

УДК 551.510

## Четырехканальный фотоэлектрический счетчик сальтирующих песчинок

Д.В. Бунтов<sup>1</sup>, Р.А. Гуцин<sup>1,2</sup>, О.И. Даценко<sup>1,2\*</sup>

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

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

Поступила в редакцию 18.01.2018 г.

Разработан и изготовлен четырехканальный фотоэлектрический счетчик сальтирующих песчинок для измерения флуктуаций концентраций сальтирующих песчинок на опустыненных территориях и функции распределения сальтирующих песчинок с размерами больше 30 мкм. Приведены результаты измерений флуктуаций концентрации и распределения по размерам сальтирующих песчинок. Показано, что при измерениях на опустыненной территории вблизи р. Волги форма вертикального профиля концентрации сальтирующих песчинок в диапазоне высот от 3 до 7 см в среднем оставалась неизменной.

Функция распределения сальтирующих песчинок по размерам на опустыненной территории с удовлетворительной точностью аппроксимируется логнормальным распределением в области максимума и заметно отличается от логнормального при больших и малых размерах песчинок.

*Ключевые слова:* ветропесчаный поток, сальтация, концентрация сальтирующих песчинок, распределение песчинок по размерам, четырехканальный фотоэлектрический счетчик, аппроксимация функции распределения, логнормальное распределение; sand wind flux, saltation, saltating sand particle concentration, particle size distribution, four-channel photoelectric counter, size distribution approximation, lognormal distribution.

### Введение

Исследование процессов опустынивания представляет интерес для широкого круга специалистов [1–10]. В формировании ландшафтов песчаных пустынь определяющую роль играет ветропесчаный поток [1, 2, 5, 8, 11–15]. Основной процесс в ветропесчаном потоке – сальтация [1–3, 5, 8, 15, 16], или скачкообразное перемещение песчинок, – явление, которое до сих пор недостаточно изучено. В частности, недавно была обнаружена квазипериодическая сальтация [8, 15], обусловленная взаимодействием ветра с волновыми неоднородностями на подстилающей поверхности [5, 17].

При исследовании аэродисперсных систем, в частности ветропесчаного потока, необходимо знать распределение частиц по размерам. Функцию распределения частиц по размерам можно измерить с помощью фотоэлектрических счетчиков частиц [18]. Информация о распределении сальтирующих песчинок по размерам нужна при определении массовых потоков сальтации [12].

Параметры и конструктивные особенности фотоэлектрических счетчиков зависят от свойств изучаемой дисперсной среды (диапазона размеров

и концентрации частиц, комплексного коэффициента преломления и др.), а также от условий проведения измерений, в том числе метеорологических.

Цель данной работы – создание фотоэлектрического счетчика сальтирующих песчинок для проведения измерений функции распределения в натурных условиях на опустыненных территориях. Важным требованием к таким приборам является широкий диапазон измерения размеров песчинок, примерно от 30–40 до 500–700 мкм.

Существенной особенностью ветропесчаного потока на опустыненных территориях, в отличие от ветровых каналов [2, 10, 13], является нестационарность сальтации, что проявляется в сильной пространственно-временной изменчивости концентрации сальтирующих песчинок. Поэтому была поставлена задача разработать и изготовить четырехканальный фотоэлектрический счетчик (четыре идентичных канала), который позволяет с высоким временным разрешением (порядка секунды) выполнять измерения распределений сальтирующих песчинок по размерам одновременно на четырех уровнях или в четырех разнесенных по горизонтали точках.

Реальные возможности созданного фотоэлектрического счетчика сальтирующих песчинок иллюстрируются данными измерений флуктуаций концентраций и распределения по размерам сальтирующих песчинок.

\* Дмитрий Владимирович Бунтов (dbunt@mail.ru); Роман Альбертович Гуцин (roma-max7@mail.ru); Олег Игоревич Даценко (datoleg@yandex.ru).

## Фотоэлектрический счетчик сальтирующих песчинок

На рис. 1 показана блок-схема канала фотоэлектрического счетчика, а на рис. 2 — один из вариантов вертикальной конфигурации фотоэлектрического счетчика при измерениях на опустыненной территории.

