

УДК 551.510

Анализ вариаций скорости переноса сальтирующих песчинок

А.В. Карпов, Р.А. Гуцин, О.И. Даценко*

*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
119017, г. Москва, Пыжевский пер., 3*

Поступила в редакцию 18.10.2016 г.

Разработана методика восстановления вертикального профиля массового потока сальтации по данным измерений профиля массовой концентрации сальтирующих песчинок и профиля скорости ветра в приповерхностном слое атмосферы. Методика основана на решении прямых и обратных задач динамики сальтирующих песчинок и нацелена на определение коэффициента скольжения песчинок. Результаты расчетов коэффициента скольжения песчинок сопоставлены с данными измерений в ветровых каналах. Выявлены условия попадания траекторий сальтирующих песчинок в диапазоны высот от 5 до 10 мм и от 10 до 20 мм. Проанализировано влияние вариаций диаметра, скорости и угла вылета песчинок, а также динамической скорости на коэффициент скольжения сальтирующих песчинок. Впервые получены оценки коэффициента скольжения для мелкого песка с размером частиц 100 мкм.

Ключевые слова: динамика сальтации, прямые и обратные задачи, массовый поток сальтации, коэффициент скольжения, методика восстановления; saltation dynamics, direct and indirect problems, mass saltation flux, sliding coefficient, retrieving method.

Введение

Взаимодействие атмосферы с подстилающей поверхностью на опустыненных территориях приводит к перемещению больших объемов песка, быстрому изменению ландшафта и расширению территории песчаных пустынь [1–3]. Перенос песчаной фракции происходит, за исключением песчаных бурь, в тонком приповерхностном слое атмосферы [4–6], главным образом благодаря сальтации (скачкообразное перемещение песчинок). Следует отметить, что явление сальтации до сих пор недостаточно изучено [7–12].

Важными характеристиками процесса сальтации являются вертикальный профиль массового потока сальтации $\Phi(z)$ и твердый расход или суммарный массовый поток

$$R \equiv \int \Phi(z) dz.$$

По определению

$$\Phi(z) = M_p(z)U_p(z), \quad (1)$$

где $M_p(z)$ и $U_p(z)$ – профили массовой концентрации и горизонтальной компоненты скорости переноса сальтирующих песчинок соответственно.

В работах [7, 11] рассматривается задача определения «коэффициента скольжения» сальтирующих песчинок

$$k_p(z) = U_p(z)/U(z), \quad (2)$$

где U – скорость ветра (ветер имеет только горизонтальную компоненту). По известным профилям $k_p(z)$, $U(z)$ и $M_p(z)$ легко оценить параметр R .

Однако в связи с большими трудностями экспериментального определения объем полученных данных о вариациях коэффициента скольжения k_p до сих пор невелик. В [7] приведены примеры определения коэффициента скольжения для песка с эффективным размером (диаметром частиц) $D = 172$ мкм, а в [11] – для двух типов песка с эффективными размерами 242 и 320 мкм. В литературе отсутствует информация о коэффициенте скольжения для сальтирующих песчинок с размерами меньше 170 мкм, несмотря на то что мелкозернистые пески с эффективным размером порядка 100 мкм встречаются очень часто [7]. В частности, такие пески преобладают на опустыненных территориях в Калмыкии и Астраханской обл., где проводились исследования процесса сальтации сотрудниками Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН [6, 8–10].

Поэтому целью данной работы является исследование процесса скольжения сальтирующих песчинок, и в первую очередь мелкозернистого песка, в ветропесчаном потоке на опустыненных территориях. В связи с этим возникла необходимость в разработке методики восстановления коэффициента скольжения, которая основывается на результатах решения прямых и обратных задач динамики сальтирующих песчинок [6, 8] с использованием

* Алексей Владимирович Карпов (karpov@ifaran.ru); Роман Альбертович Гуцин (roma-max7@mail.ru); Олег Игоревич Даценко (datoleg@yandex.ru).

