

УДК 551.510

## ВЕРТИКАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ АЛЕВРИТОВЫХ И ПЕСЧАНЫХ ЧАСТИЦ В ВЕТРОПЕСЧАНОМ ПОТОКЕ НАД ОПУСТЫНЕННОЙ ТЕРРИТОРИЕЙ<sup>1</sup>

© 2021 г. Г. И. Горчаков<sup>a, \*</sup>, А. В. Карпов<sup>a, \*\*</sup>, Р. А. Гушчин<sup>a, \*\*\*</sup>,  
О. И. Даценко<sup>a, \*\*\*\*</sup>, Д. В. Бунтов<sup>a, \*\*\*\*\*</sup>

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

\*e-mail: gengor@ifaran.ru

\*\*e-mail: karpov@ifaran.ru

\*\*\*e-mail: gushchin@ifaran.ru

\*\*\*\*e-mail: datsenko@ifaran.ru

\*\*\*\*\*e-mail: dbunt@mail.ru

Поступила в редакцию 12.04.2021 г.

После доработки 07.05.2021 г.

Принята к публикации 09.06.2021 г.

По данным измерений на опустыненной территории в Астраханской обл. на высотах от 3 до 15 см в условиях квазинепрерывной сальтации 23.08.11 и 01.09.2011 определены функции распределения сальтирующих частиц по размерам в диапазоне от 30 до 330 мкм, построены вертикальные профили дифференциальных счетных концентраций частиц с размерами 47.0, 85.6, 104.6, 127.7 и 156.0 мкм, которые аппроксимированы экспонентами. Показано, что в нижнем слое сальтации толщиной около 9 см масштаб высоты и логарифмический градиент концентрации не зависят от скорости ветра. Установлено, что на высотах 11 и 15 см суммарная концентрация сальтирующих частиц связана нелинейными соотношениями со скоростью ветра в приземном слое атмосферы. Для диапазона изменения скорости ветра от 6 до 11.0 м/с построены вертикальные распределения концентрации сальтирующих частиц, которые аппроксимированы кусочно-экспоненциальными профилями суммарной концентрации частиц. Получена аналитическая зависимость от скорости ветра логарифмического градиента концентрации в верхнем слое сальтации. Разработана малопараметрическая модель вертикального распределения сальтирующих частиц в диапазоне высот от 0 до 15 см. Предложены аппроксимации зависимостей от размера частиц масштаба высоты для вертикальных профилей концентрации и массового потока сальтирующих частиц.

**Ключевые слова:** опустынивание, ветропесчаный поток, квазинепрерывная сальтация, сальтирующие алевритовые частицы, вертикальное распределение концентрации частиц, кусочно-экспоненциальная аппроксимация, масштаб высоты, логарифмический градиент концентрации, толщина нижнего слоя сальтации, малопараметрическая модель вертикального распределения концентрации

**DOI:** 10.31857/S0002351521050072

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В современную эпоху потепления климата в ряде регионов планеты возможно ускорение процессов опустынивания и аридизации [1, 2], что приведет к повышению содержания в атмосфере пылевого аэрозоля и усилению его радиационных эффектов. На опустыненных территориях основным механизмом эмиссии минерального пылевого аэрозоля является воздействие ветропесчаного потока на подстилающую поверхность (sandblast-

ing) [3, 4], в котором основным процессом является сальтация [5–10] – скачкообразное перемещение песчинок. В аридных регионах существенный вклад вносит конвективно обусловленный вынос пылевого аэрозоля в атмосферу [11–16].

По данным измерений на опустыненной территории в Астраханской обл. функции распределения сальтирующих частиц по размерам [17] с помощью фотоэлектрического счетчика [18] показано, что в ветропесчаном потоке кроме сальтирующих частиц песчаной фракции с размерами больше 100 мкм и фракции частиц минеральной пыли (пылевой аэрозоль) с размерами меньше примерно 10 мкм, которые в геологии относят к

<sup>1</sup> Статья подготовлена на основе устного доклада, представленного на Всероссийской конференции “Турбулентность, динамика атмосферы и климата”, посвященной памяти акад. А.М. Обухова (Москва, 10–12 ноября 2020 г.).

обломочным породам [19], присутствует алевритовая фракция сальтирующих частиц с размерами примерно от 30 до 100 мкм (алеваит также относится к обломочным породам [19]). Отметим, что в [9] в качестве примера показана траектория сальтирующей частицы с аэродинамическим диаметром около 65 мкм, полученная с использованием скоростной видеосъемки на опустыненной территории в Астраханской обл.

Большинство исследований механизмов сальтации и эмиссии пылевого аэрозоля выполнено в ветровых каналах [20–25], где невозможно адекватно воспроизвести все особенности взаимодействия атмосферы с песчаной подстилающей поверхностью.

Ветропесчаный поток на опустыненных территориях отличается аномально высокой электризацией [26–29]. Удельный заряд сальтирующих частиц может достигать  $+(50–60)$  мкКл/кг [10, 26, 29].

На интенсивность сальтации сильно влияют турбулентные и конвективные процессы в пограничном слое атмосферы [30–33]. Из [34, 35] следует, что турбулентность сильнее влияет на динамику сальтирующих алевритовых частиц (по сравнению с динамикой песчаных частиц), что обусловлено их меньшей инерционностью.

На процессы в ветропесчаном потоке также влияет образование ряби (рифелей) и мелкой ряби на подстилающей поверхности [8, 36–38], что может привести к возникновению квазипериодических вариаций интенсивности сальтации [9, 38]. Поэтому необходимы дальнейшие исследования процесса сальтации непосредственно на опустыненных территориях.