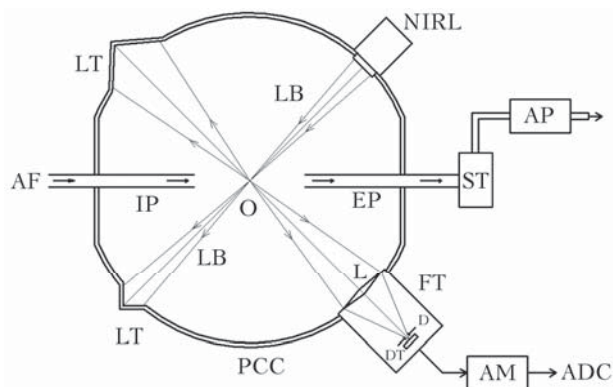


Рис. 1. Блок-схема фотоэлектрического счетчика (один канал) сальтирующих песчинок: PCC — камера счетчика частиц; AF — воздушный поток; IP — входной канал; EP — выходной канал; ST — пескоуловитель; AP — воздушный насос; NIRL — лазерный источник ближнего ИК-диапазона; LB — лазерный луч; LT — световая ловушка; O — центр рассеивающего объема; FT — фотометр; L — объектив; D — диафрагма; DT — приемник излучения; AM — усилитель; ADC — аналого-цифровой преобразователь

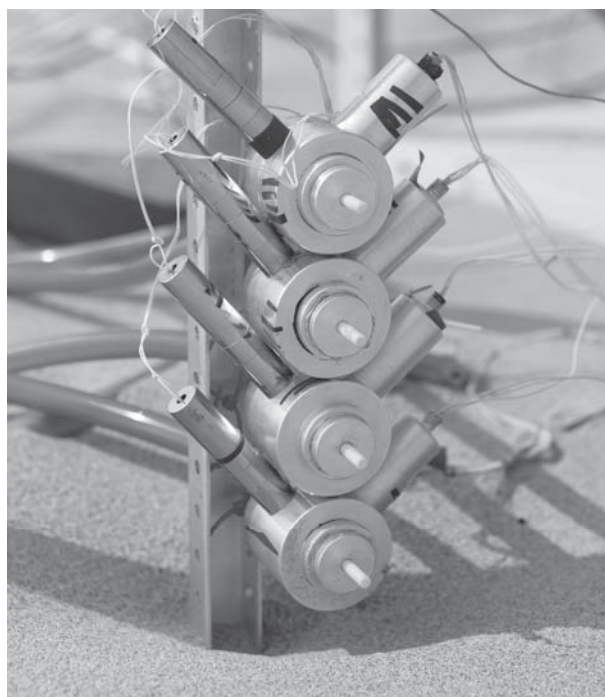


Рис. 2. Четырехканальный фотоэлектрический счетчик сальтирующих песчинок

Движение сальтирующих песчинок, в отличие от движения частиц аэрозоля в атмосферном воздухе, характеризуется сильной инерционностью.

Поэтому для регистрации сальтирующих песчинок необходимо использовать проточные фотоэлектрические счетчики, ориентированные по воздушному потоку. Воздушный поток AF (рис. 1) поступает в герметичную камеру счетчика PCC через входной канал IP. Выходящий из канала IP воздушный поток диаметром 2 мм проходит через рассеивающий объем счетчика с центром в точке O и поступает в выходной канал EP. Воздушный поток формируется с помощью насоса (побудителя расхода) AP и контролируется ротаметром (на рис. 1 не показан). Между насосом и камерой встроено пескоуловитель ST [5], что позволяет, в частности, определять массу пролетевших через счетчик песчинок.

В точке O пересекаются оптические оси осветителя и фотометра FT (рис. 1). Указанные оптические оси расположены в плоскости, перпендикулярной направлению воздушного потока (рис. 2). Рассеивающий объем освещается с помощью осветителя ближнего ИК-диапазона, в котором источником излучения (длина волны 808 нм) является диодный лазер WSLD-808-300 m-1-PD (Wavespectrum Lazer, China) мощностью 120 мВт. При ширине луча LB в точке O около 1,5 мм максимальное значение рассеивающего объема составляет примерно  $4,5 \text{ мм}^3$ . Максимальная допустимая концентрация песчинок составляет примерно  $50 \text{ см}^{-3}$ . Апертура объектива фотометра L и величина диафрагмы D согласованы с указанными выше размерами счетного объема. В качестве приемника излучения используется изделие OPT 101P (Texas Instruments, USA). Электрический сигнал с приемника излучения DT (рис. 1) поступает на усилитель AM и далее на аналого-цифровой преобразователь ADC E14-440. Многоканальный АЦП E14-440 (L-CARD, Москва) подключается к системе сбора и анализа данных, описание которой выходит за рамки настоящей статьи.

