



Моделирование динамики электризованного потока частиц при ветровом выносе средствами OpenFoam

*Е.А. Малиновская, ORCID: 0000-0003-0385-0396 <elen_am@inbox.ru>,
Г.И. Горчаков, ORCID: 0009-0002-6454-8326 <gengor@ifaran.ru>,
А.В. Карпов, ORCID: 0009-0004-8906-8200 <karpov@ifaran.ru>,
Л.О. Максименков, ORCID: 0000-0002-1909-0777 <maksimenkov@ifaran.ru>,
О.И. Даценко, ORCID: 0009-0009-6596-3805 <datsenko@ifaran.ru>*

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

Аннотация. Исследуется генерация пылевого аэрозоля при скачкообразном каскадном движении заряженных частиц над неровной поверхностью под влиянием ветра. Частицы движутся над двумя элементами типа ряби на эоловой поверхности под влиянием воздушного потока. За препятствиями поток сальтирующих частиц становится неравномерным, характер движения отмечается квазипериодичностью. Решалась задача включения электростатических эффектов в гидродинамическую модель, в которой учтено взаимовлияние частиц и воздушной среды. Предложена параметрическая модель, позволяющая учитывать в моделировании ветрового выноса заряженность самих пылевых частиц и подстилающей поверхности. Вычислительные эксперименты проведены с использованием открытого пакета OpenFOAM – Эйлерово-Лагранжевая турбулентная $k-\omega$ -модель. Соответственно, динамика заряженных частиц рассматривается с учётом электризации самой поверхности. Из результатов вычислительных экспериментов для различных плотностных характеристик частиц, заряженных одноименно с поверхностью, оценено влияние электрического поля на частоту изменения числа частиц в потоке, на разброс значений скоростей движения и высоту подскоков частиц, а также на ослабление эффекта воздействия частиц на среду за препятствиями. При учете влияния электростатических эффектов выявлено усиление возмущающего воздействия частиц, вылетающих после препятствий, на воздушную среду (увеличивается расстояние от препятствия, появляется больше локальных областей возмущения). Для скоростей движения сальтирующих частиц отмечается уменьшение величины дисперсии. Высота подскоков частиц увеличивается, что подтверждается известными экспериментами. Уменьшается нижнее значение характерных частот изменения числа частиц в потоке. Неравномерность потока частиц определяет изменения в интенсивности генерации пылевого аэрозоля.

Ключевые слова: сальтации частиц, численное моделирование движения частиц в гидродинамическом потоке, электрическое поле.

Для цитирования: Малиновская Е.А., Горчаков Г.И., Карпов А.В., Максименков Л.О., Даценко О.И. Моделирование динамики электризованного потока частиц при ветровом выносе средствами OpenFoam. Труды ИСП РАН, том 35, вып. 5, 2023 г., стр. 271–286. DOI: 10.15514/ISPRAS-2023-35(5)-18.

Благодарности: Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда – проект №23-27-00480 "Исследование генерации и выноса пылевого аэрозоля над аридными территориями в условиях неоднородности рельефа и температуры". Автор выражает благодарность О.Г. Чхетиани за полезные консультации и обсуждения.

Modelling the Dynamics of Electrified Particle Flow during Wind Drift Using Openfoam

E.A.Malinovskaya, ORCID: 0000-0003-0385-0396 <elen_am@inbox.ru>.

G.I.Gorchakov, ORCID: 0009-0002-6454-8326 <gengor@ifaran.ru>,

A.V. Karpov, ORCID: 0009-0004-8906-8200 <karpov@ifaran.ru>,

L.O. Maksimenkov, ORCID: 0000-0002-1909-0777 <maksimenkov@ifaran.ru>,

O.I. Datsenko, ORCID: 0009-0009-6596-3805 <datsenko@ifaran.ru>

A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS,
119017, Russia, Moscow, Pyzhevsky per., 3.

Abstract. We study the generation of dust aerosol in the wind-driven cascading motion of charged particles over an irregular surface. The particles move under the influence of air flow over two elements of ripple type on an aeolian surface. Behind the obstacles the flow of saltation particles becomes non-uniform, the character of motion is noted by quasi-periodicity. The problem of including electrostatic effects into the hydrodynamic model, in which the mutual influence of particles and air medium is taken into account, was solved. A parametric model is proposed, which allows taking into account the chargeability of dust particles and the underlying surface in modeling wind transport. Computational experiments are carried out using the open source OpenFOAM package, the Eulerian-Lagrangian turbulent $k-\omega$ -model. Accordingly, the dynamics of charged particles is considered taking into account the electrification of the surface itself. From the results of computational experiments for different density characteristics of particles charged homonymously with the surface, the influence of the electric field on the frequency of change of the number of particles in the flow, on the scattering of values of velocities and the height of particle hops, as well as on the weakening of the effect of particles on the medium behind obstacles is estimated. When the influence of electrostatic effects is taken into account, an increase in the disturbing effect of particles flying after obstacles on the air medium is revealed (the distance from the obstacle increases, more local areas of disturbance appear). A decrease in the dispersion value is noted for the velocities of hopping particles. The height of particle jumps increases, which is confirmed by known experiments. The lower value of characteristic frequencies of change in the number of particles in the flow decreases. The non-uniformity of the particle flow determines changes in the intensity of dust aerosol generation.

Keywords: particle saltations, numerical modelling of particle motion in hydrodynamic flow, electric field.

For citation: Malinovskaya E.A., Gorchakov G.I., Karpov A.V., Maksimenkov L.O., Datsenko O.I. Modelling the dynamics of electrified particle flow during wind drift using OpenFoam. *Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS*, vol. 35, issue 5, 2023. pp. 271-286 (in Russian). DOI: 10.15514/ISPRAS-2023-35(5)-18.

Acknowledgements. The research was supported by the Russian Science Foundation, project №23-27-00480 "Study of generation and export of dust aerosol over arid territories under conditions of terrain and temperature inhomogeneities". Authors would also like to thank O.G. Chkhetiani for useful consultations and discussions.

1. Введение

Аридные и субаридные территории – основной источник пылевого аэрозоля [1], так как пыль оказывает влияние на конденсацию влаги и облакообразование, массопереноса веществ твердой и жидкой фазы, изменение радиационного баланса Земли [2]. При скоростях ветра, превышающих критические значения [3] (около 3.5–5 м/с на высоте 2 м), начинается сальтация – скачкообразное каскадное движение частиц с размерами порядка 80–150 мкм у подстилающей поверхности, которое способствует генерации пылевого аэрозоля в результате фрагментирования и откалывания в момент соударения с поверхностью частиц [1]. Выделяются следующие основные силы, регулирующие ветровой вынос с поверхности и дальнейшее перемещение частиц в потоке:

- сила, возникающая за счет разности давлений при обтекании частицы над частицей и под ней подъемная сила [4-7];

- сила, возникающая при вращении частицы в потоке силы Магнуса [4-7].

