

УДК 551.510

## Стратификация распределения алевритовых и песчаных частиц по размерам в ветропесчаном потоке на опустыненной территории

Г.И. Горчаков<sup>1</sup>, А.В. Карпов<sup>1</sup>, Р.А. Гушчин<sup>1, 2</sup>,  
О.И. Даценко<sup>1, 2</sup>, Д.В. Бунтов<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН  
119017, г. Москва, Пыжевский пер., 3

<sup>2</sup>МИРЭА – Российский технологический университет  
119454, г. Москва, пр. Вернадского, 78

Поступила в редакцию 24.03.2021 г.

Разработана эмпирическая модель стратификации функции распределения сальтирующих алевритовых и песчаных частиц по размерам по данным измерений дифференциальных счетных концентраций в диапазоне от 30 до 330 мкм с аппроксимацией функции распределения суммой двух логнормальных распределений. Получены аппроксимации вертикальных профилей параметров распределений в слое от 0 до 15 см. Выполнено сопоставление вертикальных профилей модального размера крупных частиц в слое сальтации от 3 до 15 см и в приземном слое атмосферы от 0,125 до 16 м по данным измерений в Аральском регионе.

*Ключевые слова:* опустынивание, ветропесчаный поток, сальтация, алевритовая фракция частиц, распределение частиц по размерам, аппроксимация функции распределения, вертикальные профили параметров функции распределения; desertification, windsand flux, saltation, aleurite particle mode, particle size distribution function, distribution function approximation, vertical profiles of distribution function parameters.

### Введение

С опустыненных территорий в атмосферу поступает большое количество минерального (пылевого) аэрозоля, который заметно влияет на радиационный режим атмосферы в глобальном масштабе [1–5]. Пылевой аэрозоль генерируется на подстилающей поверхности под воздействием ветропесчаного потока, в котором основным процессом является сальтация [6–8]. На сегодняшний день эти процессы недостаточно изучены [4, 9–12].

Измерения с высоким разрешением по размерам (диаметрам) дифференциальных счетных концентраций сальтирующих частиц [13] на опустыненной территории в Астраханской обл. показали, что в ветропесчаном потоке наряду с песчаной фракцией и минеральной пылью содержится фракция алевритовых частиц [14]. Отметим, что алевритовые частицы (размерами примерно от 10 до 100 мкм), как и песчаные, относятся к обломочным породам [15].

Показано, что наблюдаемые функции распределения сальтирующих частиц по размерам аппроксимируются суммой двух логнормальных распределений

частиц, относящихся к фракциям алевритовых частиц с модальным размером ~ 50 мкм и алеврит-песчаных частиц с модальным размером ~ 100 мкм [14, 16].

В [17] проанализированы результаты измерений суммарной концентрации сальтирующих частиц в ветропесчаном потоке на высотах 3, 11 и 15 см. С использованием опубликованных данных измерений суммарной концентрации сальтирующих частиц на высоте 6 см [16] построены вертикальные профили суммарных и дифференциальных счетных концентраций в слое сальтации на высотах от 3 до 15 см [17]. Оказалось, что вышеуказанные профили с удовлетворительной точностью аппроксимируются экспонентами.

В настоящей работе представлена эмпирическая модель стратификации (распределения по высоте) функции распределения сальтирующих алевритовых и песчаных частиц по размерам в ветропесчаном потоке на опустыненной территории с использованием параметризаций вертикальных профилей параметров функций распределения.

Проанализированы результаты измерений [12] распределения в приземном слое атмосферы на высотах от 12,5 см до 16 м крупных частиц размерами от 50 до 500 мкм на опустыненных территориях в Аральском регионе. Предложена модель вертикального распределения модального размера и полуширины функции распределения крупных частиц в слое атмосферы от 3 см до 16 м.

\* Геннадий Ильич Горчаков (gengor@ifaran.ru); Алексей Владимирович Карпов (karprov@ifaran.ru); Роман Альбертович Гушчин (gushchin@ifaran.ru); Олег Игоревич Даценко (datsenko@ifaran.ru); Дмитрий Владимирович Бунтов (dbunt@mail.ru).

