

УДК 551.510

Экспериментальное и теоретическое исследование траекторий сальтирующих песчинок на опустыненных территориях

Г.И. Горчаков¹, А.В. Карпов¹, А.В. Соколов²,
Д.В. Бунтов³, И.А. Злобин^{3*}

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук
119017, г. Москва, Пыжевский пер., 3

² Государственное учебно-научное учреждение Физический факультет Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова
119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1, стр. 2

³ Московский государственный университет приборостроения и информатики
107996, г. Москва, ул. Стромынка, 20

Поступила в редакцию 27.01.2012 г.

Выполнено экспериментальное и теоретическое исследование процесса переноса песчинок на опустыненных территориях в нижнем слое сальтации. Методом скоростной видеосъемки восстановлены траектории сальтирующих песчинок. Представлен пример «мгновенного» профиля концентрации сальтирующих песчинок в слое от 0 до 40 мм. Построена численная модель движения песчинки в приповерхностном слое атмосферы. Выполнен анализ влияния входных параметров модели на траекторию песчинки. Разработана методика решения обратной задачи динамики сальтирующей песчинки. Приведены примеры восстановления динамических параметров задачи по наблюдаемым траекториям песчинок. Установлено, что по данным траекторных измерений можно оценивать некоторые характеристики турбулентности.

Ключевые слова: ветропесчаный поток, траектории песчинок, обратная задача динамики сальтирующих песчинок; wind sand flux, sand particle trajectories, inverse problem of the saltating sand dynamics.

Введение

Опустыненные территории являются источниками минерального аэрозоля, который генерируется на подстилающей поверхности под воздействием ветропесчаного потока. Однако механизм генерации аэрозоля на опустыненных территориях до сих пор изучен недостаточно. Слабо изучен и процесс переноса песчинок, особенно в непосредственной близости к подстилающей поверхности. Ранее в лабораторных экспериментах методом скоростной киносъемки [1, 2] изучался полет сальтирующих песчинок на участках траекторий, примыкающих к подстилающей поверхности, что позволило получить важную информацию о вариациях углов падения на подстилающую поверхность и углов вылета или разлета песчинок. Однако лабораторные измерения и в том числе эксперименты в ветровых каналах далеко не в полной мере соответствуют реальным условиям на

опустыненных территориях. В связи с необходимостью исследования процессов переноса в приповерхностном слое атмосферы при наличии сальтации важно иметь представление не только об участках траектории, примыкающих к подстилающей поверхности, но и о траекториях песчинок в целом. Именно поэтому нами была поставлена задача экспериментального исследования траекторий песчинок на песчаных опустыненных территориях в нижнем слое сальтации.

Регистрация сальтирующих песчинок осуществлялась методом скоростной видеосъемки. Измерения траекторных параметров песчинок проводились в 2009 г. на опустыненной территории в государственном заказнике «Пески Берли» (Харабалинский район Астраханской области) и в 2010–2011 гг. на песчаной территории вблизи р. Волги. С целью интерпретации данных измерений была разработана модель динамики сальтирующей песчинки. Был выполнен анализ влияния параметров модели на траектории песчинок, что позволило сформулировать подход к решению обратной задачи динамики сальтирующих песчинок. Разработана и продемонстрирована на конкретных примерах методика решения указанной обратной задачи.

* Геннадий Ильич Горчаков (gengor@ifaran.ru); Алексей Владимирович Карпов (karpov@ifaran.ru); Александр Валерьевич Соколов; Дмитрий Владимирович Бунтов; Иван Андреевич Злобин (ivan3n@gmail.com).