Градуировка счетчика частиц осуществлялась по калиброванным абразивным порошкам. Также проводился контроль полученных распределений методом микроскопического анализа собранных пескоуловителями проб песка.

## Измерение флуктуаций концентраций сальтирующих песчинок

Минимальный размер (средний диаметр) регистрируемых фотоэлектрическим счетчиком песчинок равен 30 мкм. Использование быстродействующего АЦП позволяет с высоким временным разрешением измерять счетные концентрации сальтирующих песчинок. При исследовании статистических закономерностей время накопления (осреднения) приходится выбирать с учетом достаточно высокой статистической обеспеченности данных. В качестве примера на рис. 3 показаны корреляционные связи счетных концентраций сальтирующих песчинок в ветропесчаном потоке на высотах 7 ( $N_7$ ) и 11 см ( $N_{11}$ ) с концентрацией песчинок на высоте 3 см ( $N_3$ ), полученные по данным измерений на песчаной территории вблизи р. Волги 22.08.2011 г.

с 11:05 до 15:05. Время осреднения составляет 10 с. Нетрудно увидеть (рис. 3, а), что между счетными концентрациями сальтирующих песчинок на высотах 7 и 3 см имеет место линейная связь (прямая регрессии 1), что говорит о независимости формы профиля концентрации песчинок [5, 7, 8] в рассматриваемом диапазоне высот от уровня концентрации на высоте 3 см ( $N_7 = 0,24N_3$ ).

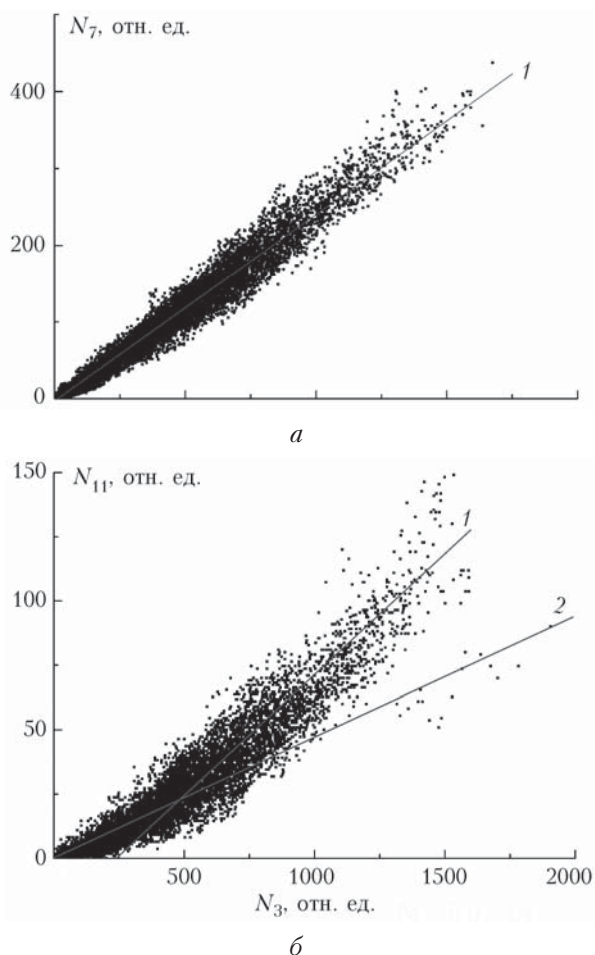


Рис. 3. Корреляционные связи между концентрациями сальтирующих песчинок (временное осреднение 10 с) на высотах 3 и 7 см (1 – прямая регрессии) (а) и на высотах 3 и 11 см (1 и 2 – прямые регрессии при больших и малых концентрациях на высоте 3 см) (б) по данным измерений 22.08.2011 г. с 11:05 до 15:05

Другая ситуация имеет место для корреляции концентраций сальтирующих песчинок на высотах 11 и 3 см (рис. 3, б). При сравнительно больших значениях  $N_3$  имеет место соотношение линейной регрессии  $N_{11} = 0,09N_3 - 22,5$  (прямая 1, рис. 3, б). При малых значениях  $N_3$  также наблюдается линейная связь между концентрациями  $N_{11}$  и  $N_3$  (прямая 2, рис. 3, б), но с другим наклоном прямой регрессии:  $N_{11} = 0,047N_3$ , что обусловлено переходом от экспоненциального профиля в нижнем слое сальтации к степенному в верхнем слое сальтации [5, 7]. В некоторых случаях (рис. 3, б) это соотношение наблюдается и при больших значениях

$N_3$ , что может быть обусловлено нетипичным режимом сальтации.