## Данные измерений

Результаты работы основаны на данных измерений с помощью фотоэлектрического счетчика сальтирующих частиц [13] дифференциальных счетных концентраций алевритовых и песчаных частиц размерами от 30 до 330 мкм на опустыненной территории в Астраханской обл. 23 августа 2011 г. с 12:05 до 15:05. Измерения выполнялись с высоким разрешением по размерам  $\Delta \ln D = 0,1$  ( $D$  – диаметр частицы) и временным разрешением 1 с на высотах 3, 11 и 15 см. Данные измерений на уровне 7 см не использовались в связи с заметными погрешностями в соответствующем канале счетчика. Дифференциальные счетные концентрации сальтирующих частиц на высоте 6 см восстановлены с учетом полученных в [16] результатов. Отметим, что 23 августа 2011 г. с 11:05 до 16:06 (с учетом данных [16]) измерения проводились в условиях квазинепрерывной сальтации, причем пороговая скорость сальтации  $V_0 = 5,0$  м/с. Компоненты скорости ветра измерялись на высоте 2 м с временным разрешением 0,1 с при помощи акустической метеостанции «Метео-2», разработанной в ИОА СО РАН (г. Томск).

Также в работе проанализированы результаты измерений массовых потоков крупных частиц размерами от 50 до 500 мкм и параметров, характеризующих функцию распределения крупных частиц по размерам, включая модальный размер частиц, на опустыненных территориях в Казахстане [12] в приземном слое атмосферы на высотах 0,125; 0,25; 0,5; 1,0; 2,0; 4,0 и 16 м.

## Функция распределения сальтирующих частиц по размерам

По данным измерений 23 августа 2011 г. на опустыненной территории в Астраханской обл. дифференциальных счетных концентраций сальтирующих частиц в диапазоне размеров от 30 до 330 мкм были получены средние функции распределения

$$\bar{g}(D) = dN(D)/d \ln D,$$

где  $N(D)$  – накопленное с 12:05 до 15:05 распределение на высотах 3, 11 и 15 см. По аналогии с [14, 16] предложены аппроксимации  $\bar{g}(D)$  суммой двух логнормальных распределений:

$$\bar{g}(D) = \frac{N_1}{\sqrt{2\pi}v_1} \exp\left\{-\frac{\ln^2(D/D_1)}{2v_1^2}\right\} + \frac{N_2}{\sqrt{2\pi}v_2} \exp\left\{-\frac{\ln^2(D/D_2)}{2v_2^2}\right\},$$

где  $N_1$  и  $N_2$  – полные концентрации частиц алеврит-песчаной и алевритовой фракций;  $D_1$  и  $D_2$  – модальные размеры;  $v_1$  и  $v_2$  – полуширины указанных распределений.

На рис. 1 приведены нормированные на максимальные значения средние функции распределения