разработанной ранее модели [8]. С помощью вышеуказанной методики в работе выполняется исследование влияния вариаций параметров сальтации на коэффициент скольжения для песчинок размером от 100 до 250 мкм. Данный диапазон включает большинство ситуаций, наблюдаемых на реальных опустыненных территориях [1, 4, 7, 13, 14]. Задача верификации методики решается путем сопоставления результатов расчетов с данными измерений коэффициента скольжения в ветровых каналах [7, 11].

Анализ показал, что на современном этапе исследований целесообразно ограничиться оценкой изменчивости коэффициента скольжения для двух слоев сальтации: от 5 до 10 мм (первый слой) и от 10 до 20 мм (второй слой). Выше 20 мм концентрация сальтирующих песчинок, как правило, мала. Ниже 5 мм определение параметров сальтации осложняется, во-первых, большими концентрациями песчинок [11], во-вторых, необходимостью учета электрической силы, подъемной силы и силы Сэфмана при моделировании динамики сальтирующих песчинок [8, 15, 16] и, в-третьих, отклонениями профиля ветра от логарифмического.

Динамика сальтирующих песчинок

В рассматриваемом диапазоне высот динамика сальтирующих песчинок [8, 15, 17, 18] определяется действующими на песчинку силой тяжести $F_g = m_p g$, где m_p – масса песчинки и g – ускорение силы тяжести, и аэродинамической силой

$$F_D = 0,5 C_D \rho Q \mathbf{V}_p |\mathbf{V}_p|, \quad (3)$$

где

$$C_D = 24 \text{Re}_p^{-1} [1 + 0,15 \text{Re}_p^{2/3}], \quad (4)$$

– коэффициент лобового сопротивления; ρ – плотность воздуха; $Q = 0,25 \pi D_p^2$ – площадь поперечного сечения; $\text{Re}_p = D_p |\mathbf{V}_p| / \nu$ – число Рейнольдса; ν – кинематическая вязкость воздуха и $\mathbf{V}_p = \mathbf{U} - \mathbf{U}_p$ – вектор скорости песчинки относительно воздушного потока. Сила Магнуса F_M [5], действующая на вращающуюся песчинку, в данной работе не учитывается. При решении прямых задач динамики сальтирующих песчинок в качестве начальных условий учитываются модуль скорости V_0 и угол вылета α песчинок с подстилающей поверхности. При моделировании сальтации профиль ветра предполагается логарифмическим [19, 20]:

$$U(z) = \kappa^{-1} u_* \ln[(z + z_0)/z_0]. \quad (5)$$

Здесь u_* – динамическая скорость; $\kappa = 0,4$ – постоянная Кармана и z_0 – параметр шероховатости.

В ветропесчаном потоке наблюдается большое разнообразие траекторий сальтирующих песчинок [7, 8, 11, 21]. В частности, в широких пределах меняются дальность полета песчинок и максимальная высота полета. С целью сопоставления траекторий с широким диапазоном измерения дальностей и высот полета использованы координаты $\ln(z + z_0)$

и $\ln(x + x_0)$, где x – продольная координата, z_0 – параметр шероховатости (для логарифмического профиля ветра) и $x_0 = z_0$. Было выбрано значение $z_0 = 1$ мм, которое, как правило, обеспечивало оптимальное решение обратных задач динамики сальтирующих песчинок по данным скоростной видеосъемки [8, 15].

На рис. 1 показаны три траектории частиц с эффективным диаметром $D_p = 100$ мкм (1, 3, 5): для угла вылета $\alpha = 90^\circ$ (перпендикулярно к подстилающей поверхности) при динамической скорости $u_* = 0,3$ м/с (1) и 1,0 м/с (3) и значениях модуля скорости вылета $V_0 = 0,4$ (1) и 1,0 м/с (3) и для угла вылета 30° (5) при $u_* = 1$ м/с и $V_0 = 1,0$ м/с, а также четыре траектории для частиц с эффективным диаметром $D_p = 250$ мкм (2, 4, 6, 7): для угла вылета 90° (2, 4) при $u_* = 0,3$ м/с и $V_0 = 0,4$ м/с (2) и при $u_* = 1,0$ м/с и $V_0 = 1,0$ м/с (4) и для угла вылета 30° (6, 7) при $u_* = 1,0$ м/с и $V_0 = 1,0$ м/с (6) и 2,0 м/с (7).

