

МОДЕЛЬ ПОВЕРХНОСТНОГО ИСТОЧНИКА АТМОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВЕТРА НА ПЕСЧАНЫЕ ЧАСТИЦЫ ПОЧВЫ

Малиновская Е. А.

Выявлены состояния песчаных частиц поверхности, находящихся под влиянием ветра. В вычислительном эксперименте исследованы статические и динамические свойства поверхностного источника атмосферного аэрозоля (песчаных частиц поверхности, срывааемых ветром): интенсивность выдувания при различных скоростях ветра, динамическое изменение интенсивности выветривания при наличии структур поверхности с учетом и без учета осаждения ранее поднятых частиц



Проф. Каплан Лев Григорьевич
24 июля 1937 г. - 11 марта 2008 г.

В память о моем учителе и друге.

Изучение воздействия ветра на почву направлено на решение трех проблем: выявление механизмов выветривания почвы, объяснение причин структурирования поверхности под влиянием ветра, прогнозирование запыленности приземного слоя атмосферы во время бурь.

При исследовании воздействия ветра на почву известны следующие частные подходы.

Частицы, отрывающиеся от поверхности, вращаются [5], но при построении математических моделей это обстоятельство не учитывается, что вероятно и приводит к появлению в

расчетных выражениях дополнительных множителей. Особый интерес представляет переход от числовых значений параметров отдельных частиц к величинам, определяющим параметры выветривания атмосферы.

Ветровая эрозия и структура пыления пустынь, определяемая потоками частиц поверхности, исследованы в известной монографии Бютнер Э.К. «Динамика приповерхностного слоя воздуха» [2]. При этом частицы не рассматривались как аэрозоли, что определяет разрыв между исследованиями пыльных бурь на разных масштабных уровнях: локально внутри самой бури и глобально в межконтинентальных масштабах. Для непрерывного перехода необходимо обоснование возникновения пылевых слоев в песчаной буре на основе теории диффузионного распространения примеси. При этом появляется проблема определения статических и динамических свойств поверхностного источника аэрозоля, а также влияние структур поверхности на интенсивность выветривания отдельных частиц.

На современном этапе развития разработано программное обеспечение для исследования распространения пыли и для определения коэффициентов эродлируемости почвы на основе данных мониторинга (ее подверженности ветровой эрозии). Ветровая эрозия, запыление атмосферы и структурирование поверхности – взаимосвязанные про-

цессы, поэтому при комплексном исследовании моделей этих процессов в их взаимосвязи необходимо иметь соответствующее программное обеспечение.

В настоящей статье предложены исследовательские варианты решения перечисленных проблем.

