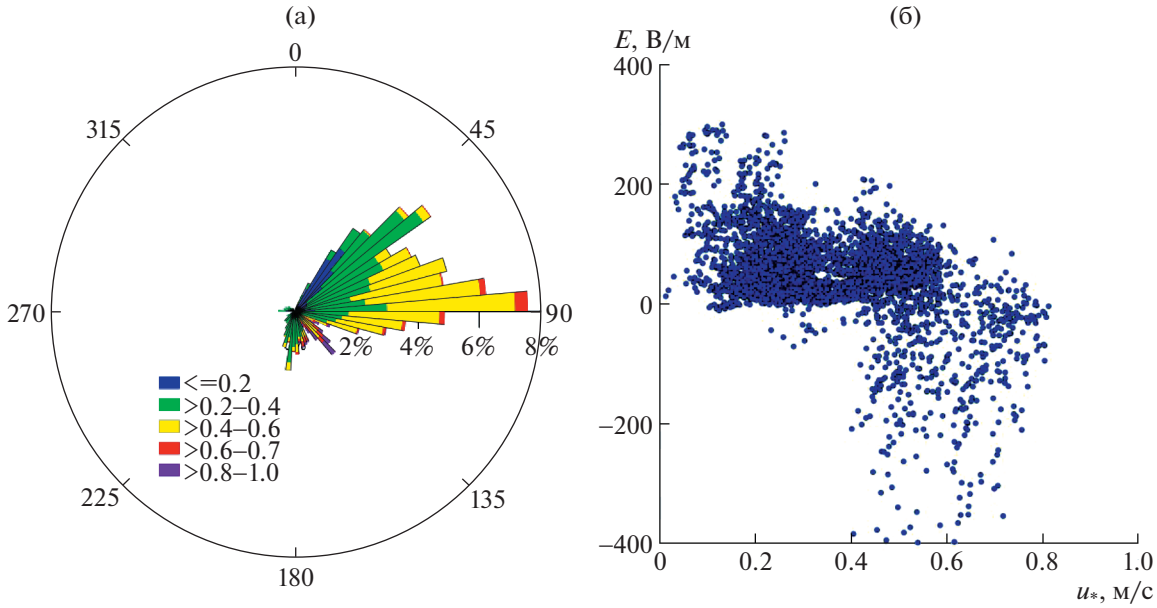


Рис. 1. (а) Распределение динамической скорости трения по направлениям ветра; (б) зависимость напряженности электрического поля от динамической скорости.

электрического поля пороговая скорость ветрового выноса понижается [10].

Мелкая фракция аэрозоля содержится изначально в самом сальтационном потоке [11], она частично поднимается в верхние слои в результате конвективного, диффузионного перемешивания или, возможно, сил электростатической природы. Скорости и размеры сальтирующих частиц [12] влияют на интенсивность процесса стирания частиц при ветровом воздействии. Мелкие частицы удерживаются на поверхности более крупных частиц силами Ван-дер-Ваальса электростатической природы [13]. Распределения по размерам для генерируемых микрочастиц зависят от скорости падения сальтирующих частиц [14] и направления воздушного потока [15].

Иститутом физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН в период с 22 июля по 1 августа 2020 г. проводились круглосуточные комплексные исследования выноса минеральных аэрозолей в аридных и полуаридных условиях на территории республики Калмыкия. Выбранный для полевых работ дюнный участок с подвижными песками, расположенный в 5 км к западу от пос. Нарын Худук, имеет примерно широтную протяженность около 1.5 км и ширину 250–300 м.

Концентрация аэрозолей на двух уровнях 0.5 и 2.0 м измерялась с помощью лазерного аэрозольного спектрометра ЛАС-П (9 каналов 0.15–1.5 мкм) и счетчика аэрозолей ОЭАС-05 (9 каналов 0.2–5.0 мкм), изготовленных в НИФХИ им. Л.Я. Карпова. Частота записи 1 мин. Общее время измерений составило 232 ч. Параллельно проводились сопутствующие измерения метеопараметров: температуры почвы, температуры воздуха и скорости ветра на уровнях 2 и 10 м, давления, влажности, падающей и отраженной радиации, отбор проб воздуха для последующего элементно-химического анализа. Методика измерений и аппаратура детально описаны в [16]. Направление ветра было преимущественно восточным-северо-восточным. Среднее значение динамической скорости составляло около 0.3 м/с. Отметим, что в 65% времени измерений динамическая скорость превышала критическое для возникновения сальтации значение 0.25 м/с. На рис. 1а представлено распределение значений динамической скорости по направлениям.

Напряженность электрического поля на уровне земной поверхности измерялась флюксметром “Поле-2”, разработанного в ГГО им. А.И. Воейкова [9, 17]. Частота записи – 1 с, общее время измерений составило 96 ч. Величина напряженности изменялась в пределах от –1100 до +300 В/м со средним значением около 41 В/м (при минутном осреднении). Появление здесь отрицательных и близких к нулевому значений при усилении скорости ветра (в нашем случае до значений, превышающих 7–8 м/с – на высоте 2 м), связанных с появлением в приповерхностном слое отрицательно заряженных аэрозольных частиц, является типичным для выноса пылевого аэрозоля не только с опустыненных территорий, но и для незакрепленных или эродированных поверхностей [17]. На рис. 1б показана зависимость между напряженностью

