

DOI: 10.15514/ISPRAS-2019-31(5)-15



Исследование условий возникновения эолова микрорельефа

Е.А.Малиновская, ORCID: 0000-0003-0385-0396 <elen_am@inbox.ru>

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

Аннотация. Возможности численного моделирования движения гидродинамических потоков около объектов сложной формы позволяют рассматривать результаты вычислений, как один из способов понимания механизмов ветрового выноса песчаных частиц. Для исследования условий возникновения микрорельефа проводится ряд численных экспериментов с использованием открытого пакета Open OpenFOAM. Над неоднородностями поверхности, определяемыми особенностями взаимного расположения частиц, возникают области понижения давления, вблизи которых более вероятен ветровой вынос частиц. Причиной такого понижения давления являются различного рода разрежения структуры пространственного расположения элементов поверхности: изменение расстояния, изменение ориентации структуры в пространстве, изменение угла между плоскостями, содержащими частицы. За счет понижения давления происходит увеличение скорости воздушного потока у поверхности и возникновение микровихрей.

Ключевые слова: микрофизика ветрового выноса частиц; численное моделирование обтекания объектов сложной формы.

Для цитирования: Малиновская Е.А. Исследование условий возникновения эолова микрорельефа. Труды ИСП РАН, том 31, вып. 6, 2019 г., стр. 225-236. DOI: 10.15514/ISPRAS-2019-31(6)-15

Благодарности: Автор выражает благодарность О.Г. Чхетиани за полезные консультации и обсуждения, М.В. Крапошину, С.В. Стрижаку за помощь в освоении принципов работы с OpenFoam. Исследование выполнено при частичной поддержке программы Президиума РАН №12 (проект КР19-270).

Study of the conditions for the occurrence of aeolian microrelief

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

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

Abstract. The possibilities of numerical modeling of the motion of hydrodynamic flows around objects of complex shape allow us to consider the results of calculations as one of the ways to understand the mechanisms of wind removal of sand particles. To study the conditions for the occurrence of microrelief, a number of numerical experiments are carried out using the open package OpenFOAM. Over inhomogeneities of the surface, determined by the features of the mutual arrangement of particles, there are areas of pressure reduction, near which the wind removal of particles is more likely. The reason for this decrease in pressure is a different kind of rarefaction of the spatial arrangement of surface elements: a change in distance, a change in the orientation of the structure in space, a change in the angle between planes containing particles. Due to the decrease in pressure, an increase in the air velocity at the surface and the occurrence of microvortices occur.

Keywords: microphysics of wind removal of particles, numerical simulation of flow around complex objects

For citation: Malinovskaya E.A. Study of the conditions for the occurrence of aeolian microrelief. Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS, vol. 31, issue 6, 2019. pp. 225-236 (in Russian). DOI: 10.15514/ISPRAS-2019-31(6)-15

Acknowledgements. The author is grateful to O.G. Chkhetiani for useful consultations and discussions, M.V. Kraposhin, S.V. Strizhak for help in learning the principles of working with OpenFoam. The study was partially supported by the program of the Presidium of the Russian Academy of Sciences No. 12 (project KP19-270).

1. Введение

Аридные территории являются источниками минерального аэрозоля, выносимого под воздействием ветра с подстилающей поверхности. Оценки интенсивности выноса возможны с использованием моделей переноса пыли [1]. Многие стороны механизма ветрового выноса аэрозоля, несмотря на уже довольно продолжительную историю этого вопроса, остаются недостаточно изученными и являются предметом интенсивных исследований [2-8]. Одной из важных характеристик процесса ветрового выноса пылевых и песчаных частиц является критическая или пороговая скорость ветра – та скорость воздушного потока над подстилающей поверхностью, при которой возможен отрыв частицы от поверхности [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13]. Подвижность частиц на поверхности приводит к возмущениям воздушной среды [14, 15, 16]. Мгновенные скорости потока влияют на реализацию того или иного типа движения частицы: перекачивание, смещение, подъем [17]. Это приводит к изменению локальных характеристик поверхности и формированию на микромасштабах вторичных течений – типа струй и вихрей с вертикальной и горизонтальной осью [18]. При интенсификации турбулентности с увеличением скорости ветра и нагреве поверхности возникают вертикальные потоки и вихри, сообщающие больший импульс частицам, достаточный для их подъема на большую высоту. Наиболее активен вынос на тех участках, где происходит формирование барханов и движение песков [1]. Устойчивость частиц песка к воздействию воздушного потока определяется местом их отложения на эоловой структуре [19], что связано с особенностями обтекания и микрофизики их выноса с поверхности [17].