Целью настоящей работы является количественная характеристика вертикального распределения сальтирующих алевритовых и песчаных частиц в условиях квазинепрерывной или непережающей (almost non-intermittent) сальтации [39] на опустыненной территории при вариациях скорости ветра в приземном слое атмосферы по данным измерений функции распределения сальтирующих частиц по размерам или дифференциальных счетных концентраций сальтирующих частиц, включая (1) построение и аппроксимацию средних вертикальных профилей концентрации сальтирующих алевритовых и песчаных частиц, а также вертикального профиля суммарной концентрации, (2) анализ зависимостей от скорости ветра суммарной концентрации частиц в нижнем и верхнем слоях сальтации, (3) построение и аппроксимацию вертикального профиля суммарной концентрации сальтирующих частиц в верхнем и нижнем слоях сальтации для различных значений скорости ветра и (4) оценку толщины нижнего слоя сальтации. Предложена малопараметрическая модель вертикального распре-

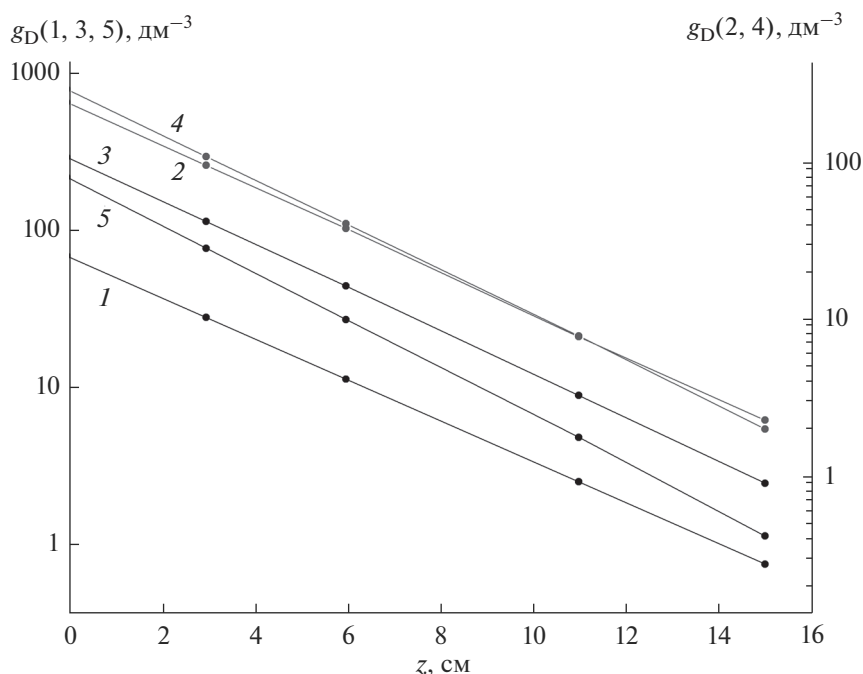
ления сальтирующих частиц в слое от 0 до 15 см, которая обобщает полученные в данной работе результаты. Предложены аппроксимации зависимостей от размера частиц параметров вертикального распределения концентрации и массового потока сальтирующих частиц с использованием опубликованных данных [22].

Следует отметить, что на вертикальное распределение сальтирующих частиц влияет режим сальтации [39] и эоловые формы рельефа или морфология подстилающей поверхности, включая дюны, барханы и рябь [7, 8, 37, 38]. В настоящей работе использованы данные измерений на опустыненной территории вблизи р. Волги с плоским рельефом без барханов и дюн и без растительности в период с 16.08 по 01.09.2011. Представлены результаты измерений 23.08.2011 и 01.09.2011 в условиях квазинепрерывной сальтации, которые можно сопоставить с результатами исследований сальтации в ветровых каналах [22–25].

## 2. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

В работе использованы результаты измерений с временным разрешением 1 с суммарной концентрации  $N$  и дифференциальных счетных концентраций сальтирующих частиц  $g(D) = dN(D)/d\ln D$ , где  $D$  – размер частицы и  $N(D)$  – накопленная концентрация частиц, в диапазоне размеров от 30 до 330 мкм с разрешением по размерам  $\Delta \ln D = 0.1$ , что соответствует изменению примерно на 10% в каждом интервале размеров, на высотах 3, 11 и 15 см с помощью фотоэлектрического счетчика сальтирующих частиц [18] на опустыненной территории в Астраханской обл. [17, 40] 23.08.2011 в период с 12:05 до 15:05. Данные измерений на высоте 7 см в рассматриваемый период не использовались в связи с погрешностями в работе соответствующего канала фотоэлектрического счетчика. При восстановлении вертикальных профилей концентраций сальтирующих частиц использовались данные измерений в периоды времени с 11:05 до 12:05 и с 15:06 до 16:06, когда проводились синхронные измерения для всех каналов счетчика [40] на высоте 6 см. Использовались также данные измерений для дифференциальных счетных концентраций сальтирующих частиц на высотах 3, 7, 15 см 01.09.2011 в период с 13:10 до 14:10.

В приземном слое атмосферы на высоте 2 м измерялись компоненты скорости ветра и температура воздуха с временным разрешением 0.1 с с помощью акустической метеостанции Метео-2 (Институт оптики атмосферы, г. Томск). Средние значения скорости ветра в приземном слое атмосферы в периоды проведения измерений 23.08 и 01.09.2011 были равны 7.55 и 8.05 м/с соответственно. Вероятность значений скорости ветра меньше пороговой скорости сальтации (5.0–5.1 м/с) в периоды проведения измерений не превышала 2%



**Рис. 1.** Зависимость от высоты дифференциальных счетных концентраций сальтирующих частиц с размерами 47.0 (1), 85.6 (2), 104.6 (3), 127.7 (4) и 156.0 мкм (5) по данным измерений 23.08.11 в период с 12:05 по 15:05 на опустыненной территории в Астраханской обл.

[33, 40], что достаточно для реализации режима квазинепрерывной сальтации.

В [22] для пяти образцов песчаного грунта с средними размерами песчинок от 150 до 550 мкм в ветровом канале выполнены измерения вертикальных распределений концентрации и массового потока сальтации. Полученные в [22] результаты использованы нами при аппроксимации зависимостей от размера частиц масштаба высоты для указанных распределений.