Недостаточно изучено влияние микроциркуляций у поверхности на подъем частиц [3,8-9], турбулентных течений [5-6] и микровихрей, возникающих вблизи поверхности [10].

Также электростатический эффект увеличивает (при положительном заряде) и уменьшает (для отрицательного заряда) высоту подскоков сальтирующих заряженных частиц [1]. Увеличивается в результате величина массового потока сальтирующих частиц [11]. Эти факторы влияют на величину скорости падения частицы на поверхность и их количество, что отражается на процессе генерации микрочастиц.

При полевых измерениях, выполненных на опустыненной территории в Калмыкии, выявлено, что концентрации субмикронной фракции аридного аэрозоля размерами 0,2-0,4 мкм меняются в зависимости от величины напряженности электрического поля. Усиление и ослабление поля зависит от скорости и направления ветра по отношению к основному направлению дюнных гряд [1]. Эмиссия пыли усиливается при увеличении величины напряженности электрического поля [12-13].

Выявлено возникновение характерных частот (от 10 до 200 Гц) для числа сальтирующих частиц в потоке над неровной подстилающей поверхностью, в том числе и в численном эксперименте средствами открытого пакета OpenFoam (Эйлерово-Лагранжевая турбулентная $k-\omega$ -модель) [14]. Это обстоятельство говорит о наличии существенных колебаний значения массового потока сальтирующих частиц, что влияет на изменения интенсивности генерации пылевого аэрозоля. Возникающий эффект связывается с наличием на подстилающей поверхности естественного микрорельефа – ряби (составленные из отдельных песчинок продолговатые естественные неровности высотой около 1 см на расстоянии от 10 до 25 см друг от друга).

Оценить высоту подскоков и изменение траектории отдельной частицы, сальтирующей над поверхностью, можно с использованием известных сведений о силах, действующих на частицу. Такие оценки применимы для ламинарного движения при наличии ровной поверхности. В статье предлагается применить методы численного моделирования для учета влияния на гидродинамические свойства среды постоянно присутствующего в естественных условиях эффекта заряженных частиц. Также необходимо учитывать фактор наличия микрорельефа подстилающей поверхности.

Процессы движения частиц песка в воздушном потоке моделируются с использованием турбулентных моделей LES методом дискретных элементов [15] и с Лагранжевыми частицами [16-17]. Влияние потока на связанные частицы рассмотрено в [18-19]. В численных экспериментах выявляется влияние эоловых форм рельефа, отдельных элементов [20-21] на характеристики воздушного потока и переносимых в нем песчаных частиц [15, 22], на появление турбулентных структур [23].

В проводимых в статье исследованиях применялся открытый пакет OpenFOAM [24]. Известны его приложения к решению задач моделирования структуры обтекающего потока вблизи эоловых форм рельефа [25-30]. В [25, 29-30] использовался решатель PimpleFOAM в задаче обтекания эоловых форм рельефа, а в [26] – PisoFOAM.

В следующем разделе приведено описание Эйлерово-Лагранжевой модели, реализованной в OpenFOAM.

2. Перенос частиц воздушным потоком в Эйлерово-Лагранжевой модели

Движение сальтирующих частиц в воздушном потоке со скоростью u реализуется при

наличии градиента давления: $F_p = -\frac{\pi d_p^3}{6} \nabla p$. Происходит подъем под действием силы

разности давлений:

$$F_D = C_D \frac{\pi d_p^2}{8} \rho (u - v_p) |u - v_p|, \quad (1)$$

где $C_D = \frac{24}{\text{Re}} (1 + 0.15 \text{Re}^{0.687})$, d_p – диаметр частиц, v_p – скорость движения частицы.

При этом действует сила тяжести:

$$F_g = m_p g \left(1 - \frac{\rho}{\rho_p} \right). \quad (2)$$

Взаимодействие между частицами в OpenFOAM реализовано в рамках модели мягких сфер на основе теории точечных контактов Герца. Силы взаимодействия i -й и j -й частиц зависят от контактных напряжений и упругости материалов с учетом адгезии [31] определяются как [32]:

$$F_{ij} = K \delta^{3/2} + \alpha \sqrt{K} \delta^{1/4} v,$$

δ – радиус контакта (местное смятие), $K = \frac{\sqrt{\frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}}}{3 \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right)}$, μ_1 и μ_2 – коэффициенты Пуассона, E_1 и E_2 – модули Юнга, α зависит от коэффициента восстановления скорости в результате падения $\psi = \frac{v}{v_0} = 0.69$, где v – скорость до столкновения, v_0 – скорость после восстановления.

Движение воздушного потока реализовано с использованием модели турбулентности RANS $k - \omega$ SST описывается уравнениями для турбулентной кинетической энергии и удельного значения диссипации ω [32]:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_i \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k - \beta^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\eta + \sigma_k \eta_T) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right], \quad (3)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha S^2 - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\eta + \sigma_\omega \eta_T) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, \quad (4)$$

$\eta_T = \frac{\alpha_1 k}{\max(\alpha_1 \omega, S F_2)}$ – кинематическая турбулентная вязкость,

$$F_2 = \tanh \left[\left[\max \left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\eta}{y^2 \omega} \right) \right]^2 \right], \quad P_k = \min \left(\tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j}, 10\beta^* k \omega \right),$$

$$F_1 = \tanh \left\{ \left\{ \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\eta}{y^2 \omega} \right), \frac{4\sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right] \right\}^4 \right\},$$

$$CD_{k\omega} = \max \left(2\rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-10} \right), \quad \varphi = \varphi_1 F_1 + \varphi_2 (1 - F_1), \quad \alpha_1 = \frac{5}{9}, \alpha_2 = 0.44,$$

$$\beta_1 = \frac{3}{40}, \beta_2 = 0.0828, \beta^* = \frac{9}{100}, \sigma_{k1} = 0.85, \sigma_{k2} = 1, \sigma_{\omega 1} = 0.5, \sigma_{\omega 2} = 0.856.$$

При моделировании движения потока частиц у подстилающей поверхности в такой постановке задачи учитывается влияние гидродинамических сил. При этом сами частицы могут менять турбулентные свойства воздушной среды, что, вероятно, влияет на вертикальный подъем пылевого аэрозоля. Важным неучтенным в данной постановке фактором является электризация частиц и подстилающей поверхности. Поэтому далее будет предложен способ учета влияния электрического поля на движение заряженных частиц.