### Измерение распределения сальтирующих песчинок по размерам

На рис. 4 (гистограмма 1) показано нормированное распределение сальтирующих песчинок по размерам на высоте 5 см, построенное по данным измерений 23.08.2011 г. с 11:05 до 12:05 на песчаной территории вблизи р. Волги. Минимальный размер песчинок (30 мкм) определяется возможностями фотоэлектрического счетчика, а песчинок в ветропесчаном потоке (максимальный размер 300 мкм) – отсутствием более крупных.

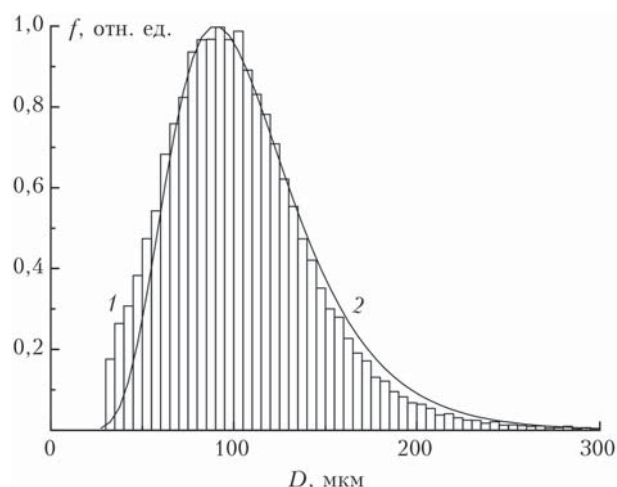


Рис. 4. Распределение сальтирующих песчинок по размерам (1) на высоте 5 см по данным измерений 23.08.2011 г. с 11:05 до 12:05 (2 – аппроксимирующее логнормальное распределение)

Согласно данным измерений распределений сальтирующих песчинок по размерам на пустынных территориях Казахстана [5] с использованием метода просеивания проб песка функции распределения сальтирующих песчинок по размерам с удовлетворительной точностью аппроксимируются нормальными или логнормальными распределениями. Полученное нами распределение (гистограмма 1, рис. 4) аппроксимировано логнормальным распределением

$$g(D) = \frac{N}{\sqrt{2\pi}\sigma D} \exp\left\{-\frac{(\ln D - \ln D_0)^2}{2\sigma^2}\right\},$$

где  $D_0 = 92,5$  мкм и  $\sigma = 0,365$ . Нормированное логнормальное распределение с указанными параметрами  $f(D)$  приведено на рис. 4 (кривая 2). Заметим, что измеренное и аппроксимирующее распределение хорошо согласуются друг с другом в области максимума. При больших значениях  $D$  аппроксимирующее распределение дает завышенные концентрации, а при малых – заниженные. Созданный нами фотоэлектрический счетчик позволяет изучать детальную изменчивость функции распределения

сальтирующих песчинок по размерам и флуктуаций соответствующих концентраций песчинок.

### Заключение

Разработан и изготовлен четырехканальный фотоэлектрический счетчик сальтирующих песчинок с размерами больше 30 мкм и максимальной концентрацией до 50 см<sup>-3</sup>. Приведены результаты измерений счетных концентраций сальтирующих песчинок. Показано, что, согласно данным измерений на песчаной территории вблизи р. Волги в августе 2011 г., форма среднего профиля концентрации сальтирующих песчинок в диапазоне высот от 3 до 7 см не зависит от интенсивности сальтации.

Представлено распределение сальтирующих песчинок по размерам на высоте 5 см, полученное по данным измерений на опустыненной территории вблизи р. Волги в августе 2011 г. Показано, что наблюдаемое распределение вблизи максимума с удовлетворительной точностью аппроксимируется логнормальным распределением.

Авторы благодарят Г.И. Горчакова и А.В. Карпова за полезные советы.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-35-00467).