### 3. ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ПРОФИЛИ КОНЦЕНТРАЦИЙ АЛЕВРИТОВЫХ И ПЕСЧАНЫХ ЧАСТИЦ

В [17] по данным измерений функции распределения сальтирующих частиц по размерам на опустыненной территории в Астраханской обл. 23.08.2011 в период с 12:05 до 15:05 получено вертикальное распределение суммарной концентрации частиц  $N(z)$ , где  $z$  – высота, которое с удовлетворительной точностью аппроксимируется экспонентой в диапазоне высот от 3 до 15 см

$$N(z) = N_0 \exp\{-z/z_N\}, \tag{1}$$

где  $N_0 = 2725 \text{ дм}^{-3}$ , масштаб высоты  $z_N = 3.16 \text{ см}$  и логарифмический градиент концентраций (ЛГК)  $\gamma_N = d \ln N(z)/dz = -z_N^{-1} = -0.316 \text{ см}^{-1}$ .

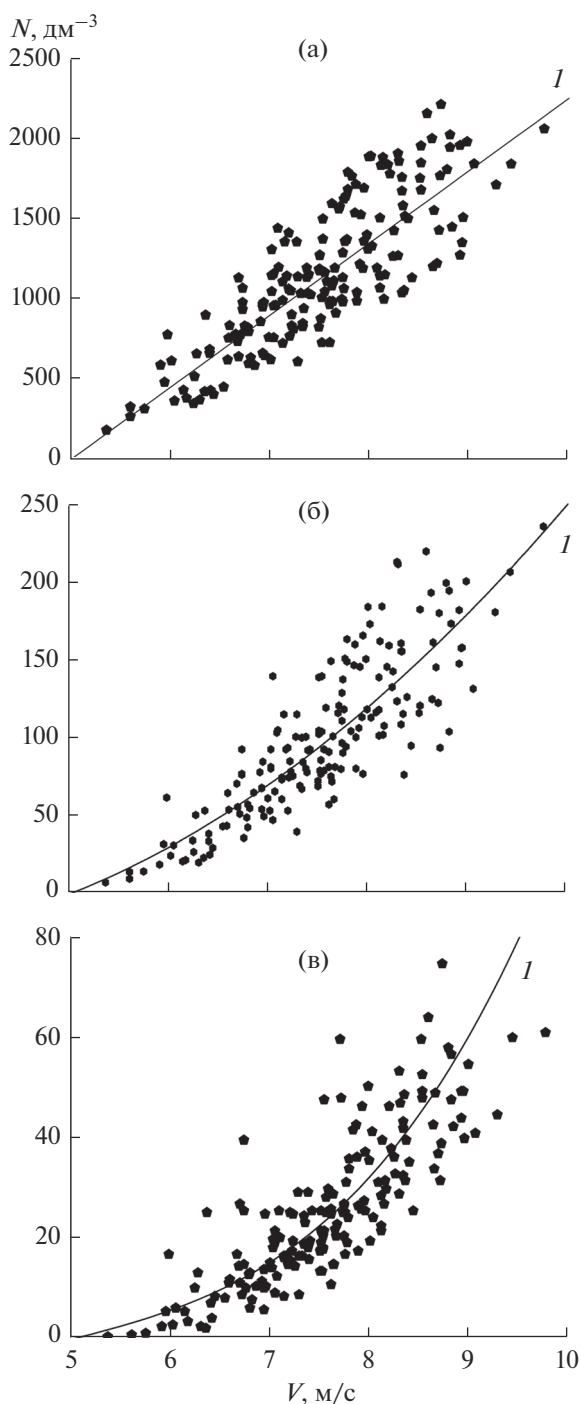
В ряде работ  $z_N$  называют толщиной слоя сальтации. Отметим, что полная толщина слоя сальтации существенно больше  $z_N$ .

По данным измерений функции распределения частиц по размерам  $g(D)$  23.08.2011 в указанный период времени на высоте 3, 11 и 15 см построены вертикальные профили дифференциальных счетных концентраций частиц (рис. 1) с средними размерами 47.0 (1), 85.6 (2), 104.6 (3), 127.7 (4) и 156.0 мкм (5). Использованы также полученные ранее [40] зависимости концентраций сальтирующих на высоте 6 см частиц разных размеров от скорости ветра в приземном слое атмосферы. Погрешность привязки шкалы фотоэлектрического счетчика частиц в абсолютных единицах при  $D = 100 \text{ мкм}$  составляет примерно  $\pm 5 \text{ мкм}$ . Подробные значения центров интервалов частиц (с шириной  $\Delta \ln D = 0.1$ ) приведены для характеристики используемого разбиения диапазона размеров частиц на интервалы с указанной выше шириной.

Полученные вертикальные распределения дифференциальных счетных концентраций  $g(D)$  с удовлетворительной точностью аппроксимируются экспоненциальными профилями [41]

$$g^*(z, D) = g_0^*(D) \exp\{-z/z_D\} \tag{2}$$

с ЛГК, равными 0.30 (1), 0.307 (2), 0.314 (3), 0.327 (4), 0.347 (5)  $\text{см}^{-1}$  для значений  $D$  от 47.0 до 156.0 мкм.



**Рис. 2.** Корреляционные связи со скоростью ветра в приземном слое атмосферы концентраций сальтирующих частиц на высотах 3 см (а), 11 см (б) и 15 см (в) (*I*-аппроксимации).

Анализ показал, что зависимость ЛГК  $\gamma_D(D) = -z_D^{-1}$  от размера частиц  $D$  аппроксимируется соотношением

$$\gamma_D(D) = -0.30 - 0.075(\ln D - 3.85)^3. \quad (3)$$

Максимальное значение масштаба высоты  $z_D$  достигается при  $D = 47$  мкм, что может быть обусловлено влиянием турбулентных пульсаций вертикальной компоненты скорости ветра на траектории сальтирующих частиц [42]. При одинаковых концентрациях вблизи подстилающей поверхности алевритовых частиц с размером 47 мкм и песчаных частиц с размером 156 мкм на высоте 15 см концентрация алевритовых частиц в два раза больше концентрации песчаных частиц.