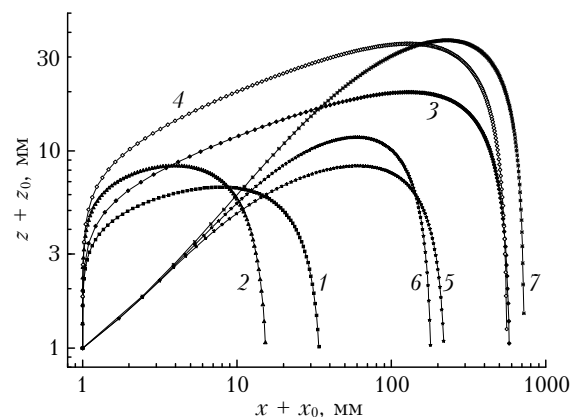


Рис. 1. Траектории сальтирующих песчинок размерами 100 (1, 3, 5) и 250 мкм (2, 4, 6, 7) для модуля скорости вылета 0,4 (1, 2), 1,0 (3–6) и 2,0 м/с (7), угла вылета песчинки 90° (1–4), 30° (5–7) и динамической скорости 0,3 (1, 2) и 1,0 м/с (3–7)

Нетрудно увидеть, что размер песчинок, динамическая скорость, модуль скорости вылета и угол вылета песчинок существенно влияют на параметры траекторий. Анализ траекторий, в частности, показал, что при максимальной высоте полета песчинок больше 5 мм дальность полета намного больше высоты. Поэтому траектории, представляющие интерес для данной работы, являются квазигоризонтальными. Перенос песчинок вблизи подстилающей поверхности обсуждается в работе [15].

При оценке вариаций коэффициента скольжения важно знать, при каких значениях параметров D_p , u_* , V_0 и α траектории попадают в первый ($z = 5$ –10 мм) и второй слой ($z = 10$ –20 мм) сальтации. Анализ показал, что с этой целью необходимо определить области совместного изменения скорости V_0 и угла вылета α при фиксированных значениях параметров D_p и u_* , обеспечивающие достижение максимальных высот полета песчинок (5, 10 и 20 мм). Согласно данным наших расчетов с помощью специ-

ально разработанной методики, кривая 1 на рис. 2, а определяет соотношение между V_0 и α для частиц с $D_p = 100$ мкм при динамической скорости 0,3 м/с с заданной максимальной высотой траекторий 5 мм. Аналогичные кривые 2 и 3 соответствуют максимальным высотам траекторий 10 и 20 мм. Расчеты, выполненные для максимальной высоты полета 5 мм при других значениях динамической скорости, включая $u_* = 1,0$ м/с (см. рис. 2, а, кривая 4), показали, что в рассматриваемом случае максимальная высота полета слабо зависит от динамической скорости. Влияние последней становится более существенным для максимальных высот полета 10 и 20 мм (см. рис. 2, а, кривые 5 и 6).