Определение траекторных параметров сальтирующих песчинок методом скоростной видеосъемки

Важная информация о характеристиках ветро-песчаного потока в диапазоне высот примерно от 3 до 20 см при скорости ветра от 4 до 10–12 м/с может быть получена с помощью фотоэлектрических счетчиков частиц [3]. Анализ показал, что в нижнем трехсантиметровом слое сальтации наиболее эффективным является метод скоростной видеосъемки. Для решения поставленной задачи необходимо было обеспечить достаточно высокое пространственное (доли миллиметра) и временное (порядка миллисекунды) разрешение при большом поле зрения (несколько квадратных сантиметров). Поставленную задачу удалось решить с помощью фотоаппарата Casio Exilim EX-F1, который может работать в режиме скоростной видеосъемки (1200 кадр./с) с матрицей 336×96 пикселей. Видеосъемка проводилась в режиме коротких видеофильмов (длительность несколько секунд).

Примеры видеокадров сальтирующих песчинок представлены на рис. 1 (Пески Берли, 2009 г.).

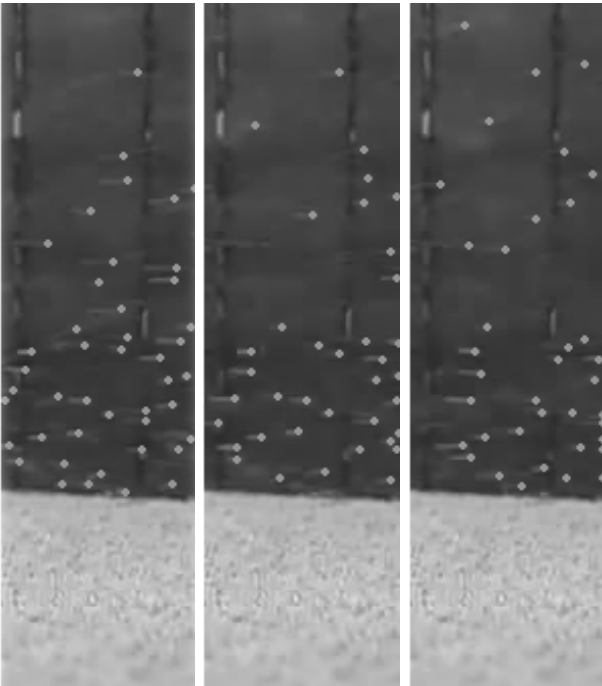


Рис. 1. Видеокадры сальтирующих песчинок в слое от 0 до 40 мм

Они получены при значениях средней скорости ветра, близких к пороговой скорости 4 м/с [4, 5]. Нетрудно видеть, что в нижнем слое сальтации толщиной около 15 мм концентрация сальтирующих песчинок заметно выше, чем в верхнем слое. Осредненный за 5 мс профиль концентрации сальтирующих песчинок показан на рис. 2, и представлен на кусочно-линейной аппроксимации наблюдаемого профиля.

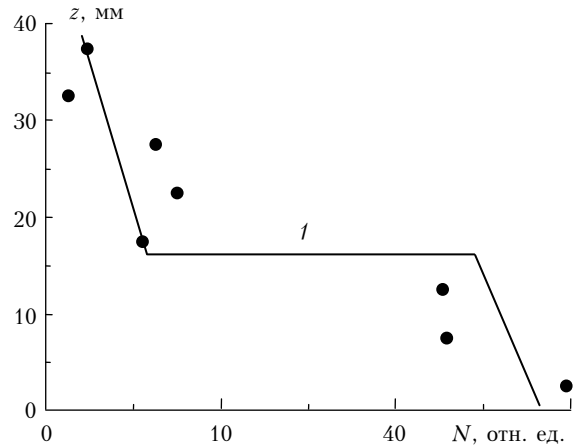


Рис. 2. Вертикальный профиль концентрации сальтирующих песчинок в слое 0–40 мм для интервала времени 5 мс, построенный по данным скоростной видеосъемки на пустынной территории в государственном заказнике «Пески Берли» в августе 2009 г. (1 – кусочно-линейная аппроксимация профиля)

Видно, что «мгновенные» профили концентрации сальтирующих песчинок существенно отличаются от степенных и экспоненциальных [3]. Наблюдаемые траектории песчинок довольно разнообразны. Примеры типичных траекторий сальтирующих песчинок представлены на рис. 3 и 4 (кривые 1).