#### 4. СТАТИСТИЧЕСКИЕ СВЯЗИ КОНЦЕНТРАЦИЙ ЧАСТИЦ В НИЖНЕМ И ВЕРХНЕМ СЛОЯХ САЛЬТАЦИИ СО СКОРОСТЬЮ ВЕТРА

В [40] показано, что суммарная концентрация сальтирующих частиц на высоте 6 см связана соотношением линейной регрессии со скоростью ветра в приземном слое атмосферы (на высоте 2 м)  $N_6 = K_6(V - V_0)$ , где  $V$  – скорость ветра,  $V_0$  – пороговая скорость сальтации и  $K_6$  – коэффициент пропорциональности.

Анализ данных измерений концентрации частиц  $N_3$  на высоте 3 см показал, что 23.08.2011 в период с 12:05 до 15:05 имела место линейная корреляция между  $N_3$  и скоростью ветра на высоте 2 м (рис. 2а), которая описывается соотношением линейной регрессии.

$$N_3 = K_3(V - V_0), \quad (4)$$

где  $K_3 = 415 \text{ дм}^{-3} \text{ м}^{-1} \text{ с}$  и  $V_0 = 5.0 \text{ м/с}$  (коэффициент корреляции между  $N_3$  и  $V$  равен 0.83).

Корреляционная связь между концентрацией частиц на высоте 11 см и разностью  $V - V_0$  оказалась нелинейной (рис. 2б)

$$N_{11} = K_{11}^{(1)}(V - V_0) + K_{11}^{(2)}(V - V_0)^2, \quad (5)$$

где  $K_{11}^{(1)} = 23.9 \text{ дм}^{-3} \text{ м}^{-1} \text{ с}$  и  $K_{11}^{(2)} = 3.5 \text{ дм}^{-3} \text{ м}^{-2} \text{ с}^2$ .

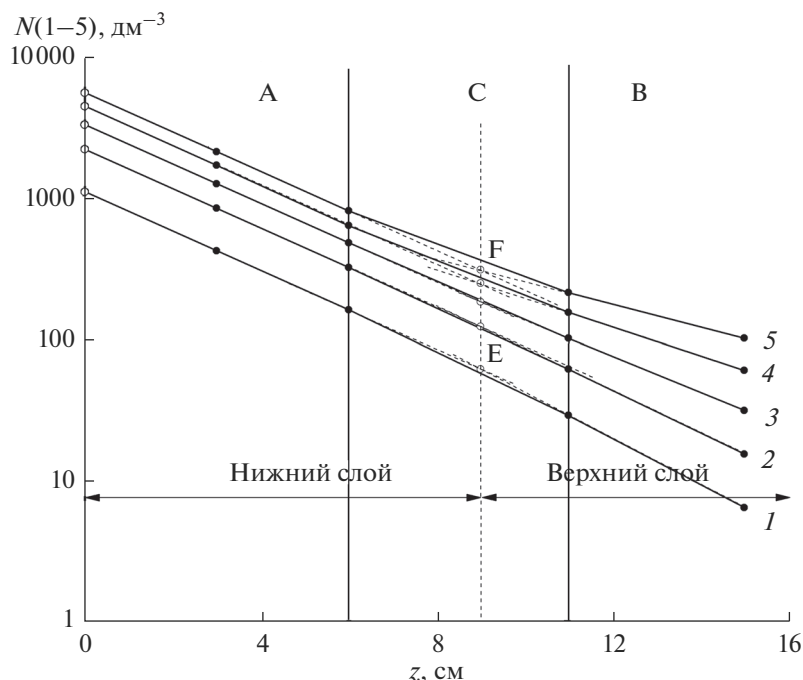
Нелинейная связь между концентрацией сальтирующих частиц на высоте 15 см и разностью  $V - V_0$  (рис. 2в) заметно отличается от корреляционной связи (5)

$$N_{15} = K_{15}^{(1)}(V - V_0) + K_{15}^{(2)}(V - V_0)^3, \quad (6)$$

где  $K_{15}^{(1)} = 5.2 \text{ дм}^{-3} \text{ м}^{-1} \text{ с}$  и  $K_{15}^{(2)} = 0.625 \text{ дм}^{-3} \text{ м}^{-3} \text{ с}^3$ .

В частности, вклад в  $N_{15}$  нелинейной составляющей при  $V = 9.0 \text{ м/с}$  достигает 65%.

Из вышеизложенного следует, что в верхнем слое сальтации на траектории сальтирующих частиц сильно влияет турбулентность, и это влияние растет с увеличением высоты и скорости ветра, что неизбежно приводит к зависимости формы вертикальных профилей концентрации сальтирующих частиц от скорости ветра.



**Рис. 3.** Вертикальные профили суммарной концентрации сальтирующих частиц для значений скорости ветра в приземном слое атмосферы 6.0 (1), 7.0 (2), 8.0 (3), 9.0 (4) и 10.0 м/с (5) по данным измерений 23.08.11 в период с 12:05 по 15:05 на опустыненной территории в Астраханской обл. (Е и F – точки пресечения экстраполяций вертикальных профилей концентрации в слоях А и В для значений скорости ветра 10.0 и 6.0 м/с).

### 5. ВЛИЯНИЕ ВЕТРА НА ВЕРТИКАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ САЛЬТИРУЮЩИХ ЧАСТИЦ

Полученные нами зависимости от скорости ветра концентраций частиц в нижнем и верхнем слоях сальтации позволили восстановить вертикальные распределения сальтирующих частиц в диапазоне высот от 3 до 15 см при изменении скорости ветра от 5.5 до 10.0 м/с по данным измерений 23.08.2011 в период от 12:05 до 15:05 и от 5.5 до 11.0 м/с по данным 01.09.2011 в период от 13:10 до 14:10.

На рис. 3 показаны вертикальные распределения концентраций сальтирующих частиц для значений скорости ветра в приземном слое атмосферы 6.0 (1), 7.0 (2), 8.0 (3), 9.0 (4) и 10.0 м/с (5), построенные по данным измерений 23.08.2011, на высотах 3, 11 и 15 см (с использованием информации о зависимости скорости ветра концентрации частиц на высоте 6 см [40]), а на рис. 4 аналогичные распределения концентрации для значений скорости ветра 6.0 (1), 7.0 (2), 8.0 (3), 9.0 (4), 10.0 (5) и 11.0 (6) по данным измерений 01.09.2011 на высотах 3, 7, 11 и 15 см.