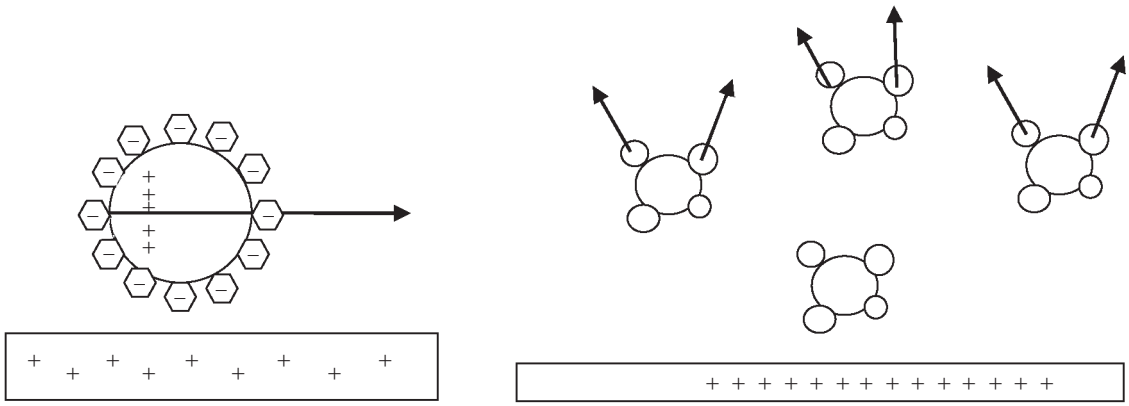


Рис. 2. Механизм возникновения свободных заряженных микрочастиц под воздействием электростатического поля в результате движения и накопления заряда на поверхности сальтирующих частиц.

электрического поля и динамической скоростью. Виден тренд в отрицательную область при увеличении скорости ветра. Далее приведен анализ, позволяющий выявить особенности связи ветрового режима с генерацией аридного аэрозоля и изменением электрического поля.

Рассмотрим изменения электрического поля, создаваемого сальтационным потоком у поверхности, с ветровыми режимами, и их влияние на генерацию свободных частиц субмикронного размера.

Высота подскоков сальтирующих частиц над поверхностью ограничена несколькими сантиметрами. Так, для исследуемого участка визуально наблюдаются перемещения до уровня от 1 до 3 см. За счет вовлечения в процесс движения частиц из верхнего слоя песка формируется поток, толщина которого определяется высотой подскоков. Известно [3, 4], что в результате такого типа перемещений в воздухе накапливается отрицательный заряд. Поверхность земли оказывается положительно заряженной [3]. В условиях относительно ровного рельефа при небольших скоростях ветра можно считать поток сальтирующих частиц однородным, а следовательно, будет преобладать вертикальная компонента электрического поля, поэтому далее эта величина и понимается под напряженностью электрического поля. Фиксируемые в экспериментах заряды для микрочастиц отрицательны [18], а заряды сальтирующих крупных частиц положительны [19]. Это оказывается возможным при достижении фоновой критической величины напряженности электрического поля потоком сальтирующих частиц при которой прилипшие микрочастицы могут оторваться, тем самым способствуя возникновению положительно заряженных сальтирующих частиц (рис. 2).

Туннельная передача заряда от более крупных частиц более мелким происходит при ударе [2] и, вероятно, при взаимодействии пылинок с крупными частицами, так как в результате отмечается изменение их зарядов [2–4]. В первом приближении можно предположить, что размеры и заряды сальтирующих заряженных частиц имеют близкие к средним значения r и q. Поток из N_s заряженных частиц создает на поверхности электрическое поле с амплитудой напряженности

$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0}\frac{N_s q}{h^2}, \qquad (1)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость воздуха, ε_0 – электрическая постоянная, h – высота потока частиц над поверхностью.

В момент удара при падении сальтирущей частицы передаваемый заряд распределяется равномерно между микрочастицами на ее поверхности исходя из приближения плотного заполнения, величина заряда, переданная одной микрочастице размером r_μ, может быть оценена как: $q_\mu = \frac{r_\mu^2}{r^2}q$.

За n_s касаний подвижной частицы с поверхностью на одной микрочастице накапливается заряд, равный пороговому значению $n_s q_{\mu k}$, при котором возможны ее отрыв и свободное перемещение над слоем сальтации. Условие отрыва микрочастиц, прикрепленных к поверхности сальтирующих частиц, можно определить, приравнивая силу вертикально выталкивающей их вверх со стороны электрического поля, создаваемого потоком частиц с силами сцепления Лондона-Ван-Дер-Ваальса $C_a r_\mu$:

$$q_{\mu k} n_s E = C_a r_\mu.$$

Здесь $C_a = 0.0024$ Н/м [14].

Под воздействием электростатического поля, созданного совокупностью отрицательно заряженных частиц, в потоке сальтации, прикрепленные микрочастицы при накоплении критического заряда стряхиваются и свободно движутся.