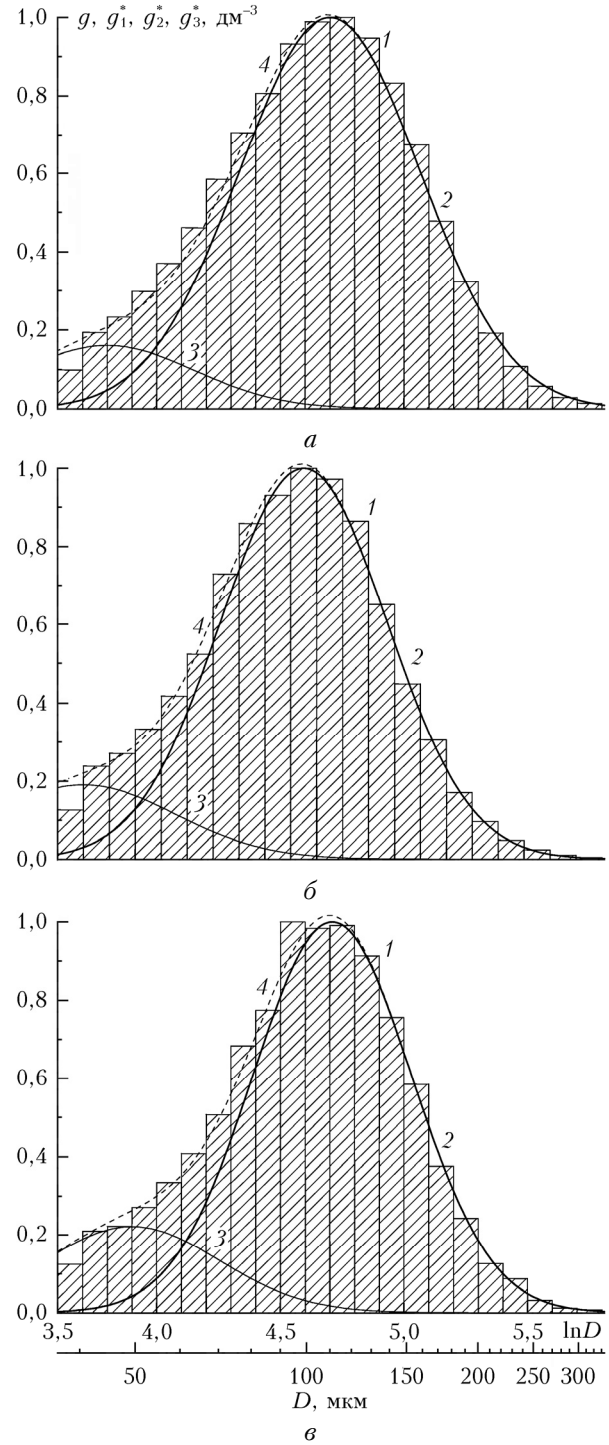


Рис. 1. Средняя нормированная функция распределения сальтирующих частиц по размерам (1) на высотах 3 (а), 11 (б) и 15 см (в); аппроксимирующие распределения для алеврит-песчаной (2) и алевритовой (3) фракций, а также их сумма (4)

$g(D)$  (1) частиц по размерам на высотах 3, 11 и 15 см и аппроксимирующие логнормальные распределения для алеврит-песчаной фракции  $g_1^*(D)$  (2) и алевритовой фракции  $g_2^*(D)$  (3), а также суммарные аппроксимирующие распределения  $g_3^*(D) = g_1^*(D) + g_2^*(D)$  (4).

Определены параметры аппроксимирующих распределений. На высоте 3 см модальный размер частиц алеврит-песчаной фракции  $D_1 = 110$  мкм, полуширина  $v_1 = 0,365$ , суммарная концентрация частиц  $N = 1055$  дм<sup>-3</sup> и доля частиц алевритовой фракции  $\delta_2 = N_2/N = 9,8\%$ .

На высотах 11 и 15 см  $D_1 = 104,6$  и  $100,5$  мкм,  $v_1 = 0,32$  и  $0,295$ ,  $N = 83,9$  и  $23,7$  дм<sup>-3</sup> соответственно.

В связи с ограниченной статистической обеспеченностью для алевритовой фракции частиц на всех трех высотах приняты  $D_2 = 45$  мкм и  $v_2 = 0,35$ .

Таким образом, для условий квазинепрерывной сальтации на трех высотах в ветропесчаном потоке на опустыненной территории определены параметры, которые полностью характеризуют аппроксимирующую функцию распределения.

Следует отметить дефицит существующей информации о вариациях функции распределения сальтирующих частиц по размерам в ветропесчаном потоке на опустыненных территориях. В обзоре [4] информация ограничивается нормированными функциями распределения массовой концентрации сальтирующих частиц по размерам для трех значений динамической скорости [18]. Указанные распределения (с модальными размерами ~ 250 мкм) близки друг другу и к соответствующему распределению частиц в песчаном грунте. В [19] представлены примеры результатов измерений функции распределения (медианный размер ~ 70 мкм) на высоте 20 и 30 см в двух пунктах пустыни Такла-Макан (разрешение по размерам  $\Delta \ln D \cong 0,25$  при  $D < 100$  мкм).