На рис. 3 выделены диапазоны высоты от 0 до 6 см (А), от 11 до 15 см (В) и от 6 до 11 см (С), а на рис. 4 диапазоны от 0 до 7 см (А), от 11 до 15 см (В) и от 7 до 11 см (С).

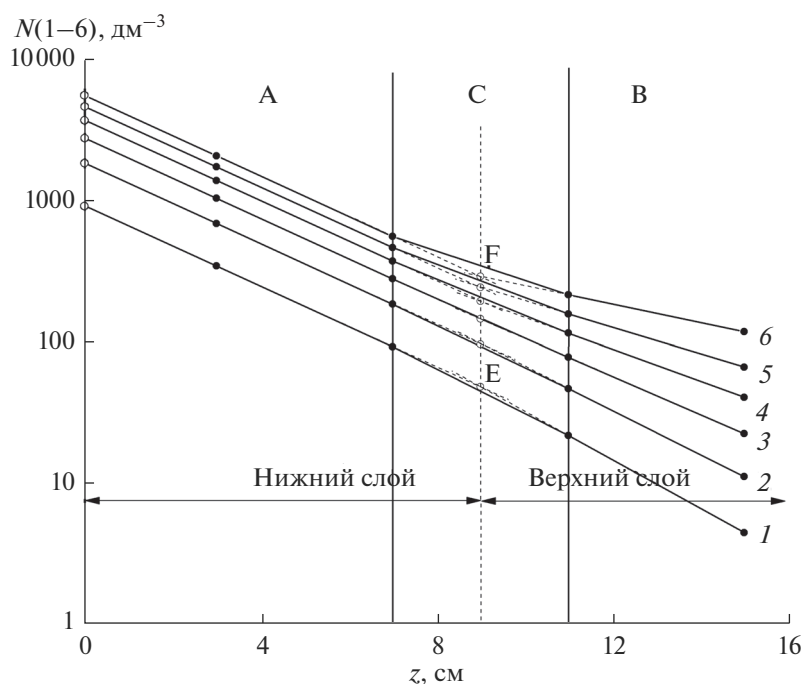
Анализ данных измерений показал, что в слое от 3 до 6 см ЛГК ( $\gamma_A$ ) в пределах погрешности измерений не зависит от скорости ветра и равен  $-0.315 \text{ см}^{-1}$ , что практически совпадает с ЛГК для полной концентрации сальтирующих частиц ( $-0.316 \text{ см}^{-1}$ ) [33]. Согласно данным измерений 01.09.2011 ЛГК в слое от 3 до 7 см  $\gamma_A = -0.328 \text{ см}^{-1}$  [41].

Учитывая линейную зависимость концентрации частиц в нижнем слое сальтации от скорости ветра [40, 41], вертикальное распределение частиц в слое А будем аппроксимировать экспоненциальным профилем

$$N_A(z, V) = K_A(V - V_0) \exp\{\gamma_A z\}, \tag{7}$$

где  $K_A = 1070$  и  $788 \text{ дм}^{-3} \text{ м}^{-1}$  с для 23.08 и 01.09.2011 соответственно.

Независимость масштаба высоты и ЛГК от скорости ветра и динамической скорости была ранее установлена по данным измерений в ветровых каналах на высотах от 0.5 до 5.0 см [25] и от 1 до 10 см [22], а также по данным полевых измерений [43]. В нашей работе [9] по данным скоростной видеосъемки в диапазоне высот от 2 до 38 мм (с разрешением по высоте 2 мм) продемонстрирована пригодность экспоненциальной аппроксимации вертикального профиля концентрации сальтирующих частиц вблизи подстилающей поверхности. Таким образом, полученные нами про-



**Рис. 4.** Вертикальные профили суммарной концентрации сальтирующих частиц для значений скорости ветра в приземном слое атмосферы 6.0 (1), 7.0 (2), 8.0 (3), 9.0 (4), 10.0 (5) и 11.0 м/с (6) по данным измерений 01.09.2011 в период с 13:10 по 14:10 на опустыненной территории в Астраханской обл. (E и F – точки пересечения экстраполяций вертикальных профилей концентрации в слоях A и B для значений скорости ветра 11.0 и 6.0 м/с).

фили допускают экспоненциальную экстраполяцию в диапазоне высот от 0 до 3 см.

Нетрудно видеть, что в слое B (от 11 до 15 см) ЛГК зависит от скорости ветра. Вертикальные распределения концентрации частиц в этом слое можно аппроксимировать экспонентами

$$N_B(z, V) = N_0(V) \exp\{\gamma_B(V)z\}. \quad (8)$$

На рис. 5 представлены результаты определения  $\gamma_B$  по данным измерений 23.08 (1) и 01.09.2011 (2) для  $V$  от 6.0 до 11.0 м/с (с шагом 1 м/с) и с учетом результатов, полученных в [41], для  $V$  от 5.5 до 10.5 м/с (с шагом 1 м/с). Полученные зависимости (рис. 5) аппроксимируются линейными функциями

$$\gamma_B(V) = \gamma_0 + k_\gamma(V - V_0), \quad (9)$$

где  $\gamma_0 = -44$  (1) и  $-46 \text{ м}^{-1}$  (2),  $k_\gamma = 45 \text{ м}^{-2} \text{ с}$  и  $V_0 = 5.0 \text{ м/с}$ . В среднем  $\gamma_B = -45 \text{ м}^{-1} = -0.45 \text{ см}^{-1}$ . Отметим, что погрешность определения  $\gamma_B$  увеличивается при  $V$  близких к  $V_0$ .

При восстановлении вертикальных профилей концентрации сальтирующих частиц целесообразно использовать кусочно-экспоненциальную аппроксимацию, взяв за основу экспоненциальные аппроксимации профилей в слоях A и B. Экстраполируя указанные аппроксимации в слой C, найдем точки пересечения для выбранных нами значений скорости ветра (в частности, точки E и

F на рис. 3 и 4), которые находятся на уровне примерно 9 см для 23.08.2011 (рис. 3) и на уровне 8.5–9 см для 01.09.2011 (рис. 4). Это позволяет выделить нижний слой сальтации толщиной 9 см с постоянным ЛГК  $\gamma_{hw} = \gamma_A$  и верхний слой сальтации, расположенный выше 9 см с ЛГК, зависящим от скорости ветра,  $\gamma_{up}(V) = \gamma_B(V)$ .