За время t_s и $n_s = \dfrac{C_a r_\mu}{q_{\mu k} E}$ касаний отрывается одна микрочастица. Соответственно за малое время dt с поверхности одной сальтирующей частицы стряхивается dN_μ микрочастиц:

$$dN_\mu = \frac{C_a r_\mu}{q_{\mu k} E t_s} \frac{r^2}{r_\mu^2} dt. \quad (2)$$

Полагаем, что число касающихся поверхности сальтирующих частиц определяется величиной σN_s (где σ – доля частиц, касающихся поверхности). За время t_s доля генерирующих микрочастицы в среднем определяется как: $\dfrac{\sigma N_s}{2n_s}$. Тогда для N'_μ отрывающихся микрочастиц от N_s сальтирующих частиц получаем из (2)

$$\frac{dN'_\mu}{dt} = \frac{\sigma N_s}{2n_s} \frac{C_a r_\mu}{q_{\mu k} E t_s} \frac{r^2}{r_\mu^2}.$$

При генерации свободных заряженных микрочастиц уменьшается величина заряда на отдельных частицах в потоке сальтации, в результате ослабляется создаваемое им электрическое поле. Соответственно, его изменение будет определяться изменением заряда сальтирующих частиц $dE = \dfrac{1}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0} \dfrac{N_s dq}{h^2}$. Считая в первом приближении процесс накопления заряда на микрочастицах однотипным и равномерным, связанным с их генерацией, получаем, что для отрыва с поверхности одной частицы N_μ пылинок в единицу времени потребуется, чтобы они были заряжены до $q_\mu = q_{\mu k} N_\mu$. Тогда для N_s сальтирующих частиц получим изменение поля:

$$dE = \frac{1}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0} \frac{N_s q_{\mu k}}{h^2} dN_\mu. \quad (3)$$

Откуда с учетом предположения о равномерном заполнении поверхности частицы пылинками

$$dE = \frac{1}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0} \frac{N_s q_{\mu k}}{h^2} \frac{r_\mu^2}{r^2} dN_s. \quad (4)$$

Электрическое поле увеличивается с ростом заряженных сальтирующих частиц в потоке N_s и уменьшается в момент генерации микрочастиц при потере заряда. Выражая N_μ через N_s и используя связь числа генерируемых микрочастиц с числом касаний сальтирующих частиц $N_\mu = \dfrac{\sigma N_s}{2n_s}$, получаем:

$$dE = \frac{1}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0} \frac{4n_s^2}{\sigma^2} \frac{N_\mu q_{\mu k}}{h^2} \frac{r_\mu^2}{r^2} dN_\mu.$$

Отмечаем связь изменений электрического поля с числом свободных микрочастиц. После интегрирования по N_μ получаем квадратичную (параболическую) зависимость изменения напряженности электрического поля от числа микрочастиц

$$\Delta E = \frac{1}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0} \frac{4n_s^2}{\sigma^2} \frac{q_{\mu k}}{h^2} \frac{r_\mu^2}{r^2} \left(N_{\mu 0}^2 - N_\mu^2\right). \quad (5)$$

Потеря заряда происходит при возникновении свободных микрочастиц в результате их выталкивания из верхнего подслоя слоя сальтации толщиной Δh_s. Изменение числа микрочастиц определяется соотношением $k \dfrac{dq_\mu}{dt} \dfrac{\Delta h_s}{h_s} = k q_{\mu k} \dfrac{dN_\mu}{dt} \dfrac{\Delta h_s}{h_s}$, где k – доля стряхиваемых микрочастиц из подслоя Δh_s. Электрическое поле будет изменяться в зависимости от числа микрочастиц и высоты слоя, перемещающихся у поверхности частиц следующим образом:

$$dE^* = \frac{1}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0} \frac{4n_s^2}{\sigma^2} \frac{\Delta h_s}{h_s} \frac{N_\mu q_{\mu k}}{h^2} \frac{r_\mu^2}{r^2} dN_\mu. \quad (6)$$

Чем выше поток сальтирующих частиц над поверхностью, тем медленнее меняются заряд и напряженность электрического поля. Так как высота подскоков частиц растет со скоростью ветра, перемещение частиц будет на меньшей высоте при скорости ветра, близкой к критической. Реализация “быстрой” зарядки сальтирующих частиц с этой позиции возможна в одном из двух условий: при скорости ветра, близкой к критической, и при касательном направлении ветра, когда задействуются массивные частицы из зоны аккумуляции [20]. Скорость накопления заряда увеличивается с размером перемещающихся у поверхности частиц и с их скоростью.

Если $\Delta E(N_\mu) > 0$ (ветви, параболы (5) направлены вниз), то напряженность электрического поля уменьшается с изменением (ростом – уменьшением) числа микрочастиц. При этом ослабление электрического поля происходит за счет интенсивного возникновения свободных микрочастиц более быстрой зарядки. Это, в частности, как следует из (5), может быть связано с уменьшением высоты слоя сальтации.

Если $\Delta E(N_\mu) < 0$ (ветви, параболы (5) направлены вверх), то напряженность электрического