Песчаные частицы при различных расстояниях между ними частично или полностью погружены в ламинарный подслои [2], что влияет на шероховатость. Параметр шероховатости z_0 и коэффициент сопротивления C_f связаны между собой, так как z_0 зависит от величины динамической скорости u_* [5]. Для задачи обтекания кубиков, распределенных на поверхности, определено возрастание коэффициента сопротивления в зависимости от плотности покрытия, что объясняется наличием вторичных турбулентных потоков [20]. Изменение шероховатости в виде наличия частиц различного размера влияет на профили скорости ветра, потоки частиц, выносимые ветром [21]. В [22] на основе модели и спутниковых данных о рельефе нескольких эоловых структур для области наветренного склона увеличение динамической скорости при движении вверх от подножья до вершины составляет 0,015 м/с для эоловых структур высотой порядка 10 м, 0,02 м/с для 70 м, 0,17 м/с, если выше 80 м. Соответственно, параметр шероховатости и сопротивление возрастают при приближении к вершине. При этом на вершине эоловой структуры отмечается устойчивость к воздействию ветра [19]. За вершиной при изменении наклона плоскости поверхности ближе к подветренному склону расположена область струйного усиления ветра. Неоднородности на поверхности являются теми областями, в которых наблюдаются более активные изменения структуры самой поверхности при ветровом выносе. Результаты предварительного моделирования при

реализации различных условий необходимы для проведения натурных или лабораторных экспериментов.

2. Исходные данные численной модели обтекания поверхности

Область обтекающей среды представлена объемом параллелепипеда высотой 2000 мкм и длиной граней основания 5000 мкм. Высота выбрана таким образом, чтобы учесть характерную, известную из экспериментов, скорость воздушного потока над поверхностью [13]. В табл. 1 приведены оценки скорости воздушного потока на высоте ниже 1 мм [13]. Значение высоты 0,5 мм, считая профиль скорости линейным, определена скорость выше верхней кромки частиц в средней части параллелепипеда, 0,7 мм – это высота объема параллелепипеда, внутри которого будут имитироваться движения воздуха около частиц на поверхности.

Табл. 1. Оценка скорости воздушного потока около частиц
Table 1. Estimation of air velocity near particles

Высота над поверхностью, мм	Скорость воздушного потока, м/с		
	над склоном	за гребнем	на дне
Динамическая скорость, u_* , м/с	0,24	0,32	0,31
0,5	2,8	1,2	2,1
0,3	2,1	1,5	0,8

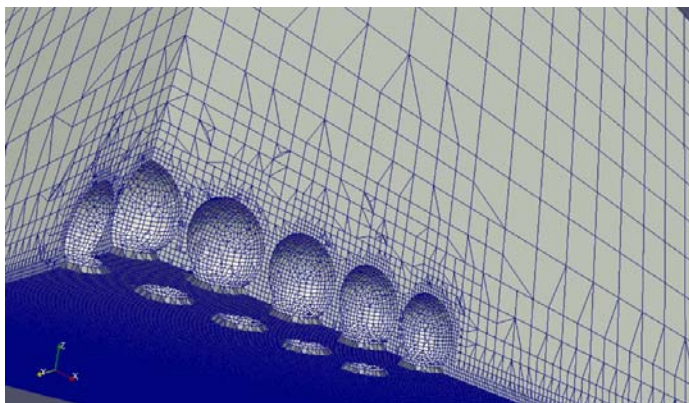


Рис. 1. Адаптивная разностная схема
Fig. 1. Adaptive difference scheme

Поперечные и вертикальные размеры расчетной области выбраны так, чтобы исключить эффекты влияния граничных условий. При этом следует вспомнить, что средний размер песчаной частицы 200 мкм. Таким образом, если в длину расположить 10 частиц такого размера в центральной области, до левой или правой границ области останется более 1000 мкм. Так как воздушный поток у поверхности движется в целом горизонтально, область разбита на два слоя по 1000 мкм. В верхнем слое задается поток с характерным для этой высоты значением скорости [13]. В нижнем слое на левой и правой стенках свободный поток с нулевым градиентом, как и на верхней стенке. На нижней стенке и для всех элементов поверхности, представляющих собой модели частиц, использованы условия прилипания.