В верхнем слое сальтации профиль концентрации аппроксимируется экспонентой

$$N_{up}(z, V) = K_A(V - V_0) \exp(9\gamma_A) \exp\{\gamma_B(V)(z - 9)\}. \quad (10)$$

Совокупность аппроксимаций (7), (9) и (10) представляет собой малопараметрическую модель вертикального распределения концентрации сальтирующих частиц для диапазона изменения скорости ветра от  $V_0$  до 11.0 м/с.

## 6. ЗАВИСИМОСТЬ ОТ РАЗМЕРА ЧАСТИЦ МАСШТАБА ВЫСОТЫ ДЛЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ КОНЦЕНТРАЦИИ И МАССОВОГО ПОТОКА САЛЬТАЦИИ

Вертикальные распределения концентрации и массового потока сальтирующих частиц были изменены в ветровом канале на высотах от 1 до 10 см для пяти образцов песчаного грунта с размерами частиц 100–200, 200–300, 300–400, 400–500 и 500–600 мкм

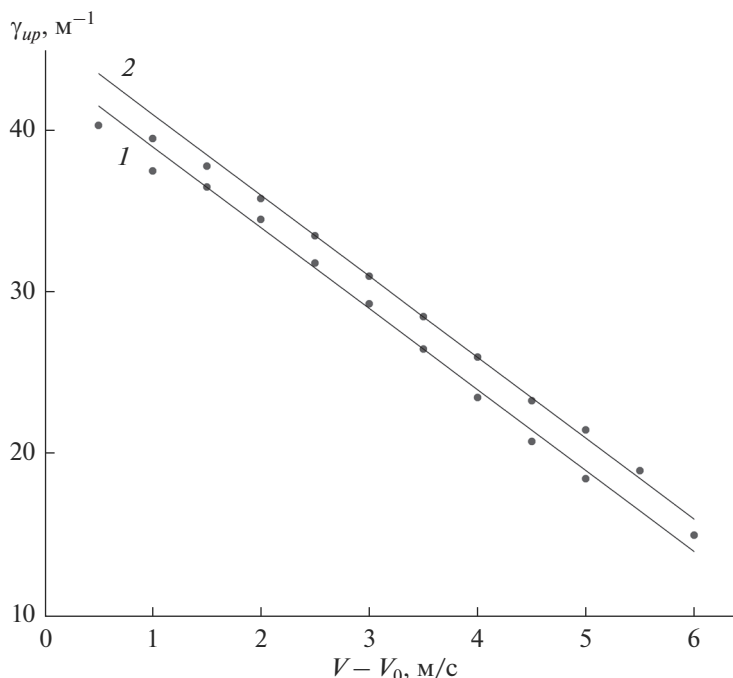


Рис. 5. Логарифмический градиент концентрации частиц в верхнем слое сальтации по данным измерений 23.08.2011 (1) и 01.09.2011 (2).

(средние размеры 150, 250, 350, 450 и 550 мкм) и для пяти значений скорости воздушного потока на оси канала 10, 12, 14, 16 и 18 м/с [22] (динамическая скорость не определялась).

Вертикальные профили массовых концентраций и массовых потоков частиц аппроксимировались экспонентами с масштабами высоты  $z_m$  и  $z_f$  соответственно. Отметим, что для отдельных профилей наблюдались заметные отклонения от экспоненциальных аппроксимаций. Среднее значение масштаба высоты  $z_m$  для профиля концентрации увеличивается примерно от 4 до 7 см с ростом среднего размера частиц от 150 до 550 мкм.

Для описания зависимости  $z_m(D)$  нами предложена линейная аппроксимация (1 на рис. 6).

$$\ln z_m = 0.4 \ln D - 0.59, \tag{11}$$

которой соответствует степенная функция  $z_m = 3.24D^{0.4}$ . Экстраполяция полученной зависимости в точку  $D = 100$  мкм приводит к значению  $z_m = 3.45$  см, которое примерно на 10% больше масштаба высоты для профиля суммарной концентрации сальтирующих частиц на опустыненной территории в Астраханской обл. по данным измерений 23.08.2011 ( $z_N = 3.16$  см).

Представленная на рис. 6 зависимость масштаба высоты  $z_f$  для профиля массового потока сальтирующих частиц аппроксимируется соотношением

$$\ln z_f = 0.8 \ln D - 1.92 \tag{12}$$

или соответствующей степенной функцией  $z_f = 0.147D^{0.8}$ . Для  $D = 100$  мкм масштаб высоты  $z_f = 5.85$  см, который превышает  $z_m$  для  $D = 100$  мкм в 1.7 раза.

Полученные аппроксимации позволяют получить соотношение между масштабами высоты  $z_m$  и  $z_f$ :

$$\ln z_f = 2 \ln z_m - 0.74. \tag{13}$$

Соотношение (13) можно использовать для оценки вертикального распределения массового потока сальтирующих частиц.