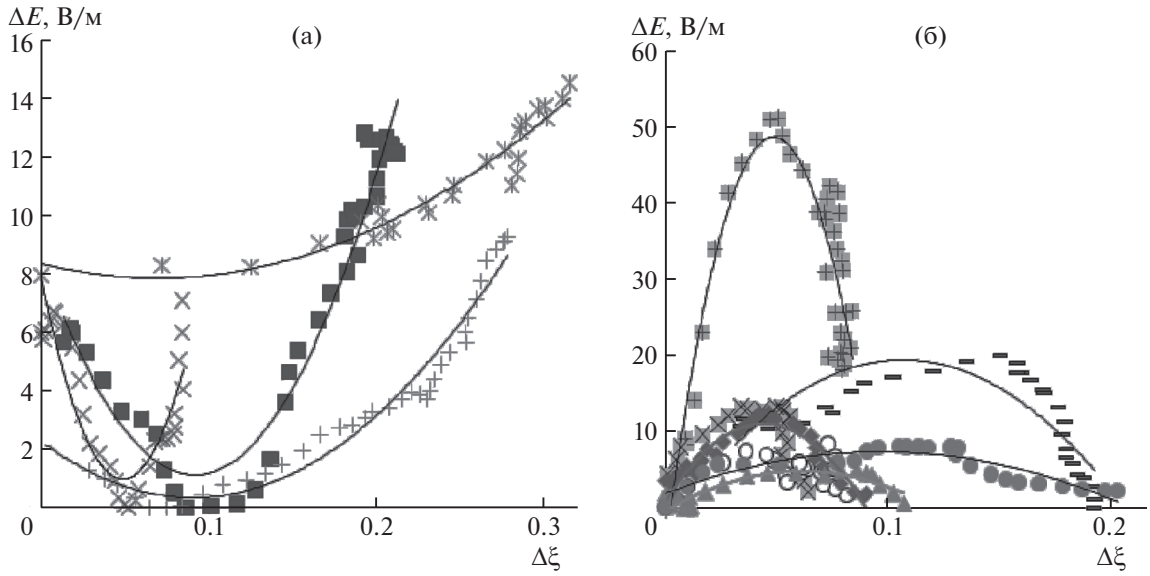


Рис. 3. Связь абсолютного изменения электрического поля с относительными изменениями концентраций микрочастиц размерами 0.2–0.5 мкм: (а) 1). ■ – 30.07:7–8:00, 2) × – 30.07, 23–24:00, 3) ✳ – 29.07:23–24:00, 4) + – 30.07, 22–23:00; (б) 1) ◆ – 31.07:0–1: 00, 2) ▲ – 31.07:5–6:00, 3) ● – 30.07:20–21:00, 4) ▬ – 31.07:8–9:00, 5) # – 30.07, 13–14:00, 6) ✖ – 29.07, 11–12:00, 7) ○ – 30.07, 9–10:00.

поля увеличивается. Усиление электрического поля возможно при условии более медленной генерации свободных микрочастиц по отношению к процессу зарядки. При этом будут выше подскоки частиц.

Далее оценим влияние изменений скорости и направления ветра на напряженность электрического поля и поток микрочастиц с размерами 0.2–0.5 мкм. Из данных измерений с 25 по 31 июля 2020 г. методом скользящего среднего за каждые 10 мин получены пары значений.

Связь относительных изменений электрической напряженности

$$\Delta\chi = \frac{E(t_i) - E(t_i - \Delta t)}{E_{\max}(t_i)} = \frac{\Delta E}{E_{\max}(t_i)}$$

и числа микрочастиц

$$\Delta\xi = \frac{n(t_i) - n(t_i - \Delta t)}{n_{\max}(t_i)} = \frac{\Delta n}{n_{\max}(t_i)}$$

за временной интервал Δt = 10–40 мин для момента времени t_i приведена на рис. 3.

Можно выделить для разных временных интервалов следующие зависимости $\Delta\chi(\Delta\xi) \sim (\Delta\xi)^2$:

1) при всех ветровых режимах для дней с преобладающим по отношению к грядам эоловых структур касательным направлением ветра;

2) при скоростях ветра, меньших 5.5 м/с для дней с преобладающим по отношению к грядам эоловых структур лобовым направлением ветра.

Предполагаем, что участки ветвей (5), близкие и удаленные к областям максимума (минимума), соответствуют четырем режимам взаимного изменения электрического поля в связи с числом микрочастиц:

– для ослабления электрического поля (рис. 4, рис. 6а) с увеличением числа микрочастиц (рис. 4а, 4б, рис. 6а, I – более быстрое и II – менее быстрое падение напряжения) и уменьшением числа микрочастиц (рис. 4в, 4г, рис. 6а, III – менее быстрое и IV – более быстрое падение напряжения);

– для усиления электрического поля (рис. 5, рис. 6б) с увеличением числа микрочастиц (рис. 5а, 5б, рис. 6б, I – более быстрое и II – менее быстрое) и уменьшением числа микрочастиц (рис. 5в, 5г, рис. 6а, III – менее быстрое и IV – более быстрое).

В зависимости от электромеханического состояния системы сальтирующих частиц (табл. 1) интенсивность увеличения или уменьшения электрического поля определяется направлением и скоростью ветра, а также размером сальтирующих частиц.

Векторами на рис. 6 показаны изменения скорости и направления ветра в течение часа до момента изменения напряженности электрического поля и числа микрочастиц.

Близость модульных значений наклона прямых, аппроксимирующих разные участки квадра-