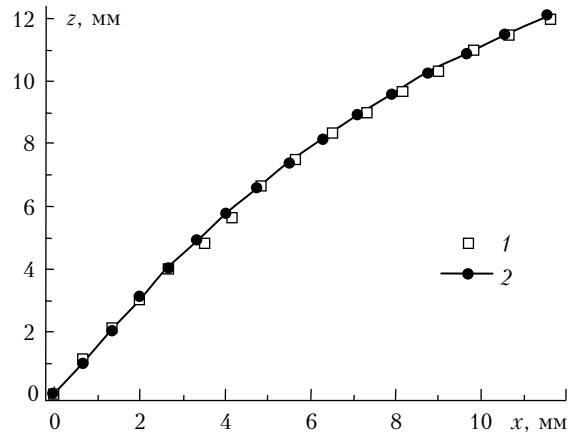


Рис. 3. Пример наблюдаемой (Пески Берли, август 2009 г.) траектории сальтирующей песчинки 1 и восстановленной методом обратной задачи траектории 2 с параметрами: $D_p = 82$ мкм, $u_* = 0,37$ м/с, $z_0 = 1$ мм, $v_{0x} = 0,83$ м/с и $v_{0z} = 1,31$ м/с

Моделирование траекторий сальтирующих песчинок

На сальтирующую песчинку действует несколько различных сил [6, 7]:

$$m_p \mathbf{a}_p = \mathbf{F}_g + \mathbf{F}_D + \mathbf{F}_L + \mathbf{F}_M + \mathbf{F}_E + \mathbf{F}_S + \mathbf{F}_B,$$

где m_p и \mathbf{a}_p – масса и ускорение сальтирующей песчинки, гравитационная сила $\mathbf{F}_g = \frac{\pi}{6} D_p^3 \rho_p \mathbf{g}$ (\mathbf{g} – ускорение силы тяжести; D_p и ρ_p – диаметр и плотность

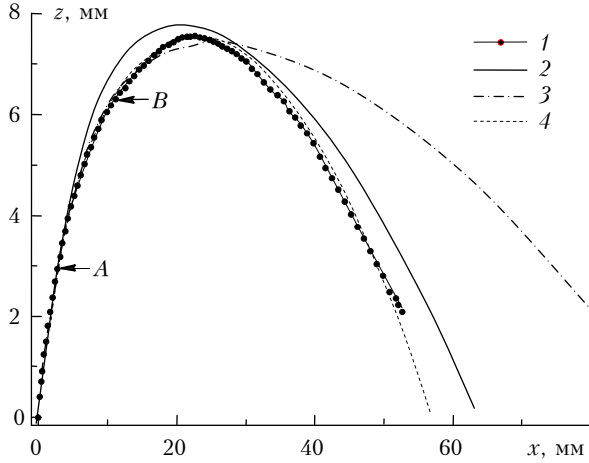


Рис. 4. Пример наблюдаемой (прибрежная территория р. Волги, 2011 г.) траектории сальтирующей песчинки 1 и восстановленная методом обратной задачи траектория 2 с параметрами $D_p = 200$ мкм и $u_* = 0,40$ м/с (соответствует начальному участку траектории 1), траектория 3 с параметром $u_* = 0,60$ м/с (соответствует участку траектории 1 от точки A до точки B) и траектория 4 с параметром $u_* = 0,23$ м/с (соответствует участку траектории 1 за точкой B)