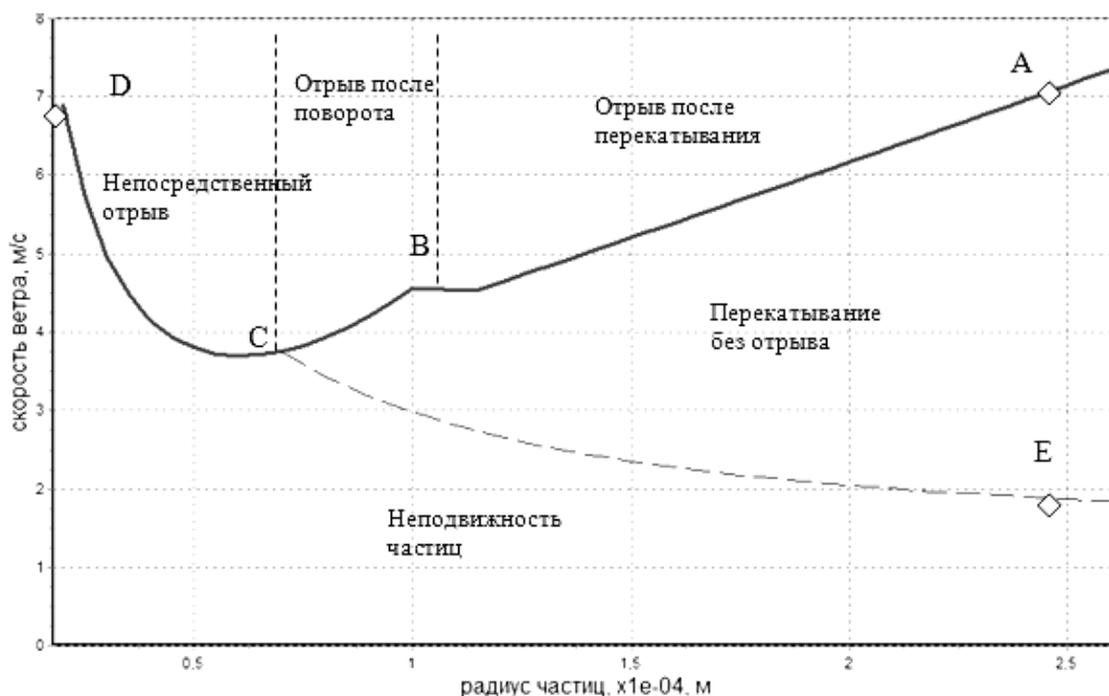


Рис. 1. Фазовый портрет состояний частиц поверхности при воздействии ветра, АВ – граница между состояниями перекачивания без отрыва и отрыва в результате перекачивания, ВС – граница между состояниями перекачивания без отрыва и отрыва после перекачивания, CD – граница между состояниями покоя и непосредственного отрыва, CE – граница между состояниями покоя и перекачивания без отрыва

1. Состояния частиц поверхности (рис. 1). Нами предложены и детально исследованы [1] два варианта механизмов отрыва для частиц поверхности разного размера при воздействии на них ветра: при непосредственном отрыве для мелких частиц радиусом $r < 10^{-4}$ м и в результате перекачивания по поверхности для крупных частиц радиусом $r > 10^{-4}$ м.

На основе анализа уравнений движения частицы нами получено значение критической скорости ветра (скорость ветра, при которых происходит отрыв частиц от поверхности), а также значение скорости ветра, при которой частицы перекачиваются по поверхности, что позволило построить диаграмму состояний частиц (рис. 1) и описать условия перехода из одного состояния в другое.

При скоростях ветра для частиц, соответствующих области ACE, характерно перекачивание по поверхности без отрыва. Для частиц при скоростях ветра выше значений, определяемых кривой СА, происходит отрыв после перекачивания, а выше значений, определяемых кривой CD – непосредственный отрыв.

2. Модель поверхностного источника атмосферного аэрозоля (песчаных частиц). Свойства поверхностного источника атмосферного аэрозоля определяются сово-

купностью вылетающих с поверхности частиц под влиянием ветра. Считаем, что песчаная (несвязанная) почва состоит из шарообразных частиц одинакового размера.

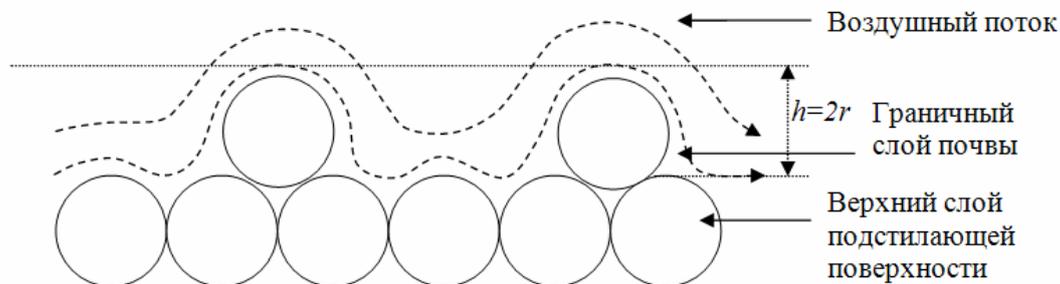


Рис. 2. Поверхность песчаной почвы

Полагаем, что в начальном положении верхний слой подстилающей поверхности плотно уложен (рис. 2). Между приповерхностным слоем атмосферы и плотно уложенным верхним слоем лежит граничный слой почвы, который подвергается выдуванию.

Запыленность атмосферы зависит от интенсивности испускания частиц источником. Число срываемых частиц в единицу времени определяется характеристиками, определяющими их вылет.