Измерения модального размера крупных частиц от 50 до 500 мкм на высотах от 0,125 до 16 м выполнены с использованием ситового анализа ( $\Delta \ln D \cong 0,35$ ) на опустыненных территориях Казахстана [12].

### Вертикальные профили параметров функции распределения сальтирующих частиц по размерам

Предложенные аналитические представления функции распределения позволили восстановить вертикальные профили параметров логнормальных распределений с учетом изменчивости счетных концентраций сальтирующих частиц на высоте 6 см [16].

Анализ показал [17, 20], что вертикальный профиль суммарной концентрации сальтирующих частиц в диапазоне высот от 3 до 15 см аппроксимируется экспоненциальным распределением по высоте

$$N(z) = N_0 \exp(-z/z^*),$$

где  $N_0 = 2725$  дм<sup>-3</sup>;  $z$  — высота,  $z^* = 3,16$  см — масштаб высоты.

Отметим, что в ряде работ параметр  $z^*$  называют толщиной или высотой слоя сальтации. Логарифмический градиент концентрации (ЛГК) [17]:

$$\gamma_N = d \ln N(z) / dz = -z^{-1} = -0,316 \text{ см}^{-1}.$$

Профиль концентрации частиц алевритовой фракции также описывается экспоненциальной функцией (прямая 1 на рис. 2)

$$N_2(z) = 260 \exp\{-0,306z\}.$$

Для сравнения на рис. 2 показаны вертикальные профили дифференциальных счетных концентраций частиц [17] размерами 47, 105 и 156 мкм, для которых  $\gamma_N = -0,30; -0,314; -0,347 \text{ см}^{-1}$ . Различие значений ЛГК для  $N_2$  и счетной концентрации частиц размером 47 мкм объясняется осреднением по спектру размеров алевритовой фракции частиц при определении  $N_2$ .

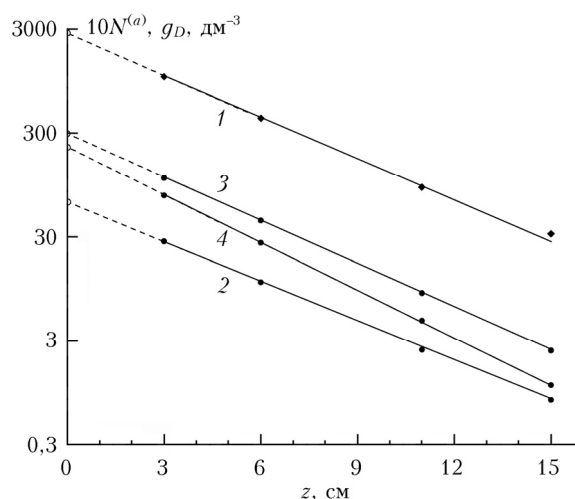


Рис. 2. Вертикальные профили суммарной концентрации частиц алевритовой фракции (1) и дифференциальных счетных концентраций сальтирующих частиц размерами 47 (2), 105 (3) и 156 мкм (4) по данным измерений 23 августа 2011 г. с 12:05 по 15:05 на опустыненной территории в Астраханской обл.

Зависимость доли частиц алевритовой фракции  $\delta_2$  (в процентах) от высоты показана на рис. 3 (прямая 1).

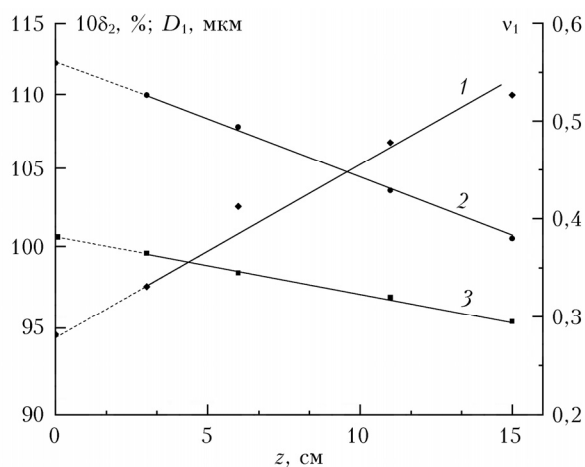


Рис. 3. Вертикальные профили доли концентрации частиц алевритовой фракции (1), модального размера (2) и полуширины (3) алеврит-песчаной фракции сальтирующих частиц