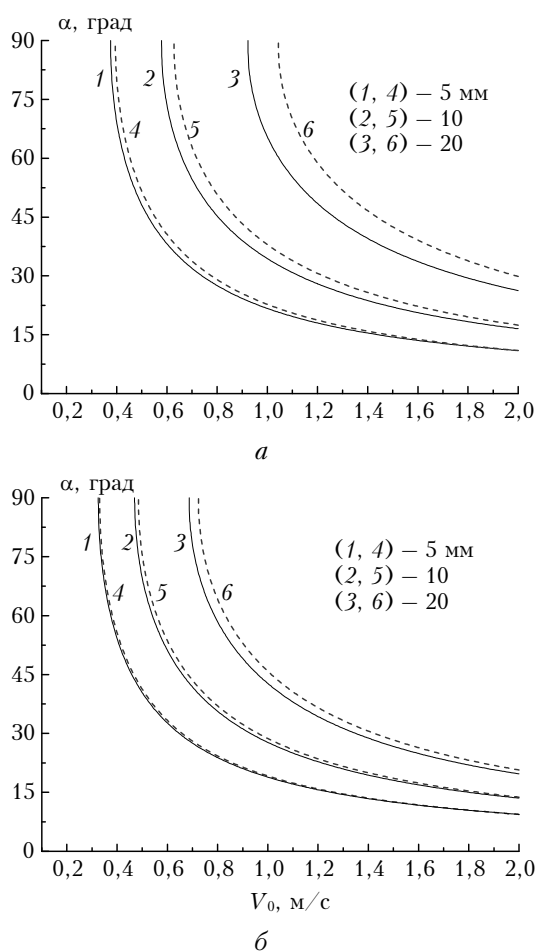


Рис. 2. Вариации модуля скорости вылета V_0 и угла вылета α сальтирующих песчинок размерами 100 (а) и 250 мкм (б) с максимальными высотами траекторий 5 (1, 4), 10 (2, 5) и 20 мм (3, 6) при динамической скорости 0,3 (1–3) и 1,0 м/с (4–6)

Видно (рис. 2, а), что в слой сальтации попадают только песчинки, скорость вылета V_0 которых превышает $\sim 0,38$ м/с. При больших углах вылета ($\alpha > 60^\circ$) максимальная высота траектории попадает в слой 5–10 мм, если скорость вылета V_0 не превышает 0,7 м/с. Напротив, при малых углах ($\alpha < 30^\circ$) в первый слой попадают только песчинки со скоростью вылета больше 0,7 м/с. Максималь-

ная высота полета при больших углах достигает второго слоя сальтации, если модуль скорости вылета песчинок меняется в пределах примерно от 0,60 до 1,05 м/с (динамическая скорость 0,3 м/с) или от 0,65 до 1,2 м/с (динамическая скорость 1,0 м/с). При малых углах максимальная высота траектории попадает в слой 10–20 мм, когда скорость вылета V_0 находится примерно в диапазоне 1,1–1,8 м/с ($u_* = 0,3$ м/с) или в диапазоне 1,2–2,0 ($u_* = 1,0$ м/с). Для песчинок с эффективным диаметром 250 мкм закономерности изменчивости максимальной высоты траектории (рис. 2, б) качественно подобны аналогичным закономерностям для песчинок с эффективным диаметром 100 мкм. Кривые равных высот для $D_p = 250$ мкм смещаются влево (в сторону меньших V_0), причем максимальное смещение имеет место для уровня 20 мм. Обращает на себя внимание уменьшение влияния динамической скорости на высоту полета с ростом размера песчинок.

В моделях сальтации важное место отводится двум механизмам вылета песчинок с подстилающей поверхности [5]: отскоки падающих песчинок от подстилающей поверхности (рикошетирующие, первый механизм) и выбивание падающими песчинками новых песчинок (второй механизм).

Для песчинок диаметром 150–250 мкм среднее значение угла рикошетирувания примерно равно 40° [5], а средняя скорость вылета около 2,0 м/с. Скорость выбиваемых песчинок составляет в среднем 0,30 м/с, а средний угол вылета 57° .

Согласно представленным на рис. 2 данным, для большинства выбиваемых песчинок максимальная высота траекторий не превышает 5 мм. Рикошетирующие частицы со скоростью вылета 2,0 м/с попадают в первый и второй слой сальтации только при малых углах вылета.

Следует иметь в виду, что как для выбиваемых с подстилающей поверхности, так и для рикошетирующих песчинок распределения по скоростям и углам вылета сравнительно широкие, а их параметры различны у разных авторов [2, 5]. Поэтому чаще рассматриваются широкие одномодальные распределения вышеуказанных параметров [11, 21–23]. По данным [11], средняя скорость вылета песчинок равна 0,38 м/с, а средний угол вылета варьирует примерно от 15 до 25° в зависимости от динамической скорости. Статистика вариаций параметров сальтирующих песчинок на опустыненных территориях нуждается в дальнейших исследованиях.

Коэффициент скольжения сальтирующих песчинок

Предметом нашего исследования являются коэффициенты скольжения песчинок для двух заданных слоев сальтации. Из рассмотрения исключены случаи с высокими траекториями, дважды пересекающими выделенные слои, поскольку их вклад в суммарный массовый поток R невелик. Коэффициент

скольжения k_i ($i = 1, 2$ – номер слоя) определяется как отношение средней скорости песчинки V_i в заданном слое к средней скорости ветра u_i , действующего на сальтирующую песчинку в заданном слое. Коэффициенты k_1 и k_2 рассчитывались с помощью специально разработанного алгоритма с использованием модели динамики песчинок [13, 18].