вещества частицы), аэродинамическая сила торможения/разгона $\mathbf{F}_D = \frac{1}{2} C_D Q \rho \mathbf{V}_p |\mathbf{V}_p|$, зависящая от скорости движения песчинки $\mathbf{V}_p = \mathbf{U} - \mathbf{U}_p$ — относительно воздушного потока (\mathbf{U}_p — абсолютная скорость частицы; \mathbf{U} — скорость воздушного потока; ρ — плотность воздуха и Q — площадь поперечного сечения частицы). Аэродинамический коэффициент трения в соответствии с [8, 9] будем рассчитывать по приближенной формуле

$$C_D = \frac{24}{\text{Re}_p} + \frac{9}{2},$$

где число Рейнольдса для сальтирующей песчинки $\text{Re}_p = |\mathbf{U} - \mathbf{U}_p| \frac{D_p}{\eta}$ (η — кинематическая вязкость воздуха). На полет песчинки могут также влиять [7, 10] подъемная сила \mathbf{F}_L ; действующая на вращающуюся частицу сила Магнуса \mathbf{F}_M ; электрическая сила \mathbf{F}_E ; обусловленная вязкими эффектами в течениях с большим сдвигом скорости сила Сэффмана \mathbf{F}_S и сила Бассета \mathbf{F}_B , позволяющая учитывать инерционные эффекты в воздушном потоке.

При моделировании траекторий сальтирующих песчинок, как правило, учитываются сила тяжести \mathbf{F}_g и аэродинамическая сила \mathbf{F}_D [5]. Подъемная сила \mathbf{F}_L в рассматриваемой задаче не учитывается, поскольку она существенна только при больших сдвигах скорости и для сильно несферических частиц. Сила Магнуса \mathbf{F}_M [6, 7, 10] проявляется только для песчинок, вращающихся с большой угловой скоростью. В наших экспериментах напряженность электрического поля в приповерхностном слое атмосферы, как правило, по модулю не превышала 3 кВ/м. Поэтому в нашем случае влиянием электрической силы \mathbf{F}_E

можно пренебречь [10]. Силы Сэффмана и Бассета \mathbf{F}_S и \mathbf{F}_B согласно существующим оценкам [6, 7] в нашем случае несущественны.

По аналогии с [5, 10] и другими работами ограничимся анализом плоских траекторий сальтирующих песчинок [11]. Выбор знаков координат, скоростей и ускорений соответствует графикам, представленным на рис. 3 и 4.

В рассматриваемом случае уравнения движения имеют вид

$$m_p \ddot{x}_p = -3\pi\eta\rho D_p (\dot{x}_p - u) - \frac{9\pi}{16} \rho D_p^2 (\dot{x}_p - u) \sqrt{(\dot{x}_p - u)^2 + (\dot{z}_p - w)^2}$$

и

$$m_p \ddot{z}_p = -m_p g - 3\pi\eta\rho D_p (\dot{z}_p - w) - \frac{9\pi}{16} \rho D_p^2 (\dot{z}_p - w) \sqrt{(\dot{x}_p - u)^2 + (\dot{z}_p - w)^2},$$

где $\dot{x}_p = v_x$ и $\dot{z}_p = v_z$ — горизонтальная и вертикальная компоненты скорости частицы; \ddot{x}_p и \ddot{z}_p — соответствующие компоненты ускорения (начальные компоненты скорости частицы обозначим как v_{0x} и v_{0y}); u и w — мгновенные значения горизонтальной и вертикальной компонент скорости ветра.

Вводя обозначение $\xi = \rho/\rho_p$ и учитывая соотношение $m_p = \rho_p \frac{\pi D_p^3}{6}$, приводим уравнения движения к виду

$$\ddot{x}_p = -\tau^{-1} V_{px} - L^{-1} V_{px} |\mathbf{V}_p|$$

и

$$\ddot{z}_p = -g - \tau^{-1} V_{pz} - L^{-1} V_{pz} |\mathbf{V}_p|.$$

Здесь $|\mathbf{V}_p| = \sqrt{(\dot{x}_p - u)^2 + (\dot{z}_p - w)^2}$ — модуль относительной скорости частицы;

$$V_{px} = \dot{x}_p - u \text{ и } V_{pz} = \dot{z}_p - w$$

— компоненты относительной скорости песчинки; $\tau = D_p^2/(18\xi\eta)$ и $L = 8D_p/(27\xi)$.