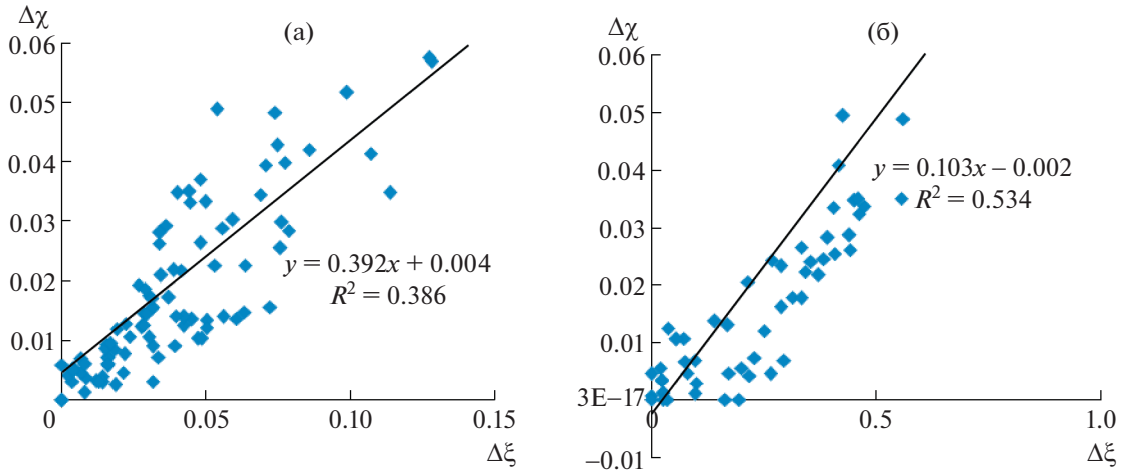


Рис. 4. Относительное уменьшение напряженности для получасовых – часовых временных интервалов. (а) При относительном уменьшении числа микрочастиц (30.07:21:00, 19:30:29.07:18:20; 25.07:20:30). (б) При относительном уменьшении числа микрочастиц (25.07:7:30, 11:10; 26.07:0:30:27.07:19:40; 29.07:4:04; 30.07:20:07, 31.07:0:20).

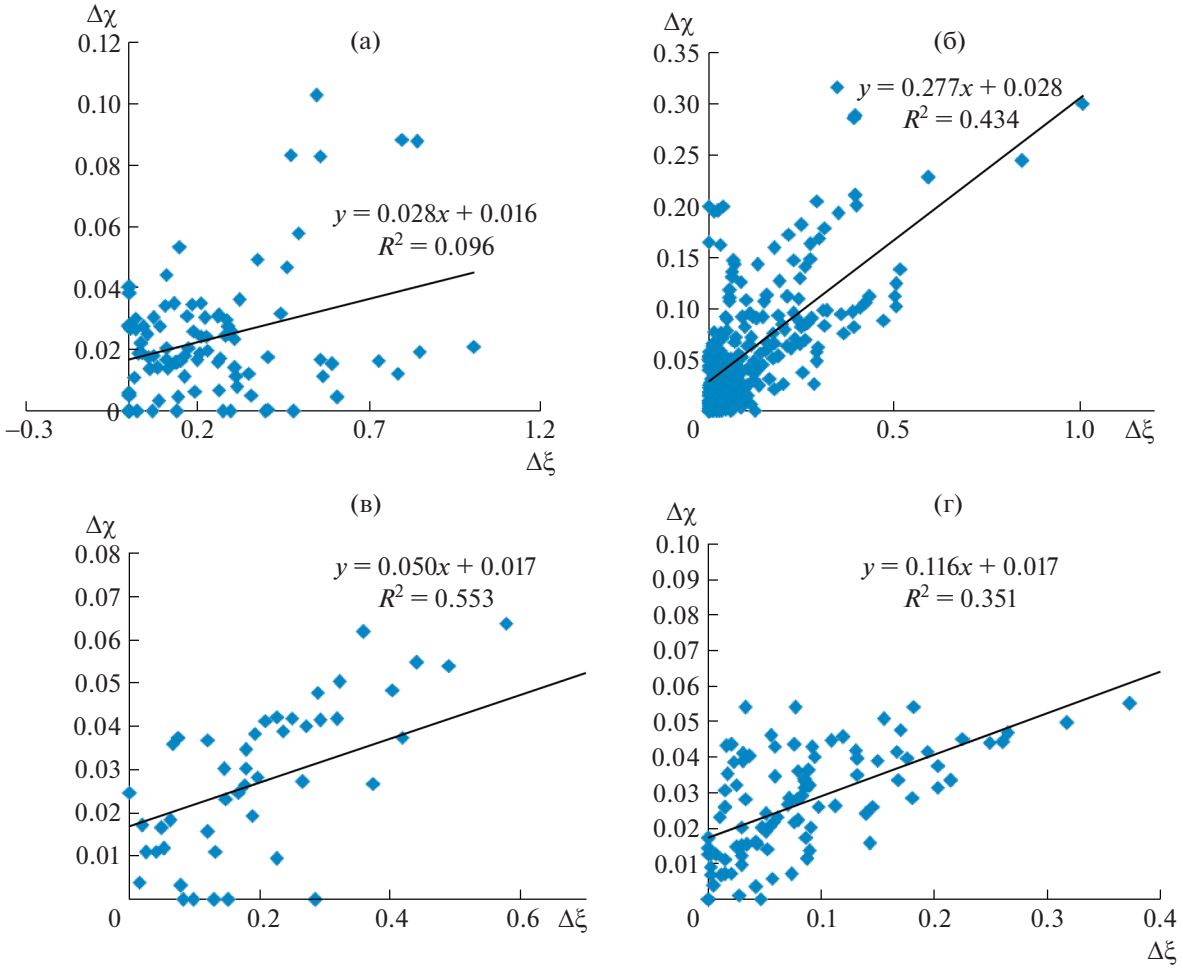


Рис. 5. Относительное увеличение напряженности для получасовых – часовых временных интервалов. (а) При относительном уменьшении числа микрочастиц (27.07:20:20; 28.07:9:10, 13:10, 23:10; 30.07:8:10). (б) При относительном уменьшении, увеличении числа микрочастиц (27.07:20:00; 28.07:13: 30, 16:40; 30.07:1:40, 15:20). (в) При относительном увеличении числа микрочастиц (25.07:0:00, 4:30, 8:10, 9:20; 26.07:3:10, 5:10, 16:10; 27.07:2:00, 11:00; 17:10). (г) При относительном увеличении числа микрочастиц (27.07:11:10, 20:10; 28.07:15:30, 18:30, 23:00).