Параметр  $\delta_2$  в первом приближении является линейной функцией высоты:

$$\delta_2 = 9,5 + 0,11z.$$

Вертикальный профиль модального размера алеврит-песчаной фракции в диапазоне высот от 3 до 15 см можно восстановить с помощью экспоненциальной

$$D_1(z) = 112 \exp\{-0,0075z\}$$

или линейной функции высоты (прямая 2 на рис. 3)

$$D_1 = 112 - 0,84z.$$

Полуширина распределения по размерам алеврит-песчаной фракции также является линейной функцией высоты (прямая 3 на рис. 3):

$$v_1 = 0,38 - 0,0056z.$$

С учетом полученных ранее результатов измерений в ветровых каналах и на опустыненных территориях экстраполируем полученные выше аппроксимации на диапазон высот от 0 до 3 см [21–23]. Такая экстраполяция позволяет, в частности, получить оценку полного содержания частиц в слое сальтации

$$Q = N_1 z^* = 8,6 \text{ см}^{-2} = 860 \text{ дм}^{-2}.$$

## Вертикальное распределение крупных частиц в приземном слое атмосферы на опустыненных территориях

Благодаря турбулентной диффузии алевритовые и песчаные частицы распространяются в приземном слое атмосферы (ПСА). Эффективность диффузии определяется отношением скорости сухого осаждения [24] к скорости трения (динамической скорости [25]). Согласно экспериментальным данным [12] и теоретическим представлениям [24, 26] профили концентрации и массового потока частиц в ПСА описываются степенными функциями.

В [12] содержится ограниченная информация о вертикальных профилях параметров функции распределения крупных частиц в приземном слое атмосферы. На рис. 4 приведены результаты определения модального размера крупных частиц  $D_0$  по данным 1984 и 1998 гг. Предложены следующие соотношения для восстановления зависимости модального размера (в микронах) от высоты (сплошные линии):

$$D_0 = 79 - 5,0 \ln z \quad (1984 \text{ г.})$$

и

$$D_0 = 78 - 3,4 \ln z \quad (1998 \text{ г.}).$$

На рис. 4 также показана полученная нами зависимость от высоты (в слое сальтации) модального размера для алеврит-песчаной фракции. Различия между значениями  $D_1$  и  $D_0$  вблизи подстилающей поверхности обусловлены различиями гранулометрического состава алеврит-песчаного грунта на опус-

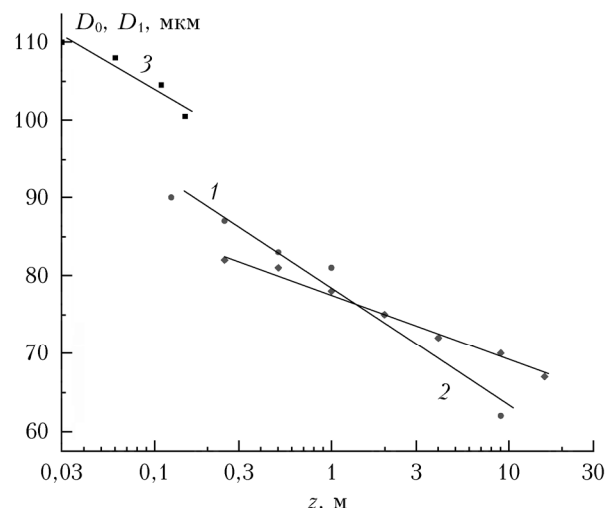


Рис. 4. Вертикальные профили модального размера крупных частиц в приземном слое атмосферы на высотах от 0,125 до 16 м на опустыненных территориях в Аральском регионе по данным измерений за 1984 (1) и 1998 гг. (2) и вертикальный профиль модального размера для алеврит-песчаной фракции в слое сальтации (3) по данным измерений на опустыненной территории в Астраханской обл.