Уравнения движения можно представить в удобном для анализа виде

$$\ddot{x}_p = -a_* \frac{V_{px}}{V_*} \left(1 + \frac{|\mathbf{V}_p|}{V_*} \right)$$

и

$$\ddot{z}_p = -g - a_* \frac{V_{pz}}{V_*} \left(1 + \frac{|\mathbf{V}_p|}{V_*} \right),$$

где $V_* = L/\tau$ и $a_* = V_*/\tau$.

В частности, для $D_p = 100$ мкм $V_* = 0,8$ м/с и $a_* = 11$ м/с². Под диаметром D_p здесь понимается диаметр сферической песчинки плотностью $\rho_p = 2,65$ г/см³.

Уравнения движения в большинстве случаев решаются при начальных условиях

$$x = z = 0, \dot{x}_p = v_{0x} \text{ и } \dot{z}_p = v_{0z},$$

где v_{0x} и v_{0z} — компоненты начальной скорости песчинки.

На траекторию песчинки сильно влияют вариации горизонтальной и вертикальной компонент скорости ветра $u(t)$ и $w(t)$, где t — время.

Предположим, что в приповерхностном слое атмосферы по аналогии с приземным слоем реальные вертикальные профили горизонтальной скорости ветра можно аппроксимировать логарифмическим профилем

$$u(z) = \frac{u_*}{\chi} \ln \frac{z}{z_0}.$$

Здесь u_* — «динамическая» скорость; z_0 — параметр шероховатости; $\chi = 0,4$ — постоянная Кармана. Как известно, при малых скоростях ветра параметр шероховатости сравнительно мал [5]. Далее будем использовать значение $z_0 = 1$ или $0,3$ мм (при малых скоростях вылета песчинки с подстилающей поверхности).

Ограничимся в данной статье, анализируя траектории песчинок, теми случаями, в которых можно принять условие $w = 0$. Следует отметить, что при использовании разработанного нами метода определения траекторных параметров форма профиля $u(z)$ не очень важна. По существу задачу можно свести к определению средней скорости ветра в заданных диапазонах высот.

В нашей задаче входными параметрами модели являются компоненты начальной скорости частицы v_{0x} и v_{0z} , диаметр песчинки D_p и динамическая скорость u_* (параметр z_0 фиксирован).

Численное моделирование показало, что все вышеперечисленные параметры модели заметно влияют на форму траектории и в том числе на дальность и максимальную высоту полета песчинки. В качестве примера на рис. 5 представлены три траектории сальтирующих песчинок.

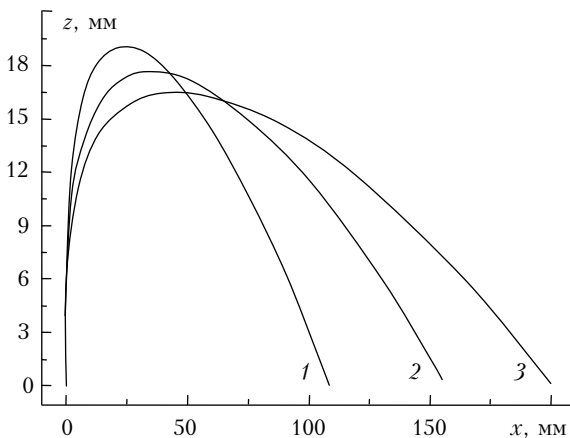


Рис. 5. Рассчитанные с помощью модели динамики сальтирующей песчинки траектории для входных параметров $D_p = 100$ мкм, $z_0 = 1$ мм, $v_{0x} = 0$ м/с, $v_{0z} = 1,0$ м/с и $u_* = 0,2$ (1), $0,3$ (2) и $0,4$ м/с (3)

Обратная задача динамики сальтирующих песчинок

После определения координат песчинки с шагом по времени $0,833$ мс на каждом участке траектории можно оценить компоненты скорости и ускорения песчинки. Однако возможности решения этой задачи сильно ограничены вследствие некорректности задачи численного дифференцирования при заметных ошибках определения координат песчинки.