### 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнено экспериментальное исследование вертикального распределения сальтирующих алевритовых и песчаных частиц в ветропесчаном потоке. По данным измерений на опустыненной территории в Астраханской обл. в условиях квазинепрерывной сальтации на высотах от 3 до 15 см определены функции распределения сальтирующих частиц по размерам в диапазоне от 30 до 330 мкм, восстановлены вертикальные распределения счетных концентраций частиц с размерами 47, 85.6, 104.6, 127.7 и 156 мкм, которые с удовлетворительной точностью аппроксимируются экспоненциальными профилями. Предложена аппроксимация зависимости от размера частиц в диапазоне от 47 до 156 мкм логарифмического

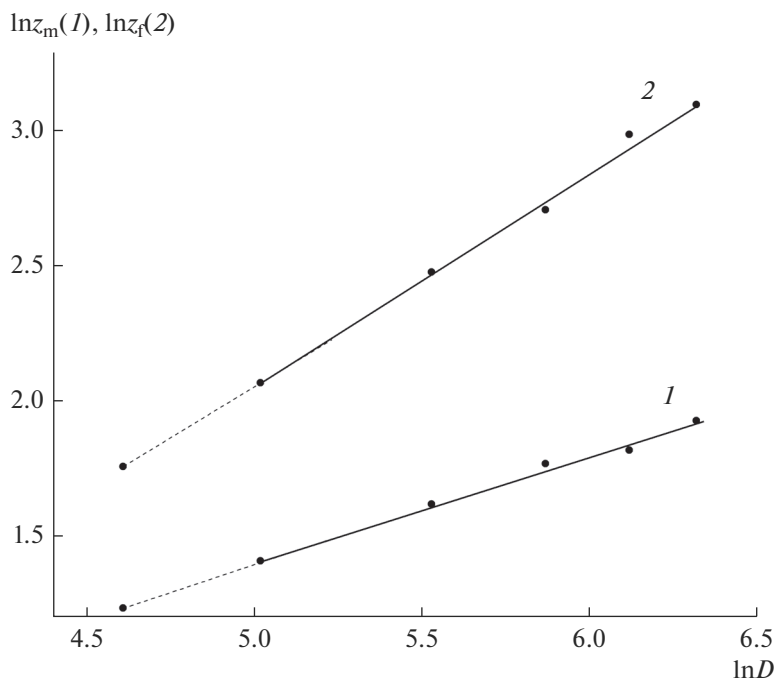


Рис. 6. Зависимости от размера частиц масштаба высоты для концентрации (1) и массового потока сальтации (2).

градиента концентрации. Отмечено, что концентрация песчаных частиц с размером 156 мкм в слое от 0 до 15 см убывает в два раза быстрее концентрации алевритовых частиц с размером 47 мкм.

Проанализированы статистические связи между скоростью ветра в приземном слое атмосферы на высоте 2 м и суммарной концентрацией частиц в нижнем и верхнем слоях сальтации. В верхнем слое сальтации в отличие от нижнего корреляционные связи концентрации частиц со скоростью ветра оказались нелинейными.

По данным измерений на опустыненной территории в Астраханской обл. 23.08.2011 и 01.09.2011 построены вертикальные распределения концентрации сальтирующих частиц в слое от 3 до 15 см для диапазона изменения ветра в приземном слое атмосферы от 6.0 до 11.0 м/с. Предложена кусочно-экспоненциальная аппроксимация вертикальных профилей концентрации сальтирующих частиц. Показано, что в нижнем слое сальтации на опустыненной территории логарифмический градиент концентрации не зависит от скорости ветра.

Получена и аппроксимирована зависимость от скорости ветра логарифмического градиента концентрации в верхнем слое сальтации. Определена толщина нижнего слоя сальтации (около 9 см). Предложена малопараметрическая модель вертикального распределения концентраций сальтирующих частиц в слое от 0 до 15 см для диапазона изменения скорости ветра от пороговой скорости сальтации до 11.0 м/с.

По опубликованным данным получены зависимости от размера сальтирующих частиц масштаба высоты вертикальных распределений концентрации и массового потока частиц и соотношение между масштабами высоты для указанных профилей. Получена оценка масштаба для массового потока частиц с размерами 100 мкм, близкими к модальному размеру частиц на опустыненной территории в Астраханской обл.

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

#### 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. Miller R., Tegen I., Perlwitz J. Surface radiative forcing by soil dust aerosol and the hydrologic cycle // J. Geophys. Res. 2004. V. 109. DO4203.
4. 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. 11239–11249.
5. Bagnold R.A. The Physics of Blown Sand and Desert Dunes. London: Methuen, 1941. 265 p.
6. Shao Y. Physics and Modeling of Wind Erosion. N.Y.: Springer, 2000. 393 p.