В связи с тем, что поверхность имеет сложную форму, используется утилита snappyHexMesh, доступная в открытом пакете OpenFOAM [23], для послойного представления сетки с адаптацией под форму поверхности с минимальным размером шага сетки 5 мкм (рис. 1). Элементы, моделирующие частицы, представляют собой поверхность, состоящие из сфер, присоединенные к цилиндрам с целью минимизации проблем с расхождением ошибок в геометрии и расчетной сетки в областях контактов. Частицы объединены в блоки по 9 элементов (рис.2а), из которых строится поверхность с различной ориентацией в пространстве (рис. 2б, 2с). Проводится исследование влияния неоднородностей структуры поверхности (наличие неодинаковых расстояний между частицами) при различном взаимном расположении и наличии изменений в расстояниях между ними (рис. 2д, 2е) на характер обтекания и изменение подъемной силы. Расстояние между поверхностями взаимодействующих частиц в слое на одном уровне $D: D \approx (0.07 - 0.11)d$: (d – средний размер частиц песка) определено с использованием расчетного оценочного значения порозности, близкого к наблюдаемому в природе [23].

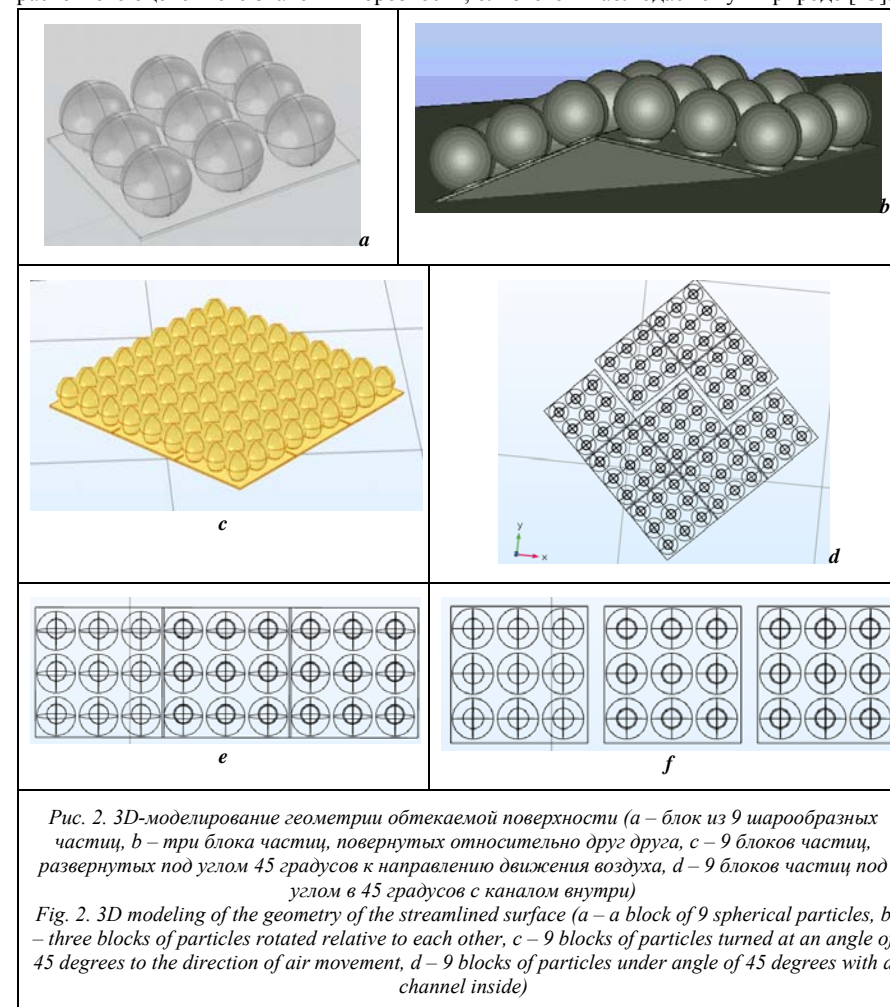


Рис. 2. 3D-моделирование геометрии обтекаемой поверхности (а – блок из 9 шарообразных частиц, б – три блока частиц, повернутых относительно друг друга, с – 9 блоков частиц, развернутых под углом 45 градусов к направлению движения воздуха, д – 9 блоков частиц под углом в 45 градусов с каналом внутри)
Fig. 2. 3D modeling of the geometry of the streamlined surface (a – a block of 9 spherical particles, b – three blocks of particles rotated relative to each other, c – 9 blocks of particles turned at an angle of 45 degrees to the direction of air movement, d – 9 blocks of particles under angle of 45 degrees with a channel inside)