тыненных территориях. Поэтому при экстраполяции на приземный слой атмосферы нашей модели вертикального профиля модального размера частиц можно применить скорректированное распределение 1984 г. для диапазона высот от 3 см до 16 м:

$$D_m = K_m (79 - 5 \ln z),$$

где  $K_m = 1,16$ .

Погрешности оценки полуширины распределения оказались сравнительно большими. Отметим только, что в 1984 г. полуширина  $v$  снижалась примерно до 0,14 на высоте 16 м. С учетом наших данных для слоя сальтации и данных [12] для оценки вертикального распределения полуширины в слое от 3 см до 16 м применима аппроксимация

$$v = 0,25 - 0,036 \ln z.$$

Для количественной оценки вертикального распределения концентрации крупных частиц в приземном слое атмосферы, согласующегося с предложенной нами моделью вертикального распределения частиц в слое сальтации, необходим дополнительный анализ.

## Заключение

Разработана модель высотного хода (стратификации) функции распределения по размерам сальтирующих алевритовых и песчаных частиц на опустыненной территории по данным измерений дифференциальных счетных концентраций частиц.

Функции распределения частиц по размерам в нижнем и верхнем слоях сальтации аппроксимированы суммой двух логнормальных распределений.

Построены вертикальные профили параметров распределения алеврит-песчаной и алевритовой фракций ветропесчаного потока.

Получены зависимости от высоты счетной концентрации и доли частиц алевроитовой фракции, а также медианного размера и полуширины алевроит-песчаной фракции.

По опубликованным данным получена зависимость от высоты (0,125–16 м) модального размера крупных частиц.

Предложена аппроксимация вертикального профиля модального размера частиц для диапазона высот от 3 см до 16 м, а также профиля полуширины.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 19-05-00758).