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. *Семенов О.Е.* Введение в экспериментальную метеорологию и климатологию песчаных бурь. Алматы: КазНИИЭЖ, 2011. 580 с.
9. *Горчаков Г.И., Карнов 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.
10. *Горчаков Г.И., Карнов 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 // *Докл. АН.* 2016. Т. 467. № 3. С. 336–341.
11. *Ju T., Li X., Zhang H., Song Y.* Comparison of two different dust emission mechanisms over the Horqin Sandy Land area: Aerosols contribution and size distributions // *Atmosph. Environment.* 2018. V. 176. P. 82–90.
12. *Chkhetiani O.G., Gledzer E.B., Artamonova M.S., Iordanskii M.A.* Dust resuspension under weak wind conditions: direct observations and model // *Atmos. Chem. Phys.* 2012. V. 12. P. 5147–5162.
13. *Klose M., Shao Y.* Stochastic parameterization of dust emission and application to convective atmospheric conditions // *Atmos. Chem. Phys.* 2012. V. 12. P. 7309–7320.
14. *Вазеева Н.В., Чхетиани О.Г., Максименков А.О* Организованная валиковая циркуляция и перенос минеральных аэрозолей в атмосферном пограничном слое // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2019. Т. 55. № 2. С. 17–31.
15. *Горчаков Г.И., Карнов А.В., Гуцин Р.А.* Турбулентные потоки пылевого аэрозоля на опустыненной территории // *Докл. РАН. Наука о Земле.* 2020. Т. 494. № 2. С. 53–57.
16. *Малиновская Е.А., Чхетиани О.Г.* Об условиях ветрового выноса частиц почвы // *Вычислительная механика сплошных сред.* 2020. Т. 13. № 2. С. 175–188.
17. *Горчаков Г.И., Бунтов Д.В., Карнов 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.
18. *Бунтов Д.В., Гуцин Р.А., Даценко О.И.* Четырехканальный фотоэлектрический счетчик сальтирующих песчинок // *Оптика атмосферы и океана.* 2018. Т. 31. № 6. С. 485–488.
19. *Pettijohn F.G.* *Sedimentary Rocs.* N.Y.: Harper, 1957. 526 p.
20. *White B.R., Schulz J.C.* Magnus effect in saltation // *J. Fluid Mech.* 1977. V. 81. № 3. P. 497–512.
21. *Zheng X.J., Huang N., Zhou Y.H.* Laboratory measurement of electrification of wind-blown Sands and simulation of its effect on sand saltation movement // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. № D10. 4322.
22. *Liu X., Dong Z.* Experimental investigation of the concentration profile of a blowing sand cloud // *Geomorphology.* 2004. V. 60. P. 371–382.
23. *Huang N., Zheng X.-J., Zhou Y.-H., Scott Van Pelt R.* Simulation of wind-blown sand movement and probability density function of liftoff velocities of sand particles // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. D20201.
24. *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.
25. *Creyssels 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.
26. *Schmidt D.S., Schmidt R.A., Dent Y.D.* Electrostatic force on saltating sand // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. № D8. P. 8997–9001.
27. *Kok J.F., Renno N.O.* Electrostatics in wind-blown sand // *Phys. Rev. Lett.* 2008. V. 100. № 1. 01450L.
28. *Горчаков Г.И., Ермаков В.И., Копейкин В.М., Исаков А.А., Карнов А.В., Ульяненко А.В.* Электрические токи сальтации в ветропесчаном потоке // *Докл. АН.* 2006. Т. 410. № 2. С. 259–262.
29. *Горчаков Г.И., Копейкин В.М., Карнов А.В., Бунтов Д.В., Соколов А.В.* Удельный заряд сальтирующих песчинок на опустыненных территориях // *Докл. АН.* 2014. Т. 456. № 4. С. 476–480.
30. *Li B., McKenna Neuman C.* Boundary-layer turbulence characteristics during aeolian saltation // *Geophys. Res. Lett.* 2012. V. 39. L11402.
31. *Martin R.L., Barchyn T.E., Hugenholtz C.H., Jerolmack D.J.* Timescale dependence of aeolian sand flux observation under atmospheric turbulence // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 117. D16205.
32. *Liu D., Ishizuka M., Mikami M., Shao Y.* Turbulent characteristics of saltation and uncertain of saltation model parameters // *Atmos. Chem. Phys.* 2018. V. 18. P. 7595–7606.
33. *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 Conference Series: EES 606.* 2020. EESE6061. EESE6061015.
34. *Карнов А.В., Гуцин Р.А., Даценко О.И.* Анализ вариаций скорости переноса сальтирующих песчинок // *Оптика атмосферы и океана.* 2017. Т. 30. № 03. С. 227–232.
35. *Karpov AV., Gorchakov G.I., Gushchin R.A., Datsenko O.I.* Aleurite particle saltation modeling // *Proc. SPIE 11208.* 2020. 112084Y.
36. *Tong D., Huang N.* Numerical simulation of saltating particles in atmospheric boundary layer over flat bed sand ripples // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. D16205.
37. *Gordon M., McKenna Neuman C.* A study of particle splash on developing ripple forms for two bed materials // *Geomorphology.* 2011. V. 129. P. 79–91.
38. *Горчаков Г.И., Карнов А.В., Кузнецов Г.А., Бунтов Д.В.* Квазипериодическая сальтация в ветропесчаном

- потоке на опустыненной территории // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 6. С. 472–477.
39. Горчаков Г.И., Шукуров К.А. Флуктуации концентрации субмикронного аэрозоля в конвективных условиях // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2003. Т. 39. № 1. С. 85–97.
40. Горчаков Г.И., Бунтов Д.В., Карпов А.В., Конейкин В.М., Мирсаитов С.Ф., Гуцин Р.А., Даценко О.И. Влияние ветра на распределение сальтирующих частиц по размерам // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 10. С. 848–855.
41. 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.
42. Kok J.F., Renno N.O. A comprehensive numerical model of steady state saltation (COMCALT) // J. Geophys. Res. 2009. V. 114. D17204.
43. Namikas S.L. Field measurement and numerical modelling of aeolian mass flux distributions on a sandy beach // Sedimentology. 2003. V. 50. P. 303–326.

## Vertical Distribution of Aleurite and Sand Particles in Windsand Flux on Desertified Area

G. I. Gorchakov<sup>1,\*</sup>, A. V. Karpov<sup>1,\*\*</sup>, R. A. Gushchin<sup>1,\*\*\*</sup>,  
O. I. Datsenko<sup>1,\*\*\*\*</sup>, and D. V. Buntov<sup>1,\*\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>*Obukhov Institute of Atmospheric Physics Russian Academy of Sciences, Pyzhyovskiy per., 3, Moscow, 119017 Russia*

\*e-mail: gengor@ifaran.ru

\*\*e-mail: karpov@ifaran.ru

\*\*\*e-mail: gushchin@ifaran.ru

\*\*\*\*e-mail: datsenko@ifaran.ru

\*\*\*\*\*e-mail: dbunt@mail.ru

In Astrakhan oblast under almost non-intermittent conduction at heights from 3 to 15 cm the satiating particle size distribution function profiles were received for differential number particle concentrations with a size of 47.0, 85.6, 104.6, 127.7 and 156.0  $\mu\text{m}$  which approximated exponential functions. It is shown that a logarithmic concentration gradient in the low layer of saltation 9 cm thickness don't depend from the wind velocity in the surface layer of the atmosphere. It is establishment that in the upper saltation layer at the heights of 11 and 15 cm the saltating particle concentration is non-linear functions of the wind velocity. Two-layer exponential approximation of the particle concentration profiles for the wind velocity values from 5.5 to 11.0 m/s are proposed. Logarithmic concentration gradient dependence from the wind velocity in the upper saltation layer has been approximated. Small-parametric model of the saltating particle concentration in the layer from 0 to 15 cm has been worked out. Height scale dependence approximations from the particle size for the concentration and mass flux height profiles have been proposed.

**Keywords:** desertification, windsand flux, almost non-intermittent saltation, saltating aleurite particle, particle concentration height distribution, two-layer exponential approximation, logarithmic concentration gradient, low layer saltation thickness, small parametric model of height concentration distribution