Первоначальный захват сопровождается периодами покоя при скоростях воздушного потока, близких к пороговому значению [15], и активизируется при усилении турбулентного режима потока. При этом исходно ламинарный подслой становится турбулентным за счет движущихся по поверхности частиц [15]. В связи с этим в настоящем исследовании моделируется возможность ветрового выноса без участия частиц, поднятых в воздух, и учета их подвижности. Для анализа влияния особенностей структуры поверхности на характеристики ветрового выноса взята турбулентная $k - \epsilon$ модель обтекания частиц. В качестве исходных параметров используются: кинетическая энергия турбулентного перемешивания $k = \frac{3}{2}(u_{ref}T_i)^2$, скорость потока u_{ref} , интенсивность турбулентности T_i , $\epsilon = 0.09^{3/4} \frac{k^{3/2}}{l}$, $l = 0.07L$. Для указанных условий принималось, что размер обтекаемых частиц определяет параметр $L=200$ мкм, $u_{ref} = 0.8$ м/с, так как предполагается линейный профиль скорости ветра в нижней области, а скорость в верхней области задается равной 2,8 м/с. Предложенная постановка задачи используется для исследования влияния особенностей структуры поверхности на характер обтекания и усиление турбулентного режима у поверхности на уровне микропроцессов.

2. Выбор решателей и устойчивость решений

Численное моделирование процесса обтекания частиц, лежащих на поверхности, реализовано средствами открытого пакета OpenFOAM [24]. Для турбулентного несжимаемого потока в качестве вариантов решателя выбран SimpleFOAM. В SimpleFOAM используется полуявный метод для уравнений, связанных с давлением, и заменяет PISOFOAM в качестве нестационарного несжимаемого решателя потока RANS Flow. С учетом рекомендаций в [25], было принято решение использовать решатели SimpleFOAM в связке с PimpleFOAM. SimpleFOAM применяется для того, чтобы подобрать параметры, при которых получается устойчивое решение. PimpleFOAM показывает хорошую устойчивость, однако требует много времени на одно решение, и по этому направлению еще ведутся расчеты. Поэтому далее будут обсуждаться результаты, полученные с использованием решателя SimpleFOAM.

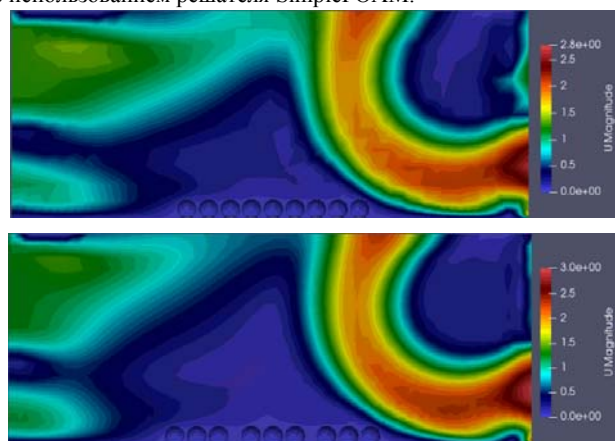


Рис. 3. Скорости обтекаемого потока вблизи поверхности для двух реализаций: без расстояний между блоками частиц (верхний рисунок) и с расстоянием 100 мкм (нижний рисунок)
Fig. 3. Flow velocities near the surface for two realizations: without distances between blocks of particles (upper figure) and with a distance of 100 μm (lower figure)

3. Влияние изменений однородности структуры поверхности на режим обтекания

Изменение расстояния между блоками частиц на 50, 100 и 150 мкм при прямой ориентации частиц по направлению к потоку не меняет структуры потока в целом. Около частиц происходит замедление потока, за областью их расположения – ускорение (рис.3). Однородности, реализованные увеличением расстояния между блоками, ускоряют поток, а также способствуют его закручиванию (рис.4), появляются области понижения давления над поверхностью (рис.5). Вблизи области неоднородности давление уменьшается в среднем на $1 \frac{M^2}{C^2}$ на 500 мкм, над структурной неоднородностью поверхности возникает область пониженного давления, отмечается закручивание потока (рис.4).