1. *Teegen I., Lacis A., Fung I.* The influence on climate forcing of numeral aerosols from disturbed soils // *Nature*. 1996. V. 380. P. 419–422.
2. *Woodward S.* Modeling the atmospheric life cycle and radiative impact of mineral dust in the Halley Centre climate model // *J. Geophys. Res.* 2001. V. D106. P. 18155–18106.
3. *Zi F., Vogelmann A., Ramanathan V.* Saharan dust aerosol radiative forcing measurement from space // *J. Clim.* 2004. V. 17. P. 2558–2571.
4. *Kok J.F., Parteli E.I.R., Michaels T.I., Bou Karam D.* The physics of the wind-blown sand and dust // *Rep. Prog. Phys.* 2012. V. 75. P. 1–119.
5. *Mahovald 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 Res.* 2014. V. 15. P. 53–71.
6. *Gillette D.A.* On the production of soil wind erosion having the potential for long range transport // *J. Rech. Atmos.* 1974. V. 8. P. 734–744.
7. *Shao Y., Raupach M.R., Findlater D.A.* Effect of saltation bombardment on the entrainment of dust by wind // *J. Geophys. Res.* 1993. V. D98. P. 12719–12726.
8. *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. D102. P. 11239–11249.
9. *Bagnold R.A.* The Physics of Blown Sand and Desert Dunes. London: Methuen, 1941. 265 p.
10. *Shao Y.* Physics and Modeling of Wind Erosion. New York: Springer, 2000. 393 p.
11. *Zheng X.* Mechanics of Wind Blown Sand Movements. Berlin: Springer-Verlag, 2009. 290 p.
12. *Семенов О.Е.* Введение в экспериментальную метеорологию и климатологию песчаных бурь. Алматы: КазНИИЭК, 2011. 580 с.
13. *Бунтов Д.В., Гуцин Р.А., Даценко О.И.* Четырехканальный фотоэлектрический счетчик сальтирующих песчинок // *Оптика атмосфер. и океана*. 2018. Т. 31, № 6. С. 485–488; *Buntov D.V., Gushchin R.A., Datsenko O.I.* Four-channel photoelectric counter of saltating sand particles // *Atmos. Ocean. Opt.* 2018. V. 31, N 5. P. 548–551.
14. *Горчаков Г.И., Бунтов Д.В., Карпов А.В., Копейкин В.М., Мирсаитов С.Ф., Гуцин Р.А., Даценко О.И.* Алевроитовая фракция сальтирующих частиц в ветропесчаном потоке на опустыненной территории // *Докл. РАН. Науки о Земле*. 2019. Т. 488, № 2. С. 193–196.
15. *Pettijohn F.G.* Sedimentary Rocks. New York: Harper, 1957. 526 p.
16. *Горчаков Г.И., Бунтов Д.В., Карпов А.В., Копейкин В.М., Мирсаитов С.Ф., Гуцин Р.А., Даценко О.И.* Влияние ветра на распределение сальтирующих частиц по размерам // *Оптика атмосфер. и океана*. 2019. Т. 32, № 10. С. 848–855; *Gorchakov G.I., Buntov D.V., Karpov A.V., Kopeikin V.M., Mirsaitov S.F., Gushchin R.A., Datsenko O.I.* Wind effect on the size distribution of saltating particles // *Atmos. Ocean. Opt.* 2020. V. 33, N 2. P. 198–205
17. *Горчаков Г.И., Карпов А.В., Гуцин Р.А., Даценко О.И., Бунтов Д.В.* Вертикальные профили концентраций сальтирующих частиц на опустыненной территории // *Докл. РАН. Науки о Земле*. 2021. Т. 496, № 2. С. 211–214.
18. *Namicas S.Z.* Field measurement and numerical modeling of aeolian massflux distribution on a sandy beach // *Sedimentology*. 2003. V. 50. P. 303–326.
19. *Mikami M., Yamada Y., Ishizuka M., Ishimaru T., Gao W., Zeng F.Y.* Measurement of saltation process over Gobi and sand dunes in the Taklimakan desert, China, with newly developed sand particle counter // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110, N D18. P. S02.
20. *Gorchakov G.I., Buntov D.V., Karpov A.V., Kopeikin V.M., Mirsaitov S.F., Gushchin R.A., Datsenko O.I.* Vertical profile of saltating particle concentration over semidesert area // *IOP Conf. Ser.* 2020. DOI: 10.1088/1755-1315/606/1/012015.
21. *Liu X, Dong Z.* Experimental investigation of the concentration profile of a blowing sand cloud // *Geomorphology*. 2004. V. 60. P. 371–381.
22. *Creysse M., Dupont P., El Moctar A., Valance A., Cantat I., Jenkins J.T., Pasini J.M., Rasmussen K.R.* Saltating particles in a turbulent boundary layer: Experiment and theory // *J. Fluid Mech.* 2009. V. 625. P. 47–74.
23. *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. АН*. 2013. Т. 452, № 6. С. 669–676
24. *Баренблатт Г.И., Голицын Г.С.* Локальная структура развитых пыльных бурь. М.: МГУ, 1973. 44 с.
25. *Обухов А.М.* Турбулентность и динамика атмосферы. Л.: Гидрометеониздат, 1988. 414 с.
26. *Прандтль Л.* Гидроаэромеханика. М.: Иностранная литература, 1995. 576 с.

*G.I. Gorchakov, A.V. Karpov, R.A. Gushchin, O.I. Datsenko, D.V. Buntov.* **Stratification of aleurite and sand particle size distribution in windsand flux over desertified areas.**

Empirical model of the saltating aleurite and sand particle size distribution has been developed based on the measurements of the number differential concentration in the size range from 30 to 330  $\mu\text{m}$  using size distribution approximation by sum of two lognormal distributions. Approximations of the vertical profiles of distribution parameters have been derived for the layer from 0 to 15 cm. Vertical profiles of the modal size of the large particle in the saltation layer from 3 to 15 cm and in the surface air layer from 0.125 to 16 m are compared with measurements in the Aral region.