

УДК 551.510

АЛЕВРИТОВАЯ ФРАКЦИЯ САЛЬТИРУЮЩИХ ЧАСТИЦ В ВЕТРОПЕСЧАНОМ ПОТОКЕ НА ОПУСТЫНЕННОЙ ТЕРРИТОРИИ

Г. И. Горчаков^{1,*}, Д. В. Бунтов¹, А. В. Карпов¹, В. М. Копейкин¹,
С. Ф. Мирсаитов², Р. А. Гущин^{1,2}, О. И. Даценко^{1,2}

Представлено академиком РАН Г.С. Голициным 20.02.2019 г.

Поступило 19.02.2019 г.

В ветропесчаном потоке на опустыненной территории обнаружена алевритовая фракция сальтирующих частиц с модальным диаметром 45 мкм. Предложена аппроксимация наблюдаемого распределения сальтирующих частиц суммой двух логнормальных распределений. Показано, что в ветропесчаном потоке счётные концентрации алевритовых и песчаных частиц по-разному зависят от скорости ветра в приземном слое атмосферы.

Ключевые слова: опустынивание, ветропесчаный поток, сальтация, алевритовая фракция, песчаная фракция, распределение сальтирующих частиц по размерам, аппроксимация распределения частиц по размерам, концентрации алевритовых и песчаных частиц, влияние скорости ветра на концентрации частиц.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524882193-196>

По данным измерений функции распределения сальтирующих частиц по размерам в диапазоне от 30 до 700 мкм в ветропесчаном потоке на опустыненной территории в Астраханской области обнаружена алевритовая фракция сальтирующих частиц с модальным размером 45 мкм. Показано, что при изменении скорости ветра в приземном слое атмосферы изменяется соотношение между концентрациями песчаных и алевритовых частиц.

На опустыненных территориях ветропесчаный поток [1–5] (от позёмки до песчаной бури) определяет взаимодействие атмосферы с подстилающей поверхностью, благодаря переносу огромных масс песка трансформирует пустынные ландшафты [2], обеспечивает вынос в атмосферу с подстилающей поверхности большого количества минеральной пыли или аэрозоля (грубодисперсного и субмикронного) [6–8], который заметно влияет на радиационный режим атмосферы на региональном и глобальном масштабах. Основным процессом в ветропесчаном потоке является сальтация (скачкообразное перемещение частиц), которая до сих пор недостаточно изучена [9–11]. Недостаточно изучен и гранулометрический состав сальтирующих частиц. По определению, в процессе сальтации участвует песчаная фракция частиц, которая в геологии относится к обломочным породам, с мини-

мальными размерами частиц от 50 до 100 мкм (в зависимости от принятой классификации [12]). Присутствующая в ветропесчаном потоке минеральная пыль с размерами частиц меньше примерно 10 мкм также относится к обломочным породам [12]. Согласно геологическим классификациям обломочных пород в промежуток между песком и минеральной пылью попадает еще одна обломочная порода – алеврит с размерами частиц примерно от 10 до 50–100 мкм [12].

В задачу настоящей работы входит обнаружение алевритовой фракции сальтирующих частиц и оценка параметров функции распределения алевритовых частиц по размерам в ветропесчаном потоке на опустыненной территории в сопоставлении с функцией распределения песчаной фракции. Второй задачей является оценка влияния изменений скорости ветра на концентрации сальтирующих частиц алевритовой и песчаной фракций.

Нами был создан фотоэлектрический счётчик для исследования вариаций концентраций сальтирующих частиц с размерами от 33 до 700 мкм в ветропесчаном потоке на опустыненных территориях [13] с помощью которого, в частности, были выполнены измерения функции распределения частиц по размерам на опустыненной территории (с размерами примерно $0,7 \times 1,5$ км), расположенной вблизи р. Волги, в августе 2011 г. Измерения проводились в период с 15.08. по 24.08.2011 г. Анализ данных показал, что размеры сальтирующих частиц в рассматриваемом полевом эксперименте не превышали 400 мкм.