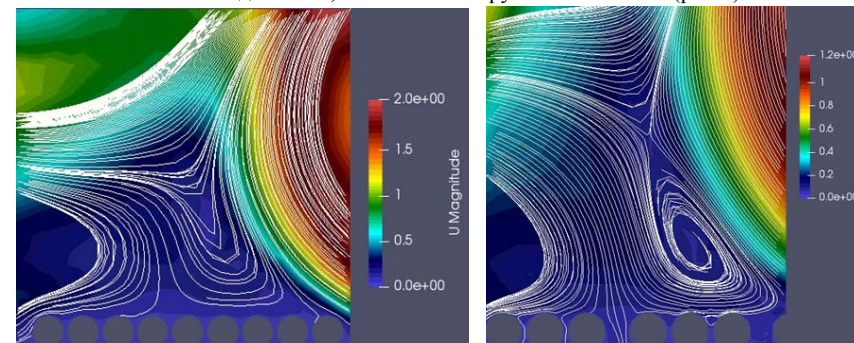


Рис. 4. Линии тока вблизи поверхности для двух реализаций: без расстояний между блоками частиц (верхний рисунок) и с расстоянием 100 мкм (нижний рисунок)
Fig. 4. Current lines near the surface for two realizations: without distances between blocks of particles (upper figure) and with a distance of 100 μm (lower figure)

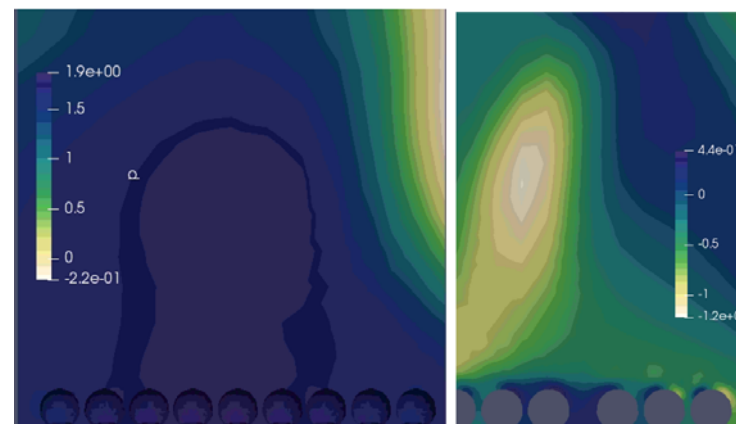


Рис. 5. Увеличение разности давления при обтекании частиц для двух реализаций: без расстояний между блоками частиц (рисунок слева) и с расстоянием 100 мкм (рисунок справа)
Fig. 5. The increase in the pressure difference in the flow around particles for two realizations: without distances between the blocks of particles (figure on the left) and with a distance of 100 μm (figure on the right)

Изменение ориентации структуры связанных частиц при повороте блока вокруг вертикальной оси (рис.2в) можно определить, как изменение расстояний между их поверхностями вдоль оси по направлению движения воздушного потока. Расстояние между частицами влияет величину разности давлений под частицей и над ней [17]. В данном случае расстояние увеличивается в 1,4 раза. Если для малых расстояний при прямой ориентации блока частицы придавливаются к поверхности (рис.5), то при развороте в 45 градусов отмечаем области с выталкивающей силой, за счет разности давления над частицей и под ней возможен ее отрыв от поверхности (рис. 6).

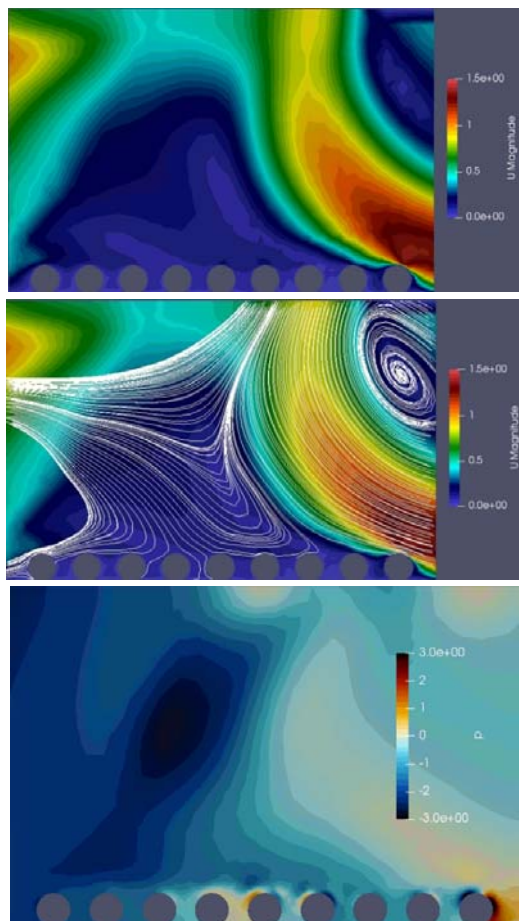


Рис. 6. Увеличение разности давления при обтекании частиц с различными типами неоднородных элементов структуры
 Fig. 6. The increase in pressure difference when flowing around particles with various types of heterogeneous structural elements

При изменении расстояний между отдельными частицами наблюдается похожий эффект для центральных частиц (рис. 5). В этом также возникает область пониженного давления над поверхностью, отмечается закручивание потока.