На рис. 3 приведены примеры зависимостей коэффициента скольжения песчинок с эффективным диаметром 100 мкм от динамической скорости для некоторых значений угла вылета и модуля скорости вылета. Кривая 1 рассчитана для значений параметров $\alpha = 30^\circ$ и $V_0 = 1,6$ м/с. При этом максимальная высота полета достигает 15–17 мм (второй слой сальтации). В данном случае коэффициент скольжения при малых значениях динамической скорости (близких к пороговой скорости сальтации [2, 5]) превышает 0,9. С увеличением динамической скорости коэффициент скольжения уменьшается до 0,65–0,70.

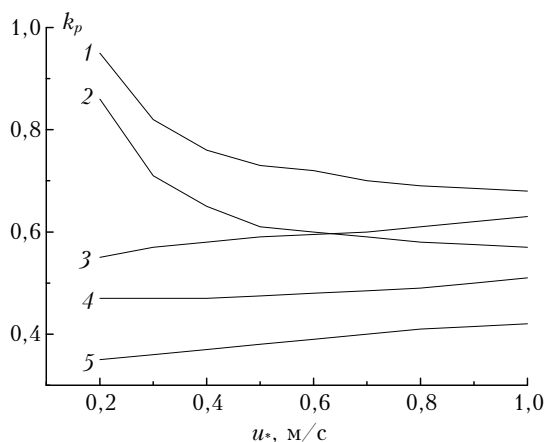


Рис. 3. Зависимость коэффициента скольжения песчинок диаметром 100 мкм от динамической скорости для угла вылета 30° (1, 2) и модуля скорости вылета 1,6 (1) и 1,0 м/с (2); угла 45° и скорости 1,0 м/с (3); угла 75° и скорости 0,5 м/с (4); угла 90° и скорости 0,4 м/с (5)

Повышенные значения коэффициента скольжения при малых значениях динамической скорости объясняются большой начальной величиной горизонтальной компоненты скорости песчинки. Эффект начальной скорости наблюдается и при меньших значениях модуля скорости вылета V_0 . В частности, на рис. 3 показана зависимость $k_p(u_*)$ для $\alpha = 30^\circ$ и $V_0 = 1,0$ м/с (кривая 2). В этом случае максимальная высота траектории равна примерно 8 мм (нижний слой). Несложно заметить, что в слое 5–10 мм коэффициент скольжения заметно меньше, чем в слое 10–20 мм. При увеличении угла вылета меняется характер зависимости k_p от u_* : мы наблюдаем постепенный рост k_p с увеличением u_* , что объясняется усилением разгона песчинок воздушным потоком. Кривая 3 на рис. 3 соответствует параметрам $\alpha = 45^\circ$ и $V_0 = 1,0$ м/с и максимальной высоте полета песчинок примерно

13 мм. Коэффициент скольжения при этом сравнительно велик: от 0,55 для $u_* = 0,2$ м/с до 0,63 для $u_* = 1,0$ м/с. Большие углы вылета и малые значения модуля скорости вылета характерны для нижнего слоя (5–10 мм). На рис. 3 показаны зависимости $k_p(u_*)$ для $\alpha = 75^\circ$ и $V_0 = 0,5$ м/с (4), а также для $\alpha = 90^\circ$ и $V_0 = 0,4$ м/с (5); при этих значениях параметров максимальная высота траекторий песчинок составляет примерно 7 и 5 мм соответственно. В последнем случае коэффициент скольжения снижается до 0,35–0,42 в диапазоне изменения u_* от 0,2 до 1,0 м/с.