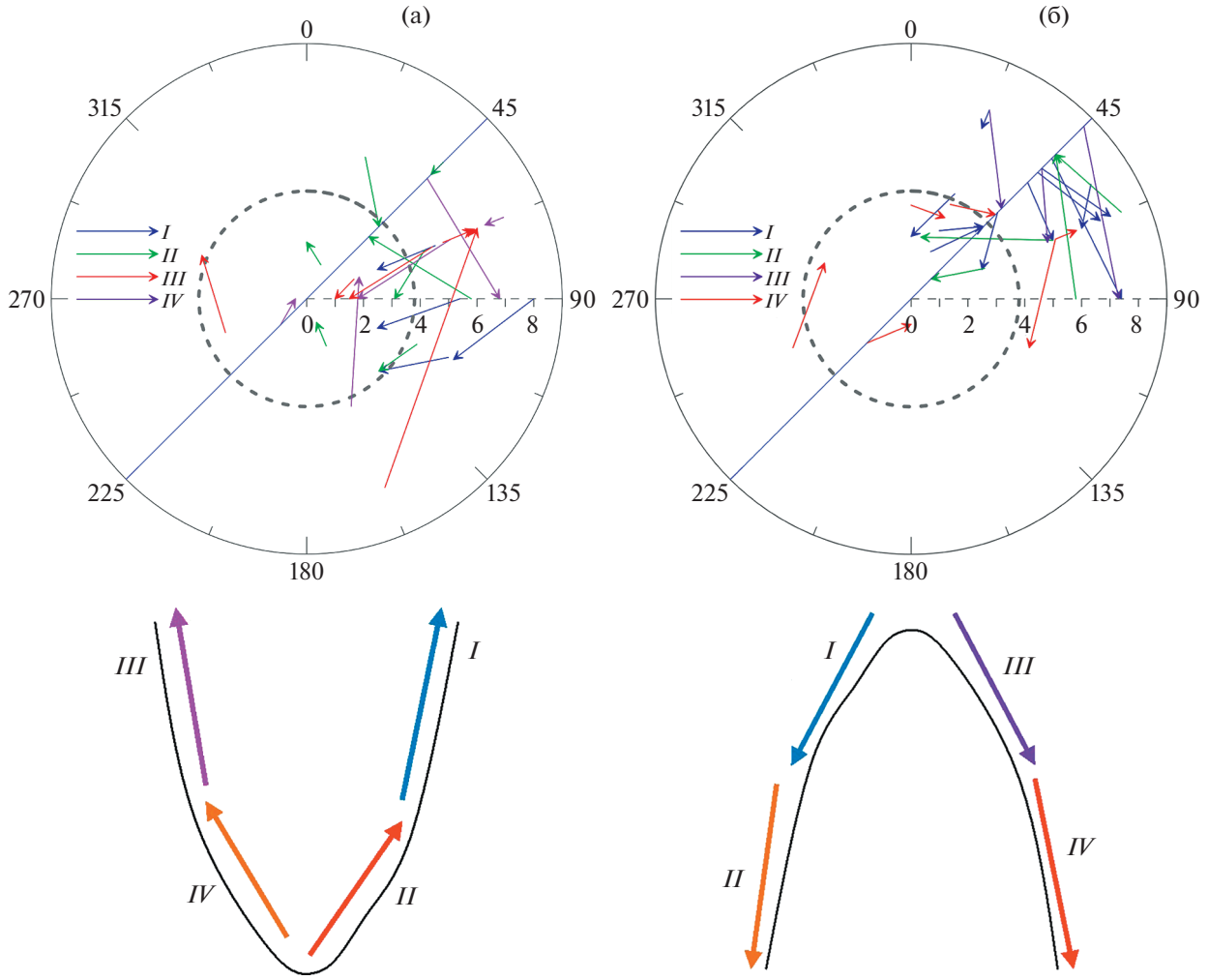
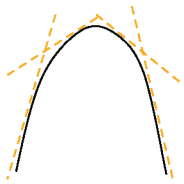
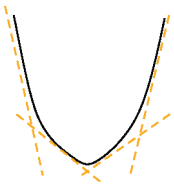


Рис. 6. Связь изменений скорости и направления ветра с изменениями электрического поля. Внутренняя окружность – критическая скорость ветра, наклоненная линия – линия стыка наветренного и подветренного склонов. а) *I* ($\Delta\chi/\Delta\xi$ = = –0.392.) и *II* ($\Delta\chi/\Delta\xi$ = –0.101) – снижение напряженности с ростом числа микрочастиц), *III* $\Delta\chi/\Delta\xi$ = 0.363) и *IV* ($\Delta\chi/\Delta\xi$ = = 0.087) – снижение напряженности с уменьшением числа микрочастиц; б) *I* ($\Delta\chi/\Delta\xi$ = –0.024) и *II* ($\Delta\chi/\Delta\xi$ = –0.277) – увеличение напряженности с уменьшением числа микрочастиц), *III* ($\Delta\chi/\Delta\xi$ = –0.050) и *IV* ($\Delta\chi/\Delta\xi$ = 0.116) – увеличение напряженности с увеличением числа микрочастиц. Стрелками показано изменение скорости и направления ветра в течение часа до момента изменения напряженности электрического поля и числа микрочастиц.

тичной зависимости проявляется в большей степени при ослаблении электрического поля, нежели при его усилении. Это, вероятно, связано с влиянием дополнительных помимо ветра факторов на генерацию микрочастиц.