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова
Российской Академии наук, Москва

²МИРЭА – Российский технологический университет,
Москва

* E-mail: gengor@ifaran.ru

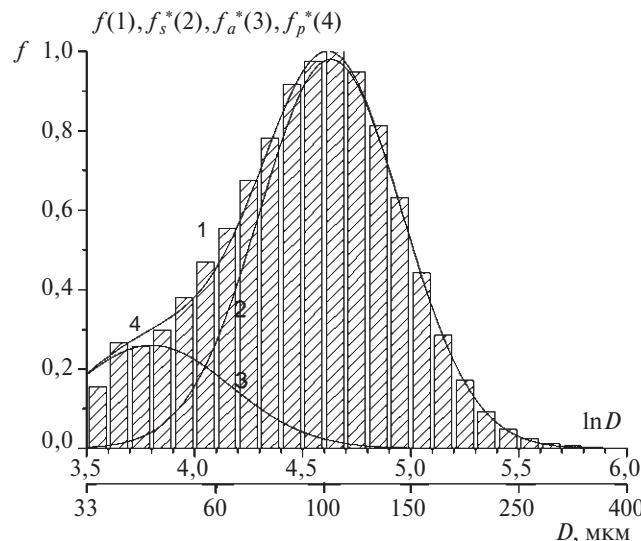


Рис. 1. Нормированное распределение сальтирующих частиц по размерам (1) по данным измерений 23.08.2011 в период с 15:05 по 16:05 на опустыненной территории в Астраханской обл. Аппроксимирующие логнормальные распределения для песчаной фракции (2), для алевритовой фракции (3) и их сумма (4).

В качестве примера на рис. 1 (гистограмма 1) показаны результаты измерения в ветропесчаном потоке на высоте 6 см нормированной на максимальное наблюдаемое значение дифференциальной счётной концентрации функции распределения сальтирующих частиц по размерам $f(\ln D)$ в диапазоне от 33 до 365 мкм 23 августа 2011 г. в период времени с 15:05 до 16:05. Распределение (1 на рис. 1) представлено как функция $\ln D$, где D – диаметр частиц в мкм, с шагом (ширинаю интервала) $\Delta \ln D = 0,1$, что соответствует изменению размеров внутри каждого интервала примерно на 10%. Отметим, что такое высокое разрешение по размерам частиц при измерении дифференциальных счетных концентраций [13] позволило поставить задачу определения параметров алевритовой фракции частиц в ветропесчаном потоке. Для удобства восприятия на рис. 1 приведена дополнительная шкала, на которой указаны размеры частиц в микрометрах. Из рис. 1 следует, что модальный диаметр рассматриваемой функции распределения $f(\ln D)$ оказался равным примерно 105 мкм (мелкий песок). Как известно [14], распределение частиц песчаной фракции на опустыненных территориях аппроксимируются нормальными или логнормальными распределениями. Анализ показал, что основная (правая) часть распределения (1 на рис. 1) с удовлетворительной точностью аппроксимируется логнормальным распределением (2 на рис. 1) в диапазоне размеров частиц от 100 до 350 мкм, которое соот-

ветствует, по определению, песчаной (2) фракции сальтирующих частиц:

$$f_s^*(\ln D) = A_1 \exp \left\{ -\frac{(\ln D - \ln D_1)^2}{2v_1^2} \right\},$$

где $D_1 = 105$ мкм, $v_1 = 0,33$ и $A_1 = 0,975$.

Аппроксимирующее распределение f_s^* недооценивает наблюдаемые дифференциальные счётные концентрации сальтирующих песчинок в диапазоне размеров меньше примерно 100 мкм. “Избыточные” концентрации сальтирующих частиц с размерами меньше 100 мкм можно рассматривать как алевритовую (a) фракцию [12]. Распределение алевритовых частиц по размерам может быть аппроксимировано вторым логонормальным распределением (3 на рис. 1)

$$f_a^*(\ln D) = A_2 \exp \left\{ -\frac{(\ln D - \ln D_2)^2}{2v_2^2} \right\},$$

где $A_2 = 0,26$, $D_2 = 45$ мкм, а $v_2 = 0,365$.