Анализ показал, что размер сальтирующих песчинок заметно влияет на величину коэффициента скольжения. На рис. 4 приведены примеры зависимостей коэффициента скольжения песчинок диаметром 250 мкм от динамической скорости. При угле вылета 30° максимальные значения $k_p \approx 0,7$ –0,8 наблюдаются при малых значениях u_* , в частности для $V_0 = 1,2$ (кривая 1) и 0,9 м/с (кривая 2). Отметим, что кривым 1 и 2 соответствуют максимальные высоты полета песчинок 15 и 10 мм. При больших значениях динамической скорости (при $\alpha = 30^\circ$) k_p снижается до 0,3–0,4, что существенно меньше, чем для песчинок диаметром 100 мкм.

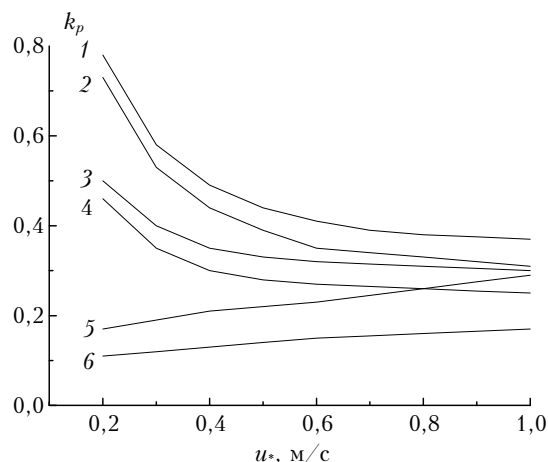


Рис. 4. Зависимость коэффициента скольжения песчинок диаметром 250 мкм от динамической скорости для угла вылета 30° (1, 2) и модуля скорости вылета 1,2 (1) и 0,9 м/с (2); угла 45° (3, 4) и скорости 0,8 (3) и 0,6 м/с (4); угла 90° (5, 6) и скорости 0,6 (5) и 0,4 м/с (6)

С увеличением угла вылета до 45° (рис. 4, кривые 3 и 4) эффект начальной скорости и средний уровень k_p заметно снижаются, что видно в случаях, когда $V_0 = 0,8$ (кривая 3) и 0,6 м/с (кривая 4), а максимальная высота полета примерно равна 13,5 и 11 мм соответственно.

При больших углах вылета и малых значениях динамической скорости наблюдается существенное уменьшение k_p для песчинок диаметром 250 мкм до уровня 0,1–0,2. Этот результат иллюстрируется зависимостями $k_p(u_*)$ для $\alpha = 90^\circ$ и значений скорости вылета $V_0 = 0,6$ (5) и 0,4 м/с (6), что соответствует максимальным высотам полета песчинок

примерно 15 и 7,5 мм. С увеличением u_* до 1,0 м/с k_p (при $\alpha = 90^\circ$) увеличивается до 0,15–0,30.

Отметим, что изменения типа зависимостей $k_p(u_*)$ при увеличении угла вылета от 30 до 90° имеет место во всем диапазоне размеров песчинок от 100 до 250 мкм.

Сопоставление результатов моделирования с данными наблюдений

В [7] представлены данные измерений коэффициента скольжения песчинок с эффективным диаметром 172 мкм для диапазона изменения динамической скорости примерно от 0,5 до 0,9 м/с и диапазона высот от 10 до 60 мм. Коэффициент скольжения определяется по данным синхронных измерений профилей скорости ветра, массовой концентрации песчинок и массового потока сальтации. Концентрация песчинок оценивалась по ослаблению пучка света ветропесчаным потоком, а их массовый поток измерялся с помощью малогабаритного пескоуловителя. По данным [7], в частности, $k_p \cong 0,6$ для $u_* = 0,9$ м/с (параметр шероховатости $z_0 \cong 2$ мм) на уровне 15 мм, что соответствует выбранному нами верхнему слою сальтации.

Выполненные с использованием нашей модели расчеты для $u_* = 0,9$ м/с, $z_0 = 2$ мм и $D_p = 170$ мкм показали, что при угле вылета $\alpha = 15^\circ$ и скорости вылета около 2,5 м/с (максимальная высота полета 15–16 мм) коэффициент скольжения достигает примерно 0,635–0,65, что вполне удовлетворительно согласуется с результатами [7]. Отметим, что при $\alpha = 30^\circ$ и $V_0 = 1,3$ м/с коэффициент скольжения снижается до 0,5. Таким образом, в рассматриваемом случае поток на высоте 15 мм определялся фракцией быстрых песчинок с малым углом вылета к подстилающей поверхности.