3. Электростатические эффекты

Поток из N_s заряженных сальтирующих частиц получает отрицательный заряд при взаимодействии с подстилающей поверхностью, которая заряжается положительно. Откалывание от сальтирующей частицы пылинок приводит к появлению над подстилающей поверхностью положительно заряженных сальтирующих частиц и отрицательно заряженных пылинок (рис. 1). Сальтирующие частицы могут быть как положительно, так и отрицательно заряженными. Напряжённость электрического поля может достигать 167 кВ/м на высоте 1.7 см [1], а наибольший удельный заряд для сальтирующих частиц соответствует + 60 мкКл/кг [1].

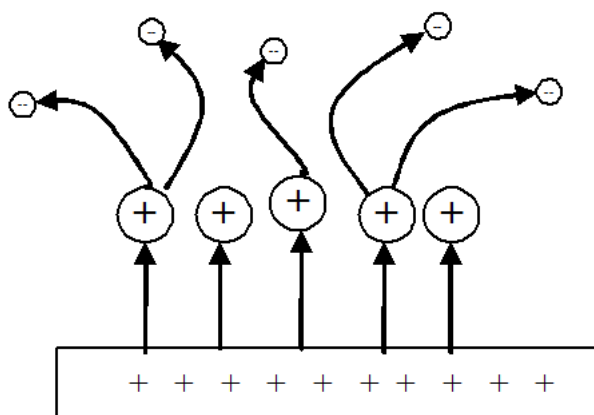


Рис. 1. Положительный заряд на подстилающей поверхности и на крупных частицах.
Fig. 1. Positive charge on the underlying surface and on large particles.

Значения удельных зарядов частиц для всех размеров γ и для крупных частиц γ_+ (табл. 1), которые определены на территории с песчаной подстилающей поверхностью (р. Волга Астраханской области) в [33], имеют меньшие значения (табл. 1.)

Табл. 1. Удельные заряды сальтирующих частиц, измеренных в [33]

Table 1. Specific charges of saltating particles measured in [33]

Временной интервал	Удельные заряды, мкКл/кг	
	γ	γ_+
09:38-13:27	27.0	49.1
14:06-16:00	42.3	52.9
16:26-18:00	28.2	30.7

Предположим, что заряд частиц не столь существен, чтобы обеспечить взаимовлияние в момент кратких подскоков. Тогда эффект от положительно заряженной поверхности получаем двойной. С одной стороны, частицы над подстилающей поверхностью выталкиваются полем, а, с другой, меняются упругие свойства удара в момент падения.

Электрическое поле создает частичный или полный эффект левитации частицы в воздушной среде. Далее приведены выкладки для учета наличия электрического поля за счет поправки на плотность материала частицы.

Траектория сальтирующей частицы имеет горизонтальную и вертикальную составляющие. Баланс вертикальных составляющих сил определяет высоту подъема частицы. Предположим, что на частицу действует сила Стокса $F_S = 6\pi\mu r_p v_p$, μ - динамическая вязкость среды,

V_p - средняя скорость подъема и осаждения частиц, и сила тяжести $F_g = \frac{4}{3}\pi\rho_p r_p^3 g$, где r_p

- радиус частицы. Определим ускорение как

$$a = \frac{9\mu v_p}{2\rho_p r_p^2} - g = a_c - g \quad (5)$$

Аналогично при наличии электрического поля в случае, если на поверхности распределен заряд q , возникает электростатическое поле $E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 h^2}$. Тогда ускорение заряженной

сальтирующей частицы, имеющей заряд, приходящийся на единицу массы частицы, q_m :

$$a_e = \pm \frac{qq_m}{4\epsilon_0 h^2} + a_c - g \quad (6)$$

Влияние на подскоки частиц в гидродинамической модели можно учесть, как относительное изменение плотности частиц, полагая, что под влиянием электрического поля плотность материала частицы оказалась равной ρ'_p , получаем

$$a = \pm \frac{9\mu v_p}{2\rho'_p r_p^2} - g = \frac{qq_m}{4\epsilon_0 h^2} \pm \frac{9\rho v_p}{2\rho_p r_p^2} - g,$$

и может быть внесена такая поправка,

$$\rho'_p = \frac{1}{\frac{qq_m 2r_p^2}{18\mu v_p \epsilon_0 h^2} + \frac{1}{\rho_p}} \quad (7)$$

Второй возможный эффект при условии заряженной поверхности состоит во влиянии дополнительного ускорения под действием электрического поля на вылет частицы после падения и взаимодействия с подстилающей поверхностью (или с другой частицей).

Электрическое поле будет влиять на коэффициент восстановления скорости частицы после удара. Из результатов туннельных экспериментов для сальтирующих частиц среднее значение коэффициента $\psi = 0,69$ [32]. Оценим эффект такого влияния с использованием модели взаимодействия заряженных частиц. Пусть частица массой m движется и в результате удара скорость снижается, тогда изменение импульса

$$\delta p = mv - m\vec{v}_0 = mv_0 \left(\frac{v}{v_0} - 1 \right) = mv_0 (\psi - 1).$$

Выражая силу через изменение импульса как $F = \frac{\Delta p}{\Delta t}$ и используя (3), получаем, что

$$-v_0(\psi' - 1) = \frac{qq_m}{4\varepsilon_0 h^2} \Delta t - v_0(\psi - 1),$$

откуда

$$-v_0\psi\left(\frac{\psi'}{\psi} - 1\right) = \frac{qq_m}{4\varepsilon_0 h^2} \Delta t, \quad (8)$$

Из (7), подставляя (8), получаем

$$\frac{qq_m 2r_p^2}{18\mu v_p \varepsilon_0 h^2} = \frac{1}{\rho'_p} - \frac{1}{\rho_p},$$

откуда

$$v_0\psi\left(\frac{\psi'}{\psi} - 1\right) \frac{4v_0 r_p^2}{9\mu v_p \Delta t} = \frac{1}{\rho_p} - \frac{1}{\rho'_p}.$$

Получаем поправку для коэффициента восстановления скорости:

$$\psi' = \frac{9\mu v_p \Delta t}{4v_0 \psi r_p^2} \frac{1}{v_0 \rho'_p} \left(\frac{\rho'_p}{\rho_p} - 1 \right) + \psi \quad (9)$$

Расчеты по формулам (7) и (9) показывают (рис. 2), что увеличение величины напряженности электрического поля и заряда на частице наибольшее влияние оказывает на плотность частицы, коэффициент восстановления скорости почти не меняется.