Сумма логнормальных распределений $f_p^* = f_s^* + f_a^*$ с удовлетворительной точностью описывает наблюдаемое распределение $f(\ln D)$ (1 на рис. 1) в диапазоне размеров сальтирующих частиц от 33 до 365 мкм. Модальные диаметры распределений алевритовой и песчаной фракций ветропесчаного потока отличаются примерно в 2,3 раза, а счётная концентрация песчаных частиц в 3,75 раза превосходит концентрацию алевритовых частиц. Параметры, характеризующие ширину распределений f_s^* и f_a^* (0,33 и 0,365) оказались близкими.

Во время проведения измерений на опустыненной территории в период с 15.08 по 24.08.2011 г. соотношение между счётными концентрациями частиц алевритовой и песчаной фракций менялось. Однако бимодальность распределения сальтирующих частиц по размерам всегда сохранялась.

Одной из особенностей предложенной аппроксимации является частичное перекрытие диапазонов размеров частиц алевритовой и песчаной фракций. Задачу о нахождении границы между песчаной и алевритовой фракциями сальтирующих частиц следует решать с учётом результатов исследования свойств указанных частиц. В частности, границу между фракциями частиц можно выбрать вблизи диаметра D_{min} , при котором достигается минимум пороговый скорости ветра при сальтации [1, 2, 14]. Согласно этому критерию по Багнольду [1], указанная граница должна находиться вблизи 80 мкм (с. 90 в [1]). В ряде других работ [3, 14] утверждается, что

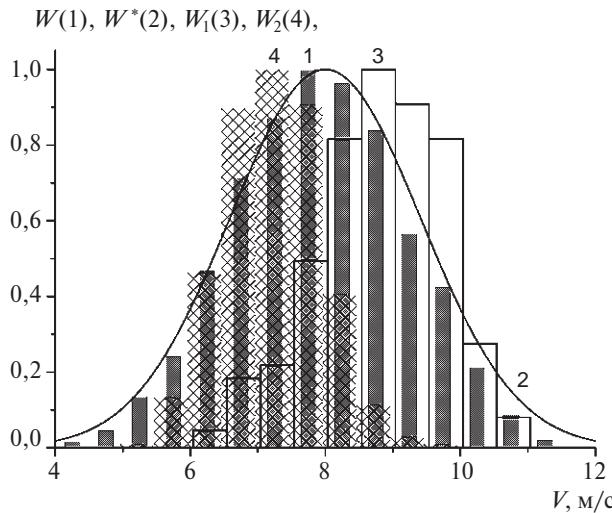


Рис. 2. Нормированные эмпирические функции распределения модуля горизонтальной компоненты скорости ветра V по данным измерений в приземном слое атмосферы 23.08.2011 г. в период с 15:05 по 16:05 (1), с 15:18 по 15:25 (3), с 15:25 по 15:32 (4) и аппроксимация эмпирического распределения (1) нормальным распределением (2).

указанная граница находится в области от 90 до 110 мкм.

Во время проведения измерений функции распределения сальтирующих частиц по размерам 23.08.2011 г. в период с 15:05 по 16:05 (на рис. 1) горизонтальная компонента скорости ветра V на высоте 2 м, измеряемая с помощью акустической метеостанции Метео-2, менялась в широких пределах от 4 до 11 м/с (временное разрешение 1 с). При этом пороговая скорость сальтации составляла примерно 5 м/с. Нормированная эмпирическая функция распределения (ЭФР) модуля скорости ветра V (1 на рис. 2) в период с 15:05 по 16:05 (23.08.2011 г.) с удовлетворительной точностью аппроксимируется нормальным распределением

$$w^*(V) = \exp\left\{-\frac{(V - V_0)^2}{2\sigma^2}\right\},$$

где $V_0 = 8,0$ м/с и дисперсия $\sigma^2 = 2$ м²/с².