При большем наклоне прямых при снижении напряженности электрического поля (($\Delta\chi/\Delta\xi$ = = 0.363, рис. 6а) и с уменьшением числа частиц изменяется направление ветра ближе к лобовому по отношению к линии стыка наветренного и подветренного склонов. Скорость по величине приближается к критической (рис. 6а). В этом случае высота подскоков частиц уменьшается, так как они в большей степени, чем при касательном направлении ветра, задерживаются элементами микрольефа. Замедляются процессы зарядки и генерации микрочастиц. При меньшем наклоне прямых при снижении напряженности электрического поля $\Delta\chi/\Delta\xi$ = 0.87 с уменьшением числа микрочастиц скорости ветра незначительно уменьшаются ниже критической, со сменой направления. В момент ослабления скорости до критической подскоки минимальны по высоте или отсутствуют, электрическое поле и генерация микрочастиц кратковременно усиливаются до момента ослабления. Дальнейшее уменьшение скорости приводит к ослаблению процессов изменения напряженности электрического поля и генерации микрочастиц. Ослабление электрического поля в момент усиления генерации микрочастиц характерно для восточного направления ветра, которое дает угол 22°–45° по отношению к

Таблица 1. Связь изменений электрической напряженности с числом микрочастиц

Изменение напряженности электрического поля	Состояние электромеханической системы в соответствии с формулой (5)	Соотношение изменений электрической напряженности поля E и числа микрочастиц N_μ	Физические процессы, с которыми связываются изменения
$\Delta E(N_\mu) > 0$		$E\uparrow \cup N_\mu\uparrow$ Быстрое изменение E / Медленное изменение E $E\uparrow \cup N_\mu\downarrow$ Быстрое изменение E / Медленное изменение E	касательное направление ветра, скорости, близкие к критическим, наличие в потоке крупных частиц
$\Delta E(N_\mu) < 0$		$E\downarrow \cup N_\mu\uparrow$ Быстрое изменение E / Медленное изменение E $E\downarrow \cup N_\mu\downarrow$ Быстрое изменение E / Медленное изменение E	потеря заряда при генерации микрочастиц интенсивнее процесса заряда сальтирующих частиц

линии стыка наветренного и подветренного склонов. Микрорельеф при таком угле не задерживает перемещение частиц у поверхности. В этом случае при относительно невысоких подскоках частиц микрорельеф задерживает некоторую их долю, вероятны частицы с меньшим зарядом.

Усиление электрического поля явно связано с касательным направлением по отношению к линии стыка наветренного и подветренного склонов (рис. 6б). Скорость ветра при этом либо почти не меняется для случая 6–9 м/с, либо приближается к критической скорости ветра при 2–5 м/с.

Во всех случаях можно отметить влияние рельефа и микрорельефа на изменение процесса генерации микроаэрозоля в связи с сопутствующим изменением электрической напряженности.

В заключение резюмируем представленные выше результаты.

По наблюдениям экспедиции 2020 г. в юго-восточной части Европы (Россия, Республика Калмыкия) выбраны данные по числу микрочастиц, величине электрической напряженности, а также направления и скорости ветра.

Учитывается, что на сальтирующей частице располагаются удерживаемые Ван-дер-Ваальсовыми силами микрочастицы. В момент касания с поверхностью движущаяся частица заряжается отрицательно, поверхность – положительно. Отрицательно заряженные прикрепленные микрочастицы в момент установления порогового значения напряженности электрического поля, создаваемого потоком сальтирующих частиц, переходят в свободное состояние, перемещаются выше. В результате такой генерации микрочастиц ослабляется общая напряженность электрического поля. На скорость зарядки потока влияет высота подскоков частиц. Соответственно, усиление электрического поля будет связано с условиями перемещения более крупных частиц, а также при ветре, близком к пороговому, при котором возможен отрыв частиц. Аналитическая оценка показывает, что изменение электрического поля пропорционально квадрату числа генерируемых микрочастиц. Эта зависимость неплохо подтверждается данными полевых измерений. В предположении квадратичной связи найдены временные интервалы продолжительностью от 10 до 40 мин, в течение которых отмечаются хорошие корреляции напряженности электрического поля и числа