В связи с этим в следующем разделе влияние электрического поля учитывается при реализации вычислительного эксперимента постпредством поправок для плотности частиц.

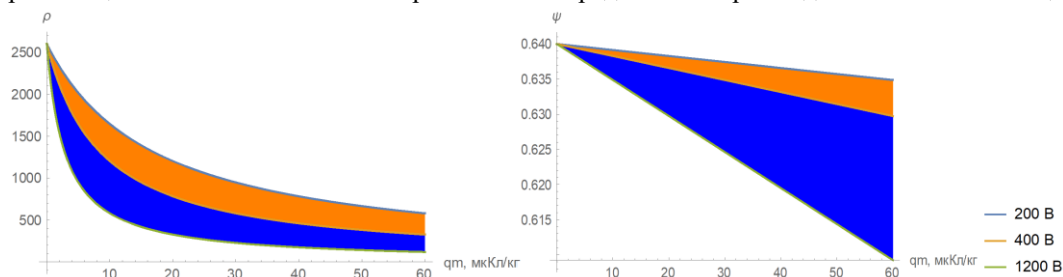


Рис. 2. Изменение плотности частиц в соответствии с (7) (слева) и коэффициента восстановления скорости в соответствии с (9) (справа) при изменении напряженности электрического поля при разных значениях заряда частиц.

Fig. 2. Variation of particle density according to (7) (left) and velocity recovery coefficient according to (9) (right) at change of electric field strength at different values of particle charge.

4. Описание реализации вычислений

Движение воздушного потока с взвешенными в нем и взаимодействующими между собой частицами рассматривалось с использованием Эйлера-Лагранжевой модели и реализовано средствами открытого пакета OpenFoam [14] (решатель DPMFoam, турбулентная $k-\omega$ -модель, см. табл. 2). Движение частиц исследовалось над подстилающей поверхностью с двумя препятствиями по типу ряби. Важной характеристикой, которая проявляется в естественных условиях, – неравномерность (квазипериодичность) потока сальтирующих частиц. Это свойство было выявлено и в вычислительном эксперименте с минимальным интервалом

записи данных 0.005 с. Дополнительно оценивались координаты частиц в трех промежуточных моментах времени с учетом средних скоростей. В результате получено число частиц в выделенной области за препятствием в каждый 0.00125 с момент времени. Определены частоты изменения числа частиц в потоке при наличии двух препятствий, которые меняются в зависимости от геометрии поверхности и параметров турбулентной модели.

Как было предложено выше, для учета действия электрического поля на сальтирующие частицы в первом приближении можно учитывать за счет относительного уменьшения плотности движущихся частиц. Предполагаем наличие небольших значений напряженности электрического поля и соответственно зарядов частиц (рис. 2а), приходящихся на единицу массы. Тогда плотность материала частиц будет меняться в экспериментах от известной величины для песчаных частиц 2600 кг/м³ до 1500 кг/м³ (см. табл. 1). Это допущение не повлияет на горизонтальный перенос и аэродинамические характеристики, так как размеры частиц остаются неизменными.

Табл. 2. Вычислительные параметры
Table 2. Computational parameters

Решатель	DPMFoam
Вычислительная схема	Gause Linear
Число процессоров	128, 256, 384
Размер ячейки сетки	1.5 мм
Число блоков	12
Число ячеек	31 760

Исследуемая область в вычислительном эксперименте, как и в [14], разделена на два подслоя по высоте с соответствующими граничными условиями (рис. 3):

- Inlet_down и outlet_down (0-0.02 м) со средней скоростью, характерной для этой высоты при логарифмическом профиле скорости ветра;
- Inlet_up и outlet_up (0.02-1 м) с логарифмическим профилем скорости ветра, повторяющем контур поверхности.

На поверхности установлено условие прилипания, верхняя граница свободная.

Область задается шестью вертикальными секциями. На расстоянии 0.6 м от левой границы области (первая секция) располагаются два треугольных элемента, имитирующих структуру золотого рельефа высотой 0.02 м. Последняя секция находится в области за элементом. Определяется влияние движущихся частиц на изменение характеристик воздушного потока в области над элементом и за ним. Расстояние от нижнего края структуры до правой границы равно 2.6 м. Размер ячейки расчетной сетки выбран равным 1.5 мм, так как является оптимальным по времени расчета при наличии устойчивого решения.

Облако частиц генерируется у левой границы области. Число частиц задается, исходя из формулы для общего расхода песка для каждой рассматриваемой динамической скорости [10]:

$$Q = c \sqrt{\frac{d}{D}} \frac{\rho_g}{g} u_*^3 \tag{7}$$

$c = 1.5 - 2.8$, $D = 250 \text{ мкм}$, $\rho_g = 1.25 \text{ кг/м}^3$ - плотность воздуха, d - размер частиц,

$\rho_p = 2000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ - плотность частиц с учетом неоднородности формы и материала. В соответствии с (4) для пороговой скорости $u_* = 0.25 \text{ м/с}$ рассчитано число частиц,

генерируемых в единицу времени на левой границе до высоты 20 см, которое соответствует 82 частицам.

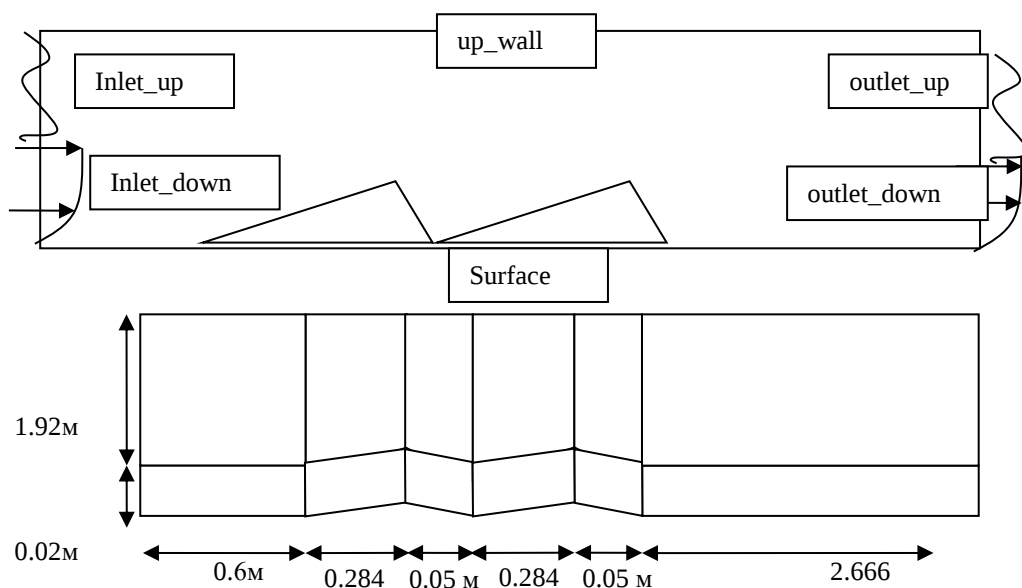


Рис. 3. Схема представления исследуемой области.
Fig. 3. Scheme of representation of the investigated area.