В связи с этим нами была разработана методика восстановления параметров модели по интегральным траекторным параметрам для избранного участка траектории песчинки с использованием сглаживания наблюдаемых зависимостей $x_p(t)$ и $z_p(t)$.

На первом этапе по начальному участку траектории длительностью 3–5 мс определяются компоненты начальной скорости песчинки (скорости вылета с подстилающей поверхности).

На втором этапе для более длинного начального участка траектории (время полета 10–15 мс) определяются также горизонтальная и вертикальная компоненты скорости песчинки для момента прохождения избранного участка траектории v_x и v_z .

Затем для полученных значений v_{0x} и v_{0z} на заданной сетке параметров D_p (от 50 до 200 мкм) и u_* (от 0,2 до 1,0) строятся (рис. 6) линии равных значений v_x и линии равных значений v_z .

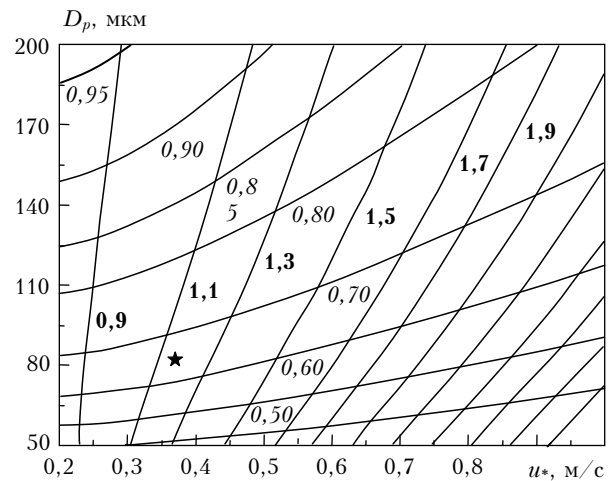


Рис. 6. Диаграмма для определения диаметра песчинки D_p и динамической скорости u_* по данным измерений горизонтальной компоненты скорости песчинки (значения скорости указаны жирным шрифтом) и вертикальной компоненты скорости (значения скорости указаны курсивом) в завершающий момент избранного интервала траектории сальтирующей песчинки. Звездочкой указано решение обратной задачи для траектории, представленной на рис. 3

Имея достаточно подробную сетку линий $v_x(D_p, u_*)$ и $v_z(D_p, u_*)$, по полученным для избранного участка исследуемой траектории значениям v_x и v_z в соответствующий момент времени найдем точку пересечения подходящих линий $v_x(D_p, u_*)$ и $v_z(D_p, u_*)$. Указанная точка имеет определенные координаты $D_p^{(0)}$ и $u_*^{(0)}$ (диаграмма рис. 6), которые дают полное ре-

шение обратной задачи для избранного участка траектории.

В частности, для наблюдаемой траектории, представленной на рис. 3, компоненты начальной скорости: $v_{0x} = 0,83$ м/с и $v_{0z} = 1,31$ м/с. Через 12,5 мс горизонтальная компонента скорости оказалась равной 1,11 м/с, а вертикальная снизилась до 0,63 м/с. Соответствующая точка на диаграмме рис. 6 помечена звездочкой. Из диаграммы следует, что эффективный диаметр песчинки $D_p = 82$ мкм, а динамическая скорость для рассматриваемого участка траектории $u^* = 0,37$ м/с. Следует отметить, что полученное значение мгновенной динамической скорости для приповерхностного слоя атмосферы не имеет прямого отношения к динамической скорости ветра в приземном слое атмосферы, которая определяется для достаточно большого временного интервала (статистическая характеристика турбулентности).