При обтекании частиц, собранных на двух блоках, плоскости которых наклонены друг к другу под углом (рис. 7), наибольшее значение давления отмечаем на вершине структуры, что приводит к возникновению горизонтальной разности давлений, разбрасывающей частиц в разные стороны, что характерно для однородной структуры. Над подветренной частью такой структуры появляется микровихрь.

Следует отметить, что наиболее интересными оказываются области между центральными частицами однородной структуры для блоков, развернутых под углом 45 градусов, и в областях неоднородности. В связи с этим далее будет приведен краткий анализ параметров, вычисляемых для этих случаев.

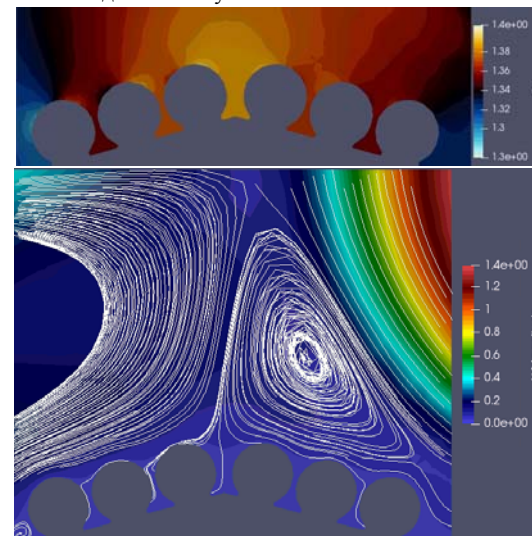


Рис 7. Изменение давления и скорости потока при обтекании частиц при взаимодействии двух наклоненных поверхностей, содержащих частицы
 Fig. 7. Change in pressure and flow rate during particle flow when there is the interaction of two inclined surfaces containing particles

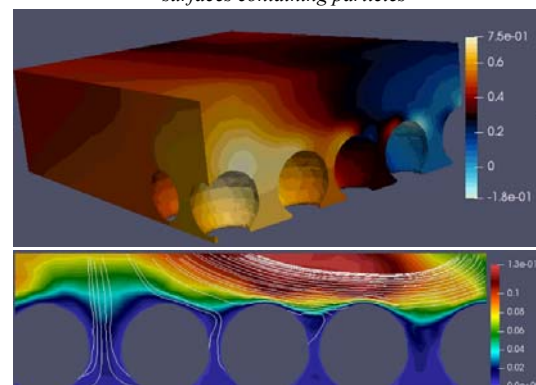


Рис. 8. Увеличение разности давления и линии тока около области неоднородности при обтекании частиц с различными типами неоднородных элементов структуры
 Fig. 8. The increase in the difference in pressure and streamline near the region of inhomogeneity when flowing around particles with various types of inhomogeneous structural elements

4. Условия возникновения эолового микрорельефа при постоянном ветровом воздействии

На обтекание поверхности, состоящей из частиц, существенным образом влияют на величину выталкивающей из слоя силы неоднородности поверхности, возникающие за счет изменения расстояния между отдельными частицами, равномерности или неравномерности их распределения на поверхности, а также неровностей за счет изменений углов наклона плоскостей по отношению к направлению движения воздушного потока.

Для определения влияния неоднородностей рассматривался сценарий изменения расстояний между двумя блоками частиц. В частности, для случая, когда расстояние равно 100 мкм (рис.8) отмечаем изменение разности давлений в зависимости от положения частицы относительно области неоднородности. Для удобства пронумеруем области между частицами от 1 до 4 слева направо. Отмечаем, что в первой области скорость воздушного потока больше, за счет чего увеличивается в последующих двух областях давление.

Табл. 2. Изменение давления в областях между частицами
Table 2. The change in pressure in the areas between the particles

№ области	$P_{z=20 \text{ мкм}}$	$P_{z=100 \text{ мкм}}$	$P_{z=220 \text{ мкм}}$	Разность давлений
1	0,66	0,67	0,7	-0,03
2	0,55	0,54	0,5	0,05
3	0,31	0,31	0,255	0,05
4	0,58	0,76	0,96	-0,38

Значения давлений и скоростей приведены в табл. 2 и 3 соответственно. Для всей протяженности структуры, состоящей из 9 последовательных частиц вдоль потока, разность давления над частицей и под ней максимальна и положительна, то есть возможен отрыв частицы, для двух частиц, расположенных между областями разрежения структуры. Поэтому ветровой вынос начинается именно в таких областях, что в результате определяет квазипериодичность структуры поверхности.