Интенсивность сальтации зависит от скорости ветра в приземном слое атмосферы. С целью оценки влияния вариации скорости ветра на функцию распределения сальтирующих частиц по размерам и, в частности, на соотношение между счетными концентрациями алевритовых и песчаных частиц были выбраны два 7-минутных периода времени с ограниченными вариациями скорости ветра в приземном слое атмосферы. В первый период (15:18 – 15:25 23.08.2011 г.) средняя скорость ветра V_1 была равна 8,8 м/с и дисперсия скорости ветра $\sigma_1^2 = 0,83$ м²/с²,

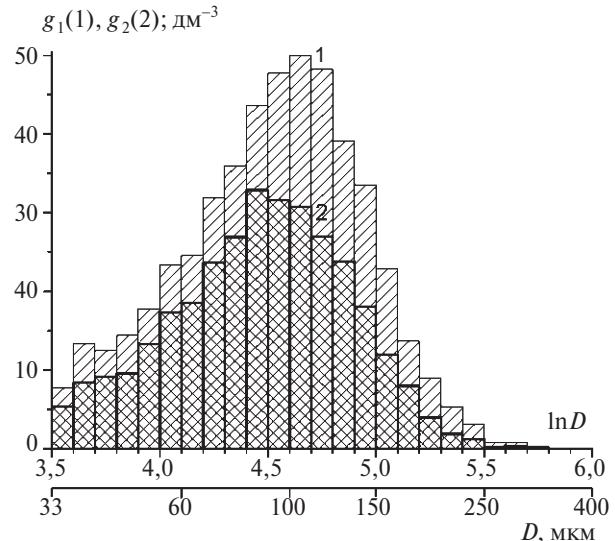


Рис. 3. Распределение сальтирующих частиц по размерам по данным измерений на опустыненной территории в Астраханской обл. 23.08.2011 г. в периоды времени с 15:18 по 15:25 (1) и с 15:25 по 15:32 (2).

а во второй период (15:25 – 15:32 23.08.2011 г.) средняя скорость ветра V_2 составляла 7,25 м/с и дисперсия $\sigma_2^2 = 0,5$ м²/с². Соответствующие нормированные ЭФР скорости ветра w_1 и w_2 показаны на рис. 2 (3 и 4 соответственно).

Для указанных периодов времени были получены (рис. 3) функции распределения (в абсолютных единицах) g_1 и g_2 сальтирующих частиц по размерам. Интегральные концентрации сальтирующих частиц в рассматриваемых случаях оказались равными 0,50 и 0,32 см⁻³, а максимальные дифференциальные склонные концентрации примерно 50 (размер частиц 105 мкм) и 33 дм⁻³ (размер частиц 85 мкм). Нетрудно видеть, что в разных интервалах размеров частиц (рис. 3) отношения дифференциальных склонных концентраций при вышеуказанных значениях средней скорости ветра заметно различаются. В частности, для интервалов шириной $\Delta \ln D = 0,2$ с средними размерами 45, 55 и 67 мкм отношение склонных концентраций при скоростях ветра 8,8 и 7,25 м/с примерно равно 1,34, а для интервалов со средними размерами 110 и 150 мкм – примерно 1,76. В промежуточном диапазоне размеров ($D = 90$ мкм) это отношение равно 1,42. Согласно этим данным, при увеличении скорости ветра на 1 м/с концентрация частиц песчаной фракции увеличивается примерно на 50%, а концентрация частиц алевритовой фракции в ветропесчаном потоке – примерно на 22%.

В пустыне Такла-Макан были выполнены [15] измерения (на высотах 0,1, 0,2 и 0,3 м) функции

распределения сальтирующих частиц по размерам в диапазоне от 30 до 667 мкм, включая дифференциальные счетные концентрации частиц со средними размерами 39, 54 и 95 мкм (ширины интервалов $\Delta \ln D = 0,33$). Вопрос о выделении алевритовой фракции частиц в [15] не обсуждается. Из представленных в [15] результатов следует, что соотношения между концентрациями частиц с средними размерами 39 и 95 мкм заметно различаются в случаях сальтации над сухой и влажной подстилающей поверхностью.