Рассмотрим еще один пример определения коэффициента скольжения [7]. При динамической скорости 0,52 м/с, оцененной нами по приведенному в [7] профилю скорости ветра (в [7] ошибочно указано значение $u_* = 0,72$ м/с) и $z_0 = 0,3$ мм коэффициент скольжения на высоте 15 мм равен примерно 0,5. Наши расчеты для $u_* = 0,5$ м/с, $z_0 = 0,3$ мм и $D_p = 170$ мкм дали величину $k_p = 0,48$ –0,51 при $\alpha = 30^\circ$ и $V_0 = 1,2$ –1,3 м/с (максимальная высота полета 13,3–15,3 мм). Следовательно, в рассматриваемом эксперименте при $u_* \cong 0,5$ м/с основной вклад в поток на высоте около 15 мм вносили песчинки, вылетающие с подстилающей поверхности со скоростью 1,2–1,3 м/с под углом $\sim 30^\circ$.

K. Rasmussen and M. Sorensen выполнили ряд измерений коэффициента скольжения [11] в ветровом канале для сальтирующих песчинок со средними размерами 242 и 320 мкм при вариациях динамической скорости от 0,27 до 0,69 м/с. Для песчинок размером 242 мкм измерения выполнены в диапазоне высот от 5 до 80 мм. Скорость песчинок определялась методом лазерной доплеровской анемометрии.

Согласно данным измерений [11], при динамической скорости 0,69 м/с (параметр шероховатости $z_0 = 1$ мм) коэффициент скольжения песчинок диаметром 242 мм на высоте 15 мм равен примерно 0,57.

С целью сравнения результатов моделирования с данными [11] были выполнены расчеты коэффициентов скольжения для $u_* = 0,7$ м/с, $z_0 = 1$ мм и $D_p = 250$ мкм. Оказалось, что $k_p \cong 0,56$ –0,57 при $\alpha = 15^\circ$ и $V_0 = 2,25$ –2,30 м/с. В данном случае хорошее согласие результатов моделирования с данными измерений имеет место для угла вылета: в [11] средний угол вылета песчинок при $u_* = 0,69$ м/с равен 16° . Однако среднее значение вертикальной компоненты скорости вылета песчинок в нашем расчете (0,57 м/с) заметно превышает принятую в модели [11] величину 0,38 м/с.

По данным [11], коэффициент скольжения песчинок размером 242 мкм на высоте 15 мм при динамической скорости 0,27 м/с и $z_0 \cong 0,08$ мм оказался равным примерно 0,66. Расчеты k_p с помощью нашей модели для $u_* = 0,3$ м/с, $z_0 = 0,1$ мм и $D_p = 250$ мкм показали, что $k_p \cong 0,65$ при угле вылета 15° и скорости вылета 2,25 м/с. Авторы [11] утверждают, что результаты измерений k_p для $D_p = 330$ мкм близки к аналогичным данным для $D_p = 242$ мкм. Поэтому указанные результаты нами не обсуждаются.

Представленные примеры свидетельствуют об удовлетворительном согласии результатов моделирования с опубликованными результатами измерений коэффициента скольжения и, следовательно, о возможности использования разработанной нами методики для восстановления вертикального профиля массового потока сальтации и твердого расхода.

Заключение

Основные результаты работы заключаются в следующем.

С использованием разработанной методики восстановления массового потока в заданном слое сальтации определены диапазоны изменения размера, скорости и угла вылета песчинок, а также динамической скорости.

Проанализировано влияние вариаций динамической скорости (0,2–1 м/с), угла (30–90°) и модуля скорости вылета (0,3–2 м/с) песчинок с подстилающей поверхности на коэффициент скольжения сальтирующих песчинок размерами 100 и 250 мкм.