Табл. 3. Изменение скорости в областях между частицами
Tab. 3. The change in velocity in the areas between the particles

№ области	$U_{z=20 \text{ мкм}}$	$U_{z=100 \text{ мкм}}$	$U_{z=220 \text{ мкм}}$
1	0,002	0,01	0,04
2	0,0001	0,0001	0,069
3	0,0014	0,0016	0,1
4	0,003	0,01	0,09

При минимальных расстояниях между поверхностями частиц в слое невозможен ветровой вынос. С увеличением расстояний в областях неоднородности или при изменении ориентации блоков по отношению к направлению движения ветра возможен ветровой вынос отдельных частиц. Для роста эоловой структуры необходимо, чтобы выносилось с поверхности определенная доля частиц [22], оставшиеся перекачивались, или оставались неподвижными. Сохранение возникшей структуры без раскатывающихся частиц от вершины определяет различие в структурах и наклонах наветренной и подветренной сторон.

5. Заключение

Изменение угла между плоскостями поверхностей блоков приводит к появлению неоднородностей в первоначальной структуре. В таких областях отмечается повышение скорости обтекающего потока от 0,05 м/с при отрыве от поверхности на стыке двух блоков и снижение давления. Увеличение при этом разностей давления дает рост начальной скорости выноса частицы из слоя. Разность значений давления для точек вокруг частицы, определяющая выталкивающую силу, увеличивается также и при движении по направлению потока над поверхностями частиц. Относительное увеличение составляет около 10% от величины разности. Неоднородности, возникшие за счет увеличения расстояния между поверхностями отдельных частиц или при изменении угла наклона плоскости, влияют на локальное изменение разности давлений на 10-30%.

Все эти факторы указывают на то, что песчаная поверхность под постоянным воздействием ветра представляет собой чередование квазирегулярных областей, в которых профицит разности давления снизу и сверху частицы преобладает над силой тяжести. Как следствие, появляются области с различной вероятностью ветрового выноса, за счет чего, в частности, происходит возникновение эоловой ряби.

Список литературы / References

- [1] Закарин Э.А. и др. ГИС-технология мониторинга и моделирования пыльных бурь. Гидрометеорология и экология, № 3, 2010 г., стр. 8-20 / Zakarin E.A. et al. GIS technology for monitoring and modeling dust storms. Hydrometeorology and ecology, no. 3, 2010, pp. 8-20 (in Russian).
- [2] Greeley R., Iversen D.J. Wind as geological process of Earth, Mars and Titan. New York, Cambridge University press, 1985. 333 p.
- [3] Ivanov V.K., Matveev A.Ya., Tsymbal V.N., Yatsevich S.Ye. Radar investigations of the aeolian sand and dust transporting manifestations in desert areas. Telecommunications and Radio Engineering, vol. 74, no. 14, 2015, pp. 1269-1283.
- [4] Почвозащитное земледелие. Под общ. ред. А.И. Бараева. М., Колос, 1975, 304 стр. / Conservation Agriculture. Under general editorship of A.I. Barayev. M., Kolos, 1975, 304 pp. (in Russian).
- [5] Chamberlain A.C. Roughness length of sea, sand, and snow. Boundary-Layer Meteorology, vol. 25, № 4, 1983, pp. 405-409.
- [6] Горчаков Г.И., Карпов А.В. и др. Экспериментальное и теоретическое исследование траекторий сальтирующих песчинок на опустыненных территориях. Оптика атмосферы и океана, том 25, № 6, 2012 г., стр. 501-506 / Gorchakov G.I., Karpov A.V. et al. Experimental and theoretical study of trajectories of salt sand grains in desert territories. Optics of the Atmosphere and the Ocean, vol. 25, № 6, 2012, pp. 501-506 (in Russian).
- [7] Гендугов В.М., Глазунов Г.П. Ветровая эрозия почвы и запыление воздуха. М., Физматлит, 2007 г., 238 стр. / Gendugov V.M., Glazunov G.P. Wind erosion of the soil and dusting of the air. M., Fizmatlit, 2007, 238 p. (in Russian).
- [8] Семенов О.Е. Экспериментальные исследования кинематики и динамики пыльных бурь и поземков. Труды Казахского научно-исследовательского гидрометеорологического института, вып. 49, 1972 г., стр. 2-31 / Semenov O.E. Experimental studies of the kinematics and dynamics of dust storms and windfalls. Proceedings of the Kazakh Research Hydrometeorological Institute, issue 49, 1972, pp. 2-31 (in Russian).
- [9] Bagnold R.A. The physics of blown sand and desert dunes. London, Chapman & Hall, 1973, 265 p.
- [10] Бютнер Э.К. Динамика приповерхностного слоя воздуха. Л., Гидрометиздат, 1978 г., 156 стр. / Butner E.K. The dynamics of the surface air layer. L., Gidrometizdat, 1978, 156 p. (in Russian).
- [11] Hau Lu. An integrated wind erosion modeling system with emphasis on dust emission and transport PhD Thesis, School of Mathematics, University of New South Wales, Sydney, Australia, 1999. 185 p.
- [12] Shao Y. Physics and modeling of wind erosion. Springer, 2008, 452 p.
- [13] Семенов О.Е. Введение в экспериментальную метеорологию и климатологию песчаных бурь. Алматы, Казахский научно-исследовательский институт экологии и климата, 2011 г., 580 стр. / Semenov O.E. Introduction to experimental meteorology and climatology of sandstorms. Almaty, Kazakh Research Institute of Ecology and Climate, 2011, 580 p. (in Russian).