Так как при движении частиц учитывается их взаимодействие друг с другом и с подстилающей поверхностью, в соответствии со справочными данными установлены следующие параметры: $E = 9 \cdot 10^{10}$ Па (9 ГПа) – модуль Юнга, $\mu = 0.35$ – коэффициент Пуассона (отношение величин продольной и поперечной деформаций, $\alpha = 0.12$ – параметр, связанные с коэффициентом восстановления скорости.

Расчеты выполнялись на вычислительном кластере «РСК Торнадо», созданном и установленным специалистами российской группы компаний РСК. Вычислительный кластер содержит управляющий сервер и 8 вычислительных серверов с двумя процессорами AMD EPYC 7742 64-Core - всего 128 вычислительных ядер на каждом сервере, оперативная память каждого сервера 256 Гб. Вычислительные узлы соединены через коммутатор IB Mellanox 100 гбит/сек с поддержкой протокола MPI, имеется дисковое хранилище данных 411 Тбайт. Для расчетов в рамках данной статьи использовались 1-3 вычислительных сервера.

Для анализа использовались условия при значении динамической скорости $u_* = 0.25$ м/с, близкой к граничному значению, при которой возможен отрыв частиц от поверхности. Для таких значений выявлен эффект квазипериодического изменения числа частиц в потоке [34]. На высоте 5-10 см эта скорость по расчетам для логарифмического профиля близка к 2-2.8 м/с. В момент отрыва воздушного потока от точки на вершине золотой структуры, происходит усиление ветра. При этом скорость у поверхности U может достигать больших значений (5 м/с в таблице 3). Скорости у основания или на склоне дюны имеют меньшие значения (2-2.8 м/с в таблице 3). Для этих двух случаев вычисляются значения турбулентной

энергии $k = \frac{3}{2}(UI)^2$, где I – интенсивность турбулентности ($I=0.1$), величина удельной

диссипации турбулентной энергии рассчитывалась как $\omega = C_{\mu}^{\frac{3}{4}} \frac{k^{\frac{1}{2}}}{l}$, $C_{\mu} = 0.013$, l – масштаб.

Табл.3. Схема изменения параметров в вычислительном эксперименте
Table.3. Scheme of parameter changes in the computational experiment

Тип параметров среды	q_m , мкКл/кг	ρ'_p , кг/м ³	l , м	U , м/с	k , м ² ·с ⁻²	ω , с ⁻¹	u^* , м/с
1	0	2600	2	5	0.38	55	0.25
	+2	2000					
	+4	1800					
	+6	1500					
2	0	2600	2	2.8	0.14	44	0.25
	+2	2000					
	+4	1800					
	+6	1500					

В следующем разделе приведены результаты тестирования переложенных поправок для вычислительной модели.

5. Результаты моделирования

Различные запуски вычислительного эксперимента указывают на соответствие поведения потока частиц реальным данным [35]. Высота подскоков частиц достигает 10 см, скорости движения частиц достигают 5 м/с (рис. 4). Профили скорости воздушного потока (рис. 5) отклоняются под влиянием движущихся частиц от логарифмического, как это показано в [36]. Частоты вариации числа частиц в потоке дают для спектральных функций всплески при значениях 7-12 и 160-190 Гц (рис. 6), близкие к наблюдаемым в экспериментах характерным частотам [34, 37].

Для четырех экспериментов с различными плотностями материала частиц (2600 – исходная плотность, 2000, 1800 и 1500 кг/м³) при различных значениях скорости воздушного потока у поверхности выявлено, что при уменьшении плотности частиц (изменении электрического поля и заряда частицы) происходят изменения следующих параметров:

- дольше сохраняется возмущающее воздействие на среду (на более дальнем расстоянии за препятствием частицы влияют на локальное изменение турбулентной энергии) (рис. 7);
- уменьшается (для случая $k=0.38 \text{ м}^2\text{с}^{-2}$) и увеличивается (для случая $k=0.14 \text{ м}^2\text{с}^{-2}$) значение дисперсии скоростей движения сальтирующих частиц (рис. 4 а, b);
- увеличивается разброс высоты подскоков частиц (рис. 4 с, d)
- уменьшается нижнее (для случая $k=0.38 \text{ м}^2\text{с}^{-2}$) и увеличивается верхнее (для случая $k=0.14 \text{ м}^2\text{с}^{-2}$) значение характерных частот (рис. 6) изменения числа частиц в потоке (увеличивается период между двумя зонами максимального воздействия движущегося потока частиц на воздушную среду).

6. Заключение

Движение под влиянием ветра песчаных частиц в результате сальтаций (подскоки) до высоты нескольких сантиметров над подстилающей поверхностью в условиях незакрепленных песков исследовано в вычислительном эксперименте средствами открытого пакета

OpenFOAM. Предложено учитывать наличие электрического заряда на частицах и поверхности с использованием параметрической модели.

Оценено влияние на динамику движения частиц в гидродинамическом потоке. В статье предлагается параметрическая модель, позволяющая численном эксперименте учитывать влияние заряда частиц и наличие электрического поля.

Так как важной характеристикой для потока сальтирующих частиц в естественных условиях является его квазипериодичность, движение рассмотрено при наличии двух препятствий, подобных яби.

Движение частицы с удельным зарядом 10 мкКл/кг в поле 400 В можно рассматривать с заменой плотности ее материала на 1800 кг/м^3 .

Движение воздушного потока с взвешенными в нем и взаимодействующими между собой частицами исследовалось с использованием Эйлераво-Лагранжевой модели с учетом соображений о влиянии зарядов на частицах и поверхности.

При учете влияния электростатических эффектов выявлено усиление возмущающего воздействия на среду частиц, вылетающих после препятствий. В зависимости от значения турбулентной энергии уменьшается или увеличивается дисперсия скоростей движения сальтирующих частиц, увеличивается разброс высоты подскоков, что подтверждается известными экспериментами. В зависимости от значения турбулентной энергии уменьшается нижнее или увеличивается верхнее значение характерных частот изменения числа частиц в потоке.