Разработанный нами диаграммный подход к рассматриваемой задаче наглядно свидетельствует о возможности однозначного решения обратной задачи динамики сальтирующих песчинок, если имеется достаточно надежная информация о значениях v_{0x} , v_{0z} , v_x и v_z .

На практике более удобными могут оказаться различные итерационные процедуры определения параметров задачи.

Наблюдаемые траектории далеко не всегда удается описать каким-либо вариантом модели с фиксированными параметрами. «Высокочастотная» турбулентность, которая до сих пор недостаточно изучена [12], в приповерхностном слое атмосферы часто приводит к заметным изменениям компонент скорости ветра во время полета песчинки. На начальном участке от точки с координатами (0, 0) до точки А с координатами ($x = 2,96$ мм и $z = 2,94$ мм) показанная на рис. 4 наблюдаемая траектория 1 с удовлетворительной точностью моделируется траекторией 2, для которой $u^{(1)} = 0,40$ м/с (параметр шероховатости $z_0 = 1$ мм). В данном случае диаметр песчинки $D_p = 200$ мкм. Выше точки А (см. рис. 4) видны заметные расхождения между траекториями 1 и 2.

Участок наблюдаемой траектории 1 за точкой А удается описать с помощью другой модельной траектории (3 на рис. 4) с другим значением параметра $u^{(2)} = 0,60$ м/с. Удовлетворительное согласие между траекториями 1 и 3 наблюдается примерно до точки В с координатами $x = 10,6$ мм и $z = 6,3$ мм. Поэтому участок траектории 1 за точкой В пришлось моделировать еще одной расчетной траекторией 4, для которой, как оказалось, $u^{(3)} = 0,23$ м/с.

Из полученных результатов следует, что на протяжении примерно 15 мс дважды отмечалось значительное изменение скорости ветра. Нетрудно показать, что наблюдавшийся порыв ветра ($u^{(2)} = 0,60$ м/с) на высотах 3–6 мм был обусловлен неоднородностью поля ветра с горизонтальным размером порядка 3 см.

Следует отметить, что на втором и последующих участках траектории можно было определить не только пульсацию горизонтальной компоненты скорости

ветра, но и эффективную (среднюю) вертикальную скорость в рассматриваемом порыве ветра сантиметрового масштаба.

Таким образом, по данным траекторных измерений с помощью разработанного нами метода решения обратной задачи динамики сальтирующей песчинки можно оценивать некоторые характеристики мелкомасштабной турбулентности в приповерхностном слое атмосферы, что представляет большой интерес при моделировании процессов переноса в ветропесчаном потоке.

Заключение

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Разработана методика скоростной видеосъемки траекторий сальтирующих песчинок в слое от 0 до 40 мм. Зарегистрированы траектории сальтирующих песчинок в ветропесчаном потоке на опустыненных территориях.

2. Приведен пример «мгновенного» (время осреднения 5 мс) вертикального профиля концентрации сальтирующих песчинок, на котором отчетливо выражен нижний слой сальтации с повышенной концентрацией песчинок толщиной около 15 мм.

3. Разработана численная модель динамики сальтирующих песчинок, в которой учитываются влияние аэродинамической силы торможения/разгона песчинок и сила тяжести.

4. Выполнено исследование влияния параметров модели (диаметр песчинки, динамическая скорость, вектор начальной скорости песчинки) на траектории сальтирующих песчинок.

5. Разработана методика решения обратной задачи динамики сальтирующих песчинок. Показано, что по данным измерений компонент скорости ветра для начального и конечного моментов времени определенного участка траектории песчинки можно вполне однозначно определить диаметр песчинки и соответствующее значение динамической скорости ветра в приповерхностном слое атмосферы.