- [14]. Lämmel M., Rings D., Kroy K. A two-species continuum model for aeolian sand transport. *New Journal of Physics*, vol. 14, №. 9, 2012, 24 p.
- [15]. Pähz T. et al. The critical role of the boundary layer thickness for the initiation of aeolian sediment transport. *Geosciences*, vol. 8, №. 9, 2018, 14 p.
- [16]. Williams J. J., Butterfield G. R., Clark D. G. Aerodynamic entrainment threshold: effects of boundary layer flow conditions. *Sedimentology*, vol. 41, №. 2, 1994, pp. 309-328.
- [17]. Malinovskaya E., Gorchakov G., Chkhetiani O., Karpov A. About the quasi-periodical variations of particles saltation. *Geophysical Research Abstracts*, vol. 21, EGU2019-3693-1, 2019.
- [18]. Chou Y. J., Fringer O. B. A model for the simulation of coupled flow bed form evolution in turbulent flows. *Journal of geophysical research*, vol. 115, 2010, 20 p.
- [19]. Малиновская Е.А. Трансформация эоловых форм рельефа при ветровом воздействии. *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*, том 55, №. 1, 2019 г., стр. 54-64 / Malinovskaya E.A. Transformation of aeolian relief forms under wind influence. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, vol. 55, issue 1, 2019, pp. 50–58.
- [20]. Yang X.I.A. et al. Drag forces on sparsely packed cube arrays. *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 880, 2019, pp. 992-1019.
- [21]. Dupont S., Bergametti G., Simoëns S. Modeling aeolian erosion in presence of vegetation. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, vol. 119, №. 2, 2014, pp. 168-187.
- [22]. Малиновская Е. А. Модель формирования ветрового эолового склона. *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*, том 55, №2, 2019 г., стр. 86-95 / Malinovskaya E.A. Windward Aeolian Slope Formation Model. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, vol. 55, issue 2, 2019, pp. 218–228.
- [23].] Кормилицына О. В., Бондаренко В. В., Палий И. М. Оценка свойств гранулометрических элементов как основа для создания почвенно-грунтовых смесей заданного качества. *Лесной вестник*, №7, 2007, стр. 84-89 / Kormilitsyna O.V., Bondarenko V.V., Paliy I.M. The estimation of properties of texture particles as a basis for creation of soil substrates of the required quality. *Forestry Bulletin*, №7, 2007, pp. 84-89 (in Russian).
- [24]. Moukalled F. et al. *The finite volume method in computational fluid dynamics //An advanced introduction with OpenFoam and Matlab*. Springer, 2016, 135 p.
- [25]. The PIMPLE algorithm in OpenFOAM. Available at: https://openfoamwiki.net/index.php/OpenFOAM_guide/The_PIMPLE_algorithm_in_OpenFOAM.

Информация об авторах / Information about authors

Елена Александровна МАЛИНОВСКАЯ – кандидат физико-математических наук, 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 выноса минеральных аэрозолей.

Elena Aleksandrovna MALINOVSKAYA – Ph.D. in Physics and Mathematics, 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 metabolic processes at the interface between the atmosphere and the underlying surface, mathematical and numerical modeling of the wind removal of mineral aerosols.