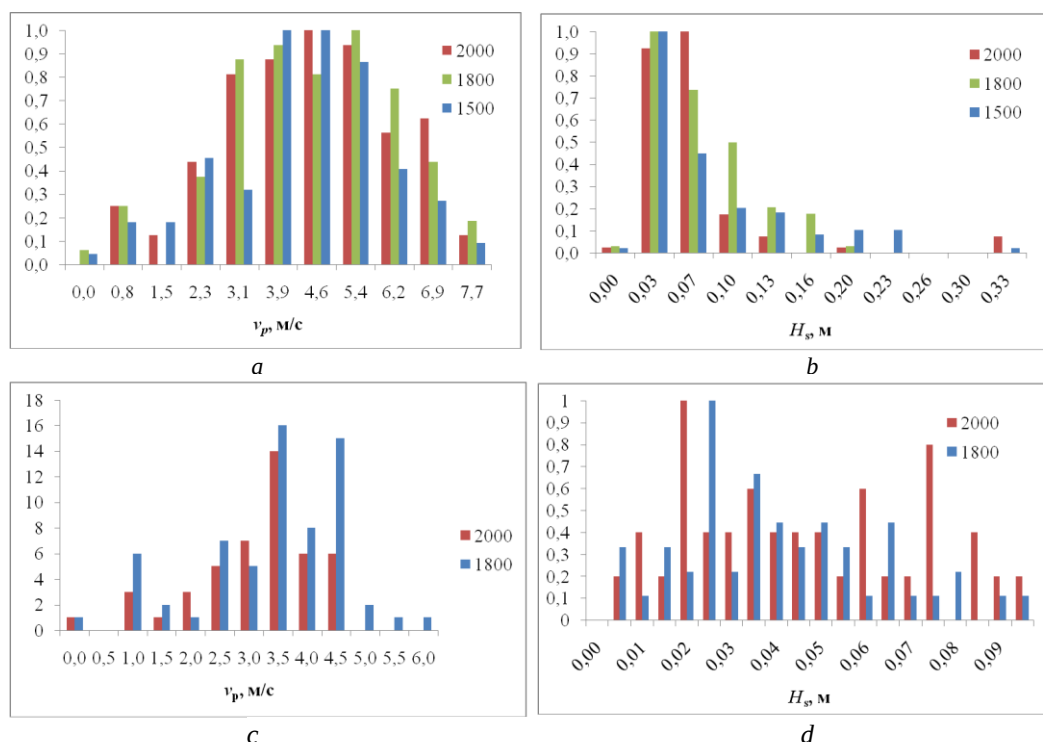


Рис. 4. Плотности вероятности для скоростей движения частиц (а – для типа параметров среды 1, б – для типа параметров среды 2) и высоты расположения (с – для типа параметров среды 1, д – для типа параметров среды 2).

Fig. 4. Probability densities for particle velocities (a – for type of medium parameters 1, b – for type of medium parameters 2) and height of location (c – for type of medium parameters 1, d – for type of medium parameters 2).

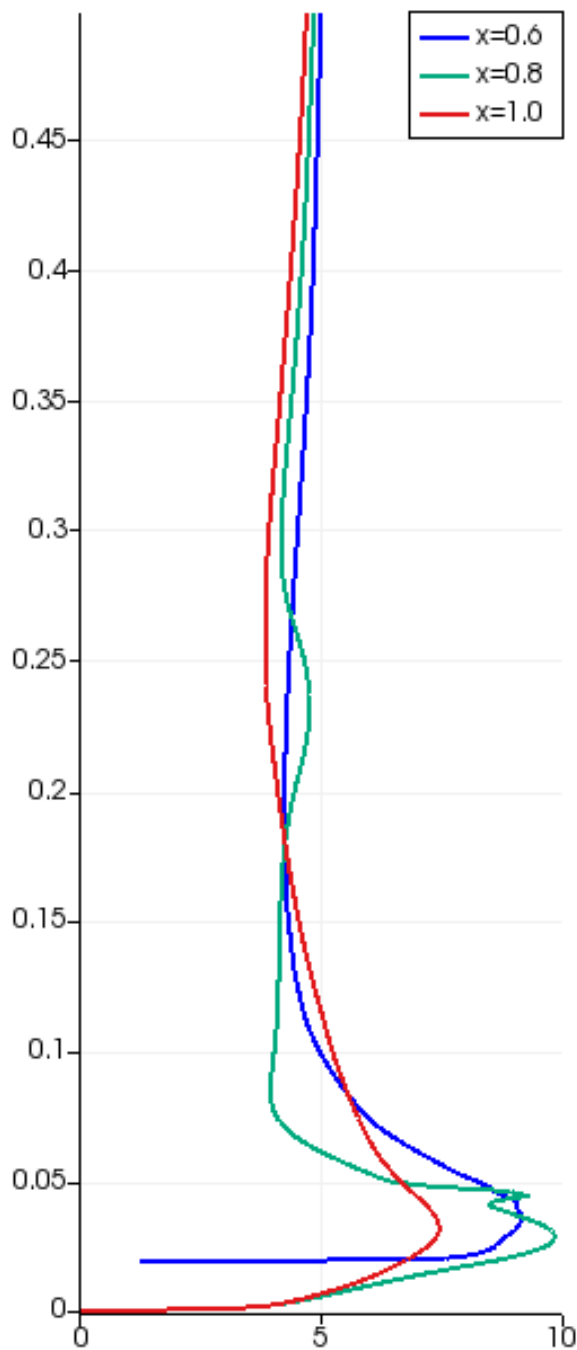


Рис. 5. Характерный профиль скорости воздушного потока под влиянием частиц у поверхности до высоты 0.5 м.
Fig. 5. Characteristic profile of air velocity under the influence of particles near the surface up to a height of 0.5 m.