1. *Shao Y.* Physics and modeling of wind erosion. New York: Springer, 2008. 452 p.
2. *Zheng X.* Mechanics of windblown sand movements. Berlin: Springer-Verlag, 2009. 290 p.
3. *Бютнер Э.К.* Динамика приповерхностного слоя воздуха. Л.: Гидрометеоздат, 1978. 158 с.
4. *Золотокрылин А.Н.* Климатическое опустынивание. М.: Наука, 2003. 247 с.
5. *Семенов О.Е.* Введение в экспериментальную метеорологию и климатологию песчаных бурь. Алматы: КазНИИЭК, 2011. 580 с.
6. *Шуляк Б.А.* Физика волн на поверхности сыпучей среды и жидкости. М.: Наука, 1971. 400 с.
7. *Горчаков Г.И., Тутов А.А., Бунтов Д.В.* Параметры нижнего слоя сальтации на опустыненной территории // Докл. АН. 2009. Т. 424, № 1. С. 103–106.
8. *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, № 1. С. 669–676.
9. *Горчаков Г.И., Карпов А.В., Соколов А.В., Бунтов Д.В., Злобин И.А.* Экспериментальное и теоретическое исследование траекторий сальтирующих песчинок на опустыненных территориях // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 6. С. 501–506; *Gorchakov G.I., Karpov A.V., Sokolov A.V., Buntov D.V., Zlobin I.A.* Experimental and theoretical study of the trajectories of saltating sand particles over desert areas // Atmos. Ocean. Opt. 2012. V. 25, N 6. P. 423–428.
10. *Cheng H., Zou X.-Y., Zhang C.-L.* Probability distribution functions for the initial liftoff velocities of saltating sand grain in air // J. Geophys. Res. 2006. V. 111, N 22. P. D22205.
11. *Rasmussen K., Sorensen M.* Vertical variation of particle speed and flux density in aeolian saltation: Measurement and modeling // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. P. F02S12.
12. *Карпов А.В., Гуцин Р.А., Даценко О.И.* Анализ вариации скорости переноса сальтирующих песчинок // Оптика атмосф. и океана. 2017. Т. 30, № 3. С. 227–232; *Karpov A.V., Gushchin R.A., Datsenko O.I.* Analysis of variations in the saltating sand grain transport velocity // Atmos. Ocean. Opt. 2017. V. 30, N 5. P. 456–461.
13. *Huang N., Zheng X., Zhou Y., van Pelf R.S.* Simulation of wind-blown sand movement and probability density function of liftoff velocities of sand particles // J. Geophys. Res. 2006. V. 111, N D20. P. D20201.
14. *Горчаков Г.И., Карпов А.В., Копейкин В.М., Соколов А.В., Бунтов Д.В.* Влияние силы Сэфмана, подъемной силы и электрической силы на перенос частиц в ветропесчаном потоке // Докл. АН. 2016. Т. 467, № 3. С. 336–341.
15. *Горчаков Г.И., Карпов А.В., Кузнецов Г.А., Бунтов Д.В.* Квазипериодическая сальтация в ветропесчаном потоке на опустыненной территории // Оптика атмосф. и океана. 2016. Т. 29, № 6. С. 472–477; *Gorchakov G.I., Karpov A.V., Kuznetsov G.A., Buntov D.V.* Quasiperiodic saltation in the windsand flux over desertified area // Atmos. Ocean. Opt. 2016. V. 29, N 6. P. 501–506.
16. *Bagnold R.A.* The Physics of Blown Sand and Desert Dunes. London: Methuen, 1941. 265 p.
17. *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.
18. *Беляев С.П., Никуфорова М.К., Смирнов В.В., Щелчков Г.И.* Оптико-электронные методы изучения аэрозоля. М.: Энергия, 1981. 232 с.

#### *D.V. Buntov, R.A. Gushchin, O.I. Datsenko.* Four-channel photoelectric counter of saltating sand particles.

A four-channel photoelectric counter has been worked out and manufactured for the measurements of saltating sand concentration fluctuations and size distribution function of particles with diameters > 30 μm over desertified areas. The measurement results are given. It is shown that the vertical profile of the saltating sand concentration does not change on average in the altitude range from 3 to 7 cm over a desertified area in the neighbourhood of Volga. The distribution function of saltating sand particles over the desertified area is approximated with satisfactory precision by the lognormal distribution near the distribution maximum. Noticeable distinctions between above mentioned distributions for large and small sand particles are observed.