Таким образом, по данным измерений в ветропесчаном потоке (высота 6 см) на опустыненной территории в Астраханской области (август 2011 г.) функции распределение сальтирующих частиц по размерам в диапазоне 33–365 мкм при изменении скорости ветра от 4,0 до 11,0 м/с выявлена алевритовая фракция сальтирующих частиц с размерами меньше 100 мкм. Предложена аппроксимация распределений по размерам частиц алевритовой и песчаной фракций логонормальными распределениями с модальными диаметрами 45 и 105 мкм соответственно. Показано, что скорость ветра по-разному влияет на интенсивность сальтации алевритовых и песчаных частиц. В рассматриваемом случае при увеличении скорости ветра на 1 м/с концентрация частиц песчаной фракции увеличивается на 50%, а концентрация частиц алевритовой фракции ≈ на 22%.

Благодарности. Авторы благодарят академика РАН Г.С. Голицына за полезные советы.

Финансовая поддержка. Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 19–05–00758).

Работа выполнена в ФБГУН Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bagnold R.A. The Physics of Blown Sand and Desert Dunes.* London: Methuen, 1941. 265 p.
2. *Zheng X. Mechanics of Wind-blown Sand Movements* B.: Springer-Verlag, 2009. 290 p.
3. Горчаков Г.И., Титов А.А., Бунтов Д.В. //ДАН. 2009. Т. 424. № 1. С. 102–106.
4. Горчаков Г.И., Карпов А.В., Копейкин В.М. и др. // ДАН. 2013. Т. 452. № 1. С. 669 – 676.
5. Горчаков Г.И., Карпов А.В., Соколов А.В. и др. // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25. № 6. С. 501–506.
6. Gorchakov G.I., Karpov B.M., Shukurov K.A. // Izvestia, Atmos. and Ocean. Phys. 2002. V. 38. Suppl. 1. P. 138–147.
7. Горчаков Г.И., Шукуров К.А. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2003. Т. 39. № 1. С. 85–97.
8. Карпов А.В. // Оптика атмосферы и океана. 2008. Т. 21. № 10. С. 844–849.
9. Горчаков Г.И., Карпов А.В., Кузнецов Г.А., Бунтов Д.В. // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 6. С. 472–477.
10. Горчаков Г.И., Карпов А.В., Копейкин В.М. и др. // ДАН. 2016. Т. 467. № 3. С. 336–341.
11. Карпов А.В., Гущин Р.А., Даценко О.И. // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30. № 3. С. 227–232.
12. Pettijohn F.G. *Sedimentary Rocks.* N. Y.: Harper, 1957. 526 p.
13. Бунтов Д.В., Гущин Р.А., Даценко О.И. // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31. № 6. С. 485–488.
14. Семёнов О.Е. Введение в экспериментальную метеорологию и климатологию песчаных бурь. Алматы: КазНИИЭК, 2011. 580 с.
15. Ishizuka M., Mikami M., Yamada Y., et al. // J. Geophys. Res. 2005. V. 110. № 018. D18S03. P. 1–10.

SALTATING PARTICLE ALEURITE MODE IN WINDSAND FLUX OVER DESERTIFIED AREA

G. I. Gorchakov¹, D. V. Buntov¹, A. V. Karpov¹, V. M. Kopeikin¹,
S. F. Mirsaitov², R. A. Gushchin^{1,2}, O. I. Datsenko^{1,2}

¹A.M.Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia

²MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

Presented by Academician of the RAS G.S. Golitsyn February 20, 2019

Received February 19, 2019

Saltating particle aleurite mode is discovered in the windsand flux over desertified area. Approximation of the saltating particle distribution measured is received using two lognormal distribution functions. It is shown that aleurite and sand number concentration particles in the windsand flux depends on wind velocity in the surface layer in different way.

Keywords: desertification, windsand flux, saltation, aleurite mode, sand mode, saltation particle size distribution, size distribution approximation, aleurite and sand particle concentration, wind velocity influence on particle concentrations.