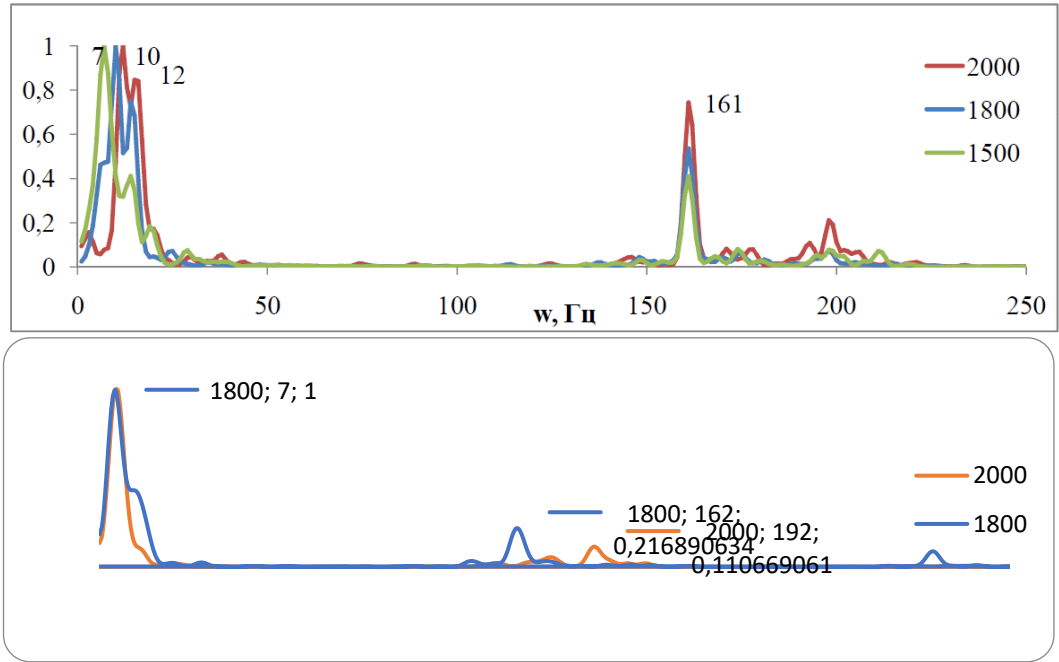


Рис. 6. Спектральные плотности для трех экспериментов с различной плотностью частиц.
Fig. 6. Spectral density functions for three experiments with different particle densities.

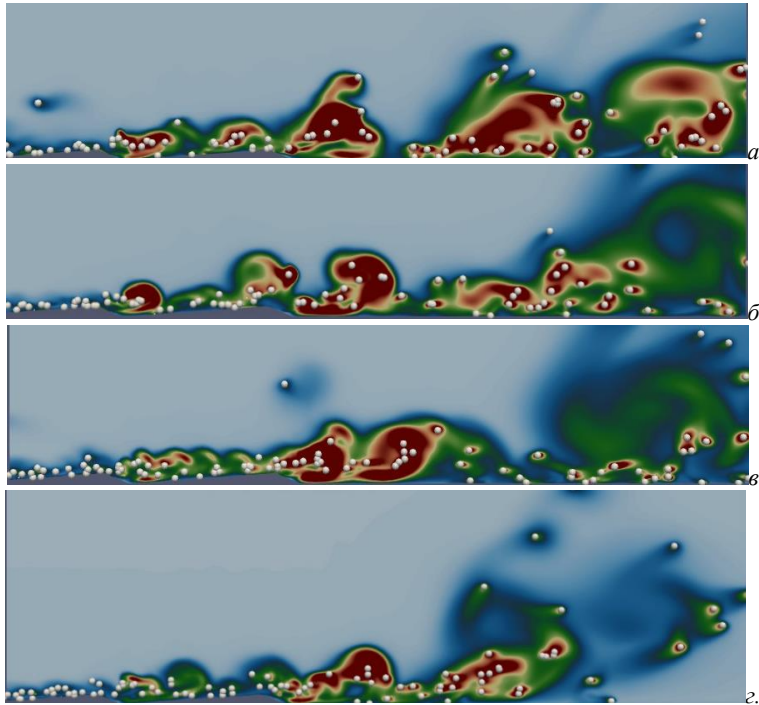


Рис. 7. Движение частиц в потоке над подстилающей поверхностью для плотностей частиц
а – 1500, б – 1800, в – 2000, г – 2600 кг/м³.

Fig.7. Movement of particles in the flow above the underlying surface for particle densities
a - 1500, b - 1800, c - 2000, d -2600 kg/m3

Список литературы

- [1] Schmidt D.S., Schmidt R.A., Dent J.D. Electrostatic force on saltating sand. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 103(D8), 1998. p. 8997-9001.
- [2] Kok J.F., Lacks D.J. Electrification of granular systems of identical insulators. *Physical Review E*, V. 79(5), 1998, pp. 051304.
- [3] Бютнер Э.К. Динамика приповерхностного слоя воздуха. Л.: Гидрометиздат, 1978. с. 156.
- [4] Anderson R. S., Hallet B. Sediment transport by wind: toward a general model. *Geological Society of America Bulletin*, 97(5), 1986, pp. 523-535.
- [5] Dey S., Ali S. Z. Advances in modeling of bed particle entrainment sheared by turbulent flow. *Physics of Fluids*, 30(6), 2018, pp. 061301.
- [6] Huang G. et al. Large-Eddy Simulation of Erosion and Deposition over Multiple Two-Dimensional Gaussian Hills in a Turbulent Boundary Layer. *Boundary-Layer Meteorology*, 2019, pp. 1-30.
- [7] Малиновская Е.А. Модель отрыва песчаной частицы ветром. *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*, 2017, 53(5), с.588-596.
- [8] Семенов О.Е. Введение в экспериментальную метеорологию и климатологию песчаных бурь. Алматы, 2011, 580 с.
- [9] Чхетиани О. Г. , Калашник М. В., Ингель Л. Х. Генерация “теплового ветра” над неоднородно нагретой волнистой поверхностью. *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*, 49(2), 2013, с. 137–143
- [10] Shao Y. *Physics and modeling of wind erosion*. Springer Science & Business Media, 2008, 452 p.
- [11] Rasmussen K. R., Kok J. F., Merrison J. P. Enhancement in wind-driven sand transport by electric fields. *Planetary and Space Science*, 57(7), 2009, pp. 804-808.
- [12] Esposito F. et al. The role of the atmospheric electric field in the dust-lifting process. *Geophysical Research Letters*, 43(10), 2016, pp. 5501-5508
- [13] Малиновская Е. А. и др. О связи приземного электрического поля и аридного аэрозоля при различных ветровых условиях. *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*, 502(2), 2022, с. 115-124.
- [14] Malinovskaya E.A., Gorchakov G.I., Karpov A.V., Maksimenkov L.O., Datsenko O.I. On the conditions of the emergence of a periodic mode of saltating flow. *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*, 2023 (in press).
- [15] Tong D., Huang N. Numerical simulation of saltating particles in atmospheric boundary layer over flat bed and sand ripples. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(16), 2012
- [16] Huang G. et al. Large-eddy simulation of erosion and deposition over multiple two-dimensional gaussian hills in a turbulent boundary layer. *Boundary-Layer Meteorology*, 173, 2019, pp. 193-222.
- [17] Gu Z. et al. Numerical simulation of dust lifting within dust devils—Simulation of an intense vortex. *Journal of the atmospheric sciences*, 63(10), 2006, pp. 2630-2641.
- [18] Дерябина М.С., Мартынов С.И. Моделирование течения вязкой жидкости с частицами через ячейки пористой среды. *Вычисл. мех. сплош. сред*, 9(4), 2016, pp. 420-429. <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2016.9.4.35>
- [19] Мартынов С.И., Ткач Л.Ю. Динамика цепочечных агрегатов частиц в потоке вязкой жидкости. *Ж. вычисл. матем. и матем. физ.*, 56(5), 2016, с. 840-855. <https://doi.org/10.7868/S004446691605015X>
- [20] Dupont S., Berqametti G., Simeons S. Modeling aeolian erosion in presence of vegetation. *J. Geophys. Res. Earth Surface*, 119, 2014, pp. 168-187.
- [21] Araújo A.D., Parteli E.J.R., Pöschel T., Andrade J.S., Herrmann H.J. Numerical modeling of the wind flow over a transverse dune. *Scientific reports*. 3, 2013, pp. 2858.
- [22] Dey S., Ali S.Z. Advances in modeling of bed particle entrainment sheared by turbulent flow. *Phys. Fluid*, 30, 2018, pp. 061301.
- [23] Siminovich A., Elperin T., Kutra I., Kok J.F., Sullivan R., Silvestro S., Yizhaq H. Numerical study of shear stress distribution over sand ripples under terrestrial and Martian conditions. *J. Geophys. Res. Planets*, 124, 2019, pp. 175-185.
- [24] 10The OpenFOAM® Foundation. <http://www.openfoam.org/index.php>
- [25] Michelsen B., Strobl S., Parteli E.J.R., Pöschel T. Two-dimensional airflow modeling underpredicts the wind velocity over dunes. *Scientific reports*, 5. 2015, pp 16572. <https://doi.org/10.1038/srep16572>
- [26] Ali M.S.M., Salim S.A.Z.S., Ismail M.H., Muhamad S., Mahzan M.I. Aeolian tones radiated from flow over bluff bodies // *Open Mech. Eng. J.*, 7, 2013, pp. 48-57. <https://doi.org/10.2174/1874155X01307010048>