Показано, что большие значения коэффициента скольжения, достигающие 0,8–0,9, имеют место при сравнительно малых значениях динамической скорости (u_* меньше примерно 0,4 м/с) и угла вылета песчинок (α меньше приблизительно 35–40°). В указанных условиях наблюдается быстрое уменьшение коэффициента скольжения (примерно от 0,8–0,9 до 0,4–0,5) с увеличением динамической скорости.

При больших углах вылета песчинок ($\alpha > 60^\circ$) наблюдается постепенный рост коэффициента скольжения с увеличением динамической скорости примерно

от 0,30–0,55 до 0,40–0,65 для песчинок размером 100 мкм и примерно от 0,1–0,3 до 0,15–0,40 для песчинок размером 250 мкм.

Результаты выполненных расчетов удовлетворительно согласуются с данными лабораторных измерений коэффициента скольжения песчинок размерами 240 и 320 мкм [11] и 172 мкм [7].

Авторы благодарят Г.И. Горчакова за ценные советы, а также рецензента и редактора за полезные замечания.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 14-05-00523 и 16-35-00467).

1. *Bagnold R.A.* The physics of blown sand and desert dunes. London: Methuen, 1941. 265 p.
2. *Zheng X.* Mechanics of windblown sand movements. Berlin: Springer-Verlag, 2009. 290 p.
3. *Золотокрылин А.Н.* Климатическое опустынивание. М.: Наука, 2003. 247 с.
4. *Бютнер Э.К.* Динамика приповерхностного слоя воздуха. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 158 с.
5. *Shao Y.* Physics and modeling of wind erosion. New York: Springer, 2008. 452 p.
6. *Горчаков Г.И., Титов А.А., Бунтов Д.В.* Параметры нижнего слоя сальтации на опустыненной территории // Докл. АН. 2009. Т. 424, № 1. С. 103–106.
7. *Семенов О.Е.* Введение в экспериментальную метеорологию и климатологию песчаных бурь. Алматы: КазНИИЭК, 2011. 580 с.
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., Копейкин В.М., Карпов А.В., Бунтов Д.В., Соколов А.В.* Удельный заряд сальтирующих песчинок на опустыненных территориях // Докл. АН. 2014. Т. 456, № 4. С. 476–480.
10. *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 areas // Atmos. Ocean. Opt. 2016. V. 29, N 6. P. 501–506.
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. *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.
13. *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.
14. *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: Сб. трудов. Санкт-Петербург: СПбГУ, 2011. С. 293–298.
15. *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.
16. *Schmidt D.S., Schmidt R.A., Dent J.D.* Electrostatic force on saltating sand // J. Geophys. Res. 1998. V. 103, N D8. P. 8997–9001.
17. *Wang Z.-T., Zhang C.-L., Wang H.-T.* Forces on a saltating grain in air // Eur. Phys. J. E. 2013. V. 36. P. 112.
18. *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.
19. *Обухов А.М.* Турбулентность и динамика атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 414 с.
20. *Курбацкий А.Ф.* Введение в моделирование турбулентного переноса импульса и скаляра. Новосибирск: ГЕО, 2007. 332 с.
21. *Fu L.-T., Bo T.-L., Gu H.-H., Zheng X.-J.* Incident Angle of Saltating Particles in Wind – Blown Sand // PLOS ONE. 2013. V. 8, N 7. Art. Id. e67935.
22. *White B.R., Schulz J.C.* Magnus effect in saltation // J. Fluid. Mech. 1977. V. 81, N 3. P. 497–512.
23. *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.

A.V. Karpov, R.A. Gushchin, O.I. Datsenko. **The analysis of variations in the saltating sand transfer velocity.**

A technique is developed for retrieving the vertical profile of the mass saltation flux from measurements of the saltating sand mass concentration and wind velocity in the surface air layer. The technique is based on the solution of direct and inverse problems of the saltation sand dynamics. In order to estimate the saltating sand sliding coefficient, calculation results are compared with measurements in wind channels. The conditions for the saltating sand trajectories to fall in the altitude ranges from 0.5 to 1.0 cm and from 1.0 to 2.0 cm are ascertained. The effects of the diameter, sand grain liftoff velocity and angle, and the friction velocity on the sliding coefficient are analyzed. The sliding coefficient for sand particles of 100 μm diameter is estimated for the first time.