микрочастиц. Можно выделить четыре состояния: для ослабления электрического поля с увеличением и уменьшением числа микрочастиц и для усиления электрического поля с уменьшением и увеличением числа частиц. Ослабление и усиление поля связаны с изменением скорости и направления ветра. Так, ослабление электрического поля отмечается при изменении направления ветра ближе к лобовому по отношению к линии стыка наветренного и подветренного склонов и при приближении к критической скорости ветра. Здесь важную роль играет микрорельеф поверхности, удерживающий перемещение частиц. Ослабление электрического поля в момент усиления генерации микрочастиц характерно для восточного направления ветра, которое дает угол 22–45 градусов по отношению к линии стыка наветренного и подветренного склонов. При таком угле микрорельеф не влияет на перемещение частиц у поверхности, при невысоких подскоках частиц происходит быстрая зарядка, микрорельефом задерживается некоторая их доля, вероятны частицы, потерявшие заряд. При усилении электрического поля преобладает касательное направление ветра по отношению к линии стыка наветренного и подветренного склонов (рис. 6б).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы хотят выразить признательность В.А. Лебедеву, А.А. Хапаеву, Л.О. Максименкову, Б.А. Харцхаеву, Ю.А. Егорову и И.В. Королеву за помощь в организации и проведении натурных измерений. Отдельная благодарность Г.С. Голицыну, Г.И. Горчакову и А.В. Карпову за интерес к работе и консультации.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены за счет средств Российского фонда фундаментальных исследований (проект Микромир 19-05-50110: полевые измерения, постобработка) и Российского научного фонда (проект 20-17-00214: анализ данных измерений, теоретические оценки).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Schmidt D.S., Schmidt R.A., Dent J.D.* Electrostatic Force on Saltating Sand // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 1998. V. 103. D8. P. 8997–9001.
2. *Kok J.F., Lacks D.J.* Electrification of Granular Systems of Identical Insulators // Physical Review E. 2009. V. 79. № 5. P. 051304.
3. *Kok J.F., Renno N.O.* Electrostatics in Wind-blown Sand // Physical Review Letters. 2008. V. 100. № 1. P. 014501.
4. *Bo T.L., et al.* Theoretical Prediction of Electric Fields in Wind-blown Sand // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2013. V. 118. № 10. P. 4494–4502.
5. *Yue G., Zheng X.* Electric Field in Windblown Sand Flux with Thermal Diffusion // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2006. V. 111. D16106.
6. *Zheng X.J.* Electrification of Wind-blown Sand: Recent Advances and Key Issues // The European physical journal E. 2013. V. 36. P. 138.
7. *Горчаков Г.И. и др.* Электрические токи сальтации в ветропесчаном потоке // ДАН. 2006. Т. 410. № 2. С. 259–262.
8. *Esposito F., et al.* The Role of the Atmospheric Electric Field in the Dust-lifting Process // Geophysical Research Letters. 2016. V. 43. № 10. P. 5501–5508.
9. *Петрова Г.Г. и др.* Исследование роли аэрозолей в формировании вариаций электрического поля в приземной атмосфере // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. 2018. № 5 (25). С. 45–54.
10. *Merrison J.P.* Sand Transport, Erosion and Granular Electrification // Aeolian Research. 2012. V. 4. P. 1–16.
11. *Liu X.Y., Ning W.X., Wang Z.T.* Theoretical Expressions for Soil Particle Detachment Rate Due to Saltation Bombardment in Wind Erosion // Sciences in Cold and Arid Regions. 2020. V. 12. № 4. P. 234–241.
12. *Alfaro S.C., et al.* Modeling the Size Distribution of a Soil Aerosol Produced by Sandblasting // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 1997. V. 102. D10. P. 11239–11249.
13. *Козлов А.С. и др.* Исследование механических процессов образования субмикронного аэрозоля // Оптика атмосферы и океана. 2000. Т. 13. № 6–7. С. 664–666.
14. *Fernandes R., Dupont S., Lamaud E.* Investigating the Role of Deposition on the Size Distribution of Near-surface Dust Flux during Erosion Events // Aeolian Research. 2019. V. 37. P. 32–43.
15. *Shao Y., et al.* A Tribute to Michael R. Raupach for Contributions to Aeolian Fluid Dynamics // Aeolian Research. 2015. V. 19. P. 37–54.
16. *Chkhetiani O.G., Gledzer E.B., Vazaeva N.V.* Measurements and Approximations for Submicron-aerosol Size Distribution Functions // Earth and Space Science. 2020. V. 8. № 6. e2020EA001616.
17. *Петрова Г.Г. и др.* Формирование электрической структуры нижних слоев атмосферы: экспериментальные исследования и обобщение данных // Известия вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56. № 11–12. С. 803–819.
18. *Fuerstenau S., Wilson G.* A Particle Charge Spectrometer for Determining the Charge and Size of Individual Dust Grains on Mars // Institute of Physics Conference Series. 2004. V. 178 (4). P. 143–148.
19. *Schmidt D.S., Schmidt R.A., Dent J.D.* Electrostatic Force on Saltating Sand // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 1998. V. 103. B8. P. 8997–9001.
20. *Малиновская Е.А., Чхетиани О.Г., Максименков Л.О.* Распределение эоловых микрочастиц по размерам при разных направлениях ветра // Известия академии наук. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 5. С. 539–554.

THE RELATIONSHIP BETWEEN THE SURFACE ELECTRIC FIELD AND ARID AEROSOL UNDER DIFFERENT WIND CONDITIONS

E. A. Malinovskay[a,#], O. G. Chhetiani[a], I. N. Panchishkina[b], G. G. Petrova[b], and A. I. Petrov[b]

[a] *A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

[b] *Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation*

[#] *E-mail: elen_am@inbox.ru*

Presented by Academician of the RAS G.S. Golitsyn July 15, 2021

The relationship between the concentration of arid aerosol 0.2–0.4 microns in size and the electric field strength is investigated according to field measurements carried out on a desertified territory in Kalmykia in 2020. It is shown that the increase and decrease in the electric field strength is associated with a change of wind velocity and direction relating of the dune ridges. An increase in the electric field strength occurs at wind speeds close to the threshold value, and when the wind direction is close to the tangent to the line of junction of the windward and leeward slopes of the dune. According to an analytical estimate, the relative change in the electric field strength turns out to be dependent on the square of the number of generated microparticles. Free microparticles, pushed up by the electric field from the saltation layer, appear at the moment of accumulation of a critical charge on the saltation particle. Particle charging occurs faster with small bounces of particles, as in the tangential direction or when the wind speed is close to the threshold. The influence of aeolian ripples on the movement and the height of the jumps of the salting particles is noted at wind directions of 25–45° with the line of junction of the windward and leeward slopes, as a weakening of the electric field with an increase in the number of microparticles.

Keywords: wind dust transport, atmospheric electricity, aeolian structures