- [27] Gu.J. Numerical modeling of the wind flow over a transverse dune. Scientific reports, 3. 2013, pp.2858.
- [28] Malinovskaya E. A., Chkhetiani O. G. On Conditions for the Wind Removal of Soil Particles. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 62(7), 2021, pp. 1117-1131.
- [29] Malinovskaya E.A. Simulation of the flow around 3D surfaces in the study of changes in aeolian relief forms. *International Young Scientists School and Conference on Computational Information Technologies for Environmental Sciences CITES '2019*, 2019, p.192-195.
- [30] Malinovskaya E. A., Chkhetiani O. G. Modeling of near-surface flows over an aeolian relief. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, 386(1), 2019, pp. 012030.
- [31] Попов В.Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. От нанотрибологии до динамики землетрясений. Москва: Издательство Физматлит, 2013, с.213
- [32] Tsuji Y., Tanaka T., Ishida T. Lagrangian numerical simulation of plug flow of cohesionless particles in a horizontal pipe. *Powder technology*, 71(3), 1992, 239-250.
- [33] Горчаков Г. И. и др. Удельный заряд сальтирующих песчинок на опустыненных территориях. *Доклады Академии наук*, 456(4), 2014, с. 476-476.
- [34] Gorchakov G. I. et al. Quasiperiodic saltation in the windsand flux over desertified areas. *Atmospheric and oceanic optics*, 29, 2016, 501-506.
- [35] Anderson R. S., Hallet B. Sediment transport by wind: toward a general model. *Geological Society of America Bulletin*. 97(5), 1986, C. 523-535.
- [36] Almeida M. P., Andrade Jr J. S., Herrmann H. J. Aeolian transport layer. *Physical review letters*. 2006, 96(1), 018001.
- [37] Malinovskaya E.A., Gorchakova G.I., Karpov A. V., Maksimenkov L.O., Datsenko O.I. On the Conditions of the Emergence of a Periodic Mode of Saltating Flow. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2023, 59(6), 749–759.

Информация об авторах / Information about authors

Елена Александровна МАЛИНОВСКАЯ – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории геофизической гидродинамики Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН с 2018 г. Сфера научных интересов: исследование динамических и обменных процессов на границе раздела атмосфера – подстилающая поверхность, математическое и численное моделирование ветрового и вихревого выноса минеральных аэрозолей.

Elena Aleksandrovna MALINOVSKAYA – Cand. Sci. (Phys.-Math.), researcher at the Laboratory of Geophysical Hydrodynamics at the A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences since 2018. Research interests: study of dynamic and exchange processes at the interface between the atmosphere and the underlying surface, mathematical and numerical modeling of the wind removal of mineral aerosols.

Геннадий Ильич ГОРЧАКОВ – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией Оптики и микрофизики аэрозоля с 1985 года. Сфера научных интересов: физика атмосферы, оптика атмосферы, атмосферный аэрозоль, атмосферное электричество, атмосферная экология.

Gennady Ilyich GORCHAKOV – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Head of the Laboratory of Optics and Aerosol Microphysics since 1985. Area of scientific interests: atmospheric physics, atmospheric optics, atmospheric aerosol, atmospheric electricity, atmospheric ecology.

Алексей Владимирович КАРПОВ – старший научный сотрудник с 2017 года. Сфера научных интересов: атмосферный аэрозоль, малые газовые примеси, радиационные эффекты аэрозоля, генерация аэрозоля на опустыненных территориях.

Alexey Vladimirovich KARPOV – senior researcher since 2017. Area of scientific interests: atmospheric aerosol, trace gases, radiation effects of aerosol, aerosol generation in deserted areas.

Леонид Олегович МАКСИМЕНКОВ – научный сотрудник лаборатории моделирования атмосферного переноса ИФА РАН с 2021 года. Сфера научных интересов: Математическое моделирование, численные методы, программная обработка данных.

Leonid Olegovich MAKSIMENKOV – researcher in the laboratory of atmospheric transfer modelling IAP RAS from 2021. Research interests: Mathematical modelling, numerical methods, software data processing.

Олег Игоревич ДАЦЕНКО – младший научный сотрудник с 2022 года. Сфера научных интересов: ветропесчаный поток, естественные и антропогенные аэрозоли, загрязнение атмосферы, пространственно-временная изменчивость аэрозоля.

Oleg Igorevich DATSENKO - junior researcher since 2022. Area of scientific interests: wind-sand flux, natural and anthropogenic aerosols, atmospheric pollution, spatiotemporal variability.