6. Приведены примеры успешного решения обратной задачи динамики сальтирующей песчинки. Показано, что по данным траекторных измерений можно оценивать характеристики турбулентности в приповерхностном слое атмосферы.

Полученные оценки динамических параметров сальтирующих песчинок могут быть скорректированы, в частности, при использовании более точных зависимостей коэффициента трения от числа Рейнольдса.

Существует принципиальная возможность построения моделей, позволяющих учитывать влияние других факторов (электрическое поле, вращение песчинок и пр.) на траектории сальтирующих песчинок. Однако в этих случаях при решении обратной задачи динамики сальтирующих песчинок необходимо привлекать дополнительную информацию.

Авторы благодарят И.Н. Коновалова за участие в проведении измерений.

Работа поддержана грантами РФФИ № 10-05-00280-а и 11-05-10077-к.

1. *McEwan I.K., Willetts B.B., Rice M.F.* The grain/bed collision in sand transport by wind // *Sedimentology*. 1992. V. 39, N 11. P. 971–981.
2. *Rice M.A., Willetts B.B., McEwan I.K.* Observations of collision of saltating grains with a granular bed from high – speed cine – film // *Sedimentology*. 1996. V. 43, N 1. P. 21–31.
3. *Горчаков Г.И., Тумов А.А., Бунтов Д.В.* Параметры нижнего слоя сальтации на опустыненной территории // Докл. РАН. 2009. Т. 424, № 1. С. 102–106.
4. *Bagnold R.A.* The physics of blown sand and desert dunes. London: Methuen, 1941. 265 p.
5. *Бютнер Э.К.* Динамика приповерхностного слоя воздуха. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 158 с.
6. *Shao J.* Physics and modeling of wind erosion. N.Y.: Springer, 2000. 393 p.
7. *Zheng X.* Mechanics of wind blown sand movements. Berlin: Springer-Verlag, 2009. 290 p.
8. *Seinfeld J.H., Pandis S.N.* Atmospheric Chemistry and Physics. N.Y.: Wiley, 1998. 1326 p.
9. *Morsi S.A., Alexander A.Z.* An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems // *J. Fluid Mech.* 1972. V. 55, N 2. P. 193–208.
10. *Schmidt D.S., Schmidt R.A., Dent Y.D.* Electrostatic force on saltating sand // *J. Geophys. Res.* D. 1998. V. 103, N 8. P. 8997–9001.
11. *Горчаков Г.И., Бунтов Д.В., Карпов А.В., Злобин И.А., Соколов А.В.* Сальтация песчинок в приповерхностном слое атмосферы на опустыненных территориях // Естественные и антропогенные аэрозоли. VII. СПб.: СПбГУ, 2011. С. 293–298.
12. *Будаев В.П., Савин С.П., Зеленый Л.М.* Наблюдение перемежаемости и обобщенного самоподобия в турбулентном пограничном слое лабораторной и магнитосферной плазмы: на пути к определению количественных характеристик переноса // Успехи физ. наук. 2011. Т. 181, № 9. С. 905–952.

G.I. Gorchakov, A.V. Karpov, A.V. Sokolov, D.V. Buntov, I.A. Zlobin. **Experimental and theoretical investigation of the saltating sand trajectories over desertified areas.**

An experimental and theoretical investigation of the sand particle transport processes over desertified areas in the lower layer of the saltation has been carried out. Saltating sand trajectories were reconstructed by means of the high-speed video recording. Instantaneous profile example for saltating sand concentration in layer from 0 to 40 mm has been presented. The numerical model of the sand particle movement in the near-surface layer of the atmosphere was worked out. An influence analysis of the model parameters on the saltating sand trajectories was carried out. The solution method of the inverse problem for the task of the saltating sand dynamics has been proposed. Determination examples of the dynamics parameters from the saltating sand trajectories observed were given.