3. Характеристики модели поверхностного источника в статике. В вычислительном эксперименте в статике нами исследованы свойства модели поверхностного источника атмосферного аэрозоля, представляющего собой совокупность находящихся под влиянием ветра частиц поверхности, сосредоточенных на некоторой площадке. Вычислена интенсивность их испускания источником при различных скоростях ветра, а также проанализировано динамическое изменение интенсивности выветривания при наличии структур поверхности с учетом и без учета осаждения ранее поднятых частиц.

В статике величина интенсивности испускания частиц источником зависит от скорости ветра (рис. 3). При вычислении интенсивности нами принято, что частицы

нормально распределены по размерам [144]: $\Phi(x, a, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}}$, где

$\sigma^2 = 1,9 \cdot 10^{-10}$, $a = 1 \cdot 10^{-4}$ м. Число срываемых частиц за время t_p с единичной площадки n_k определено выражением:

$$n_k = \frac{\int \Theta(E_e - E) dN}{t_p \cdot S},$$

где E_e – пороговое значение энергии частицы k -ого типа, выше которого возможен отрыв частицы, E – энергия частицы, функция Θ имеет вид:

$$\Theta = \begin{cases} 1 & \text{при } E_e - E < 0, \\ 0 & \text{при } E_e - E > 0. \end{cases}$$

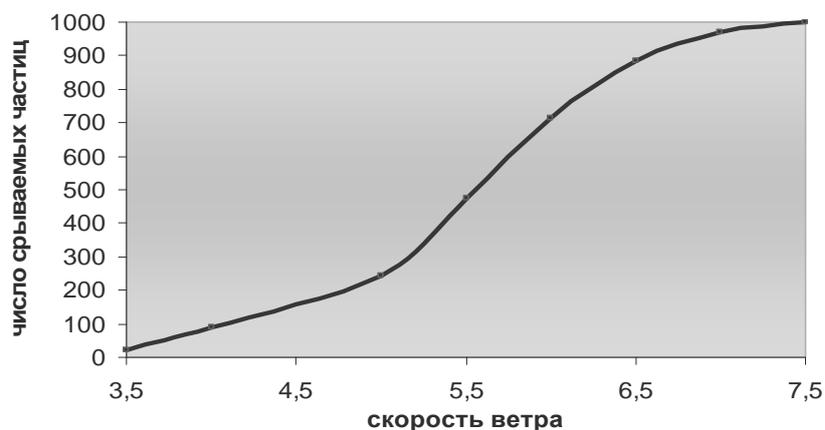


Рис. 3. Интенсивности выветривания частиц в зависимости от скорости ветра

Так как при небольших скоростях ветра (менее 7 м/с на высоте 1 м) отрываются не все частицы, важно учитывать механизмы отрыва группы частиц, их перемещения, а также возможность формирования устойчивых к воздействию ветра структур поверхности.

4. Характеристики модели поверхностного источника в динамике. Для исследования динамических свойств поверхностного источника нами проведен следующий численный эксперимент. Используя генератор случайных чисел, определены свойства частиц на площадке, имитирующей песчаную поверхность. Частицы поверхности отличны друг от друга радиусом r_i и заданы в соответствии с нормальным законом распределения. Для каждой i -ой частицы найдены следующие величины: m_i – массы, S_i – площади поперечного сечения, E_{e_i} – эталонной энергии, определенной выше как E_e , E_i – полной энергии частиц при фиксированной скорости ветра u и около поверхности.

Для оценки возможности возникновения острова неоднородности и его устойчивости к воздействию ветра нами определены вероятности отрыва частиц P_{ij} с учетом вероятностей их перемещения на площадке Q_{ij} . При реализации непосредственного отрыва без перекачивания для частицы характерны два состояния: отрыв и неподвижность. Вероятности P_{ij} и Q_{ij} в первом случае равны 1 и 0 соответственно, так как происходит отрыв без перемещения по поверхности, а во втором случае обе нулю. При этом вероятность отрыва определяем как

$$P_{ij} = \begin{cases} 1, & E_i > E_{e_i} \\ 0, & E_i < E_{e_i} \end{cases}.$$

Для отрыва в результате перекачивания необходимо, чтобы для частицы было возможно перемещение, то есть $Q_{ij} \neq 0$, а также возможен ее отрыв – $P_{ij} \neq 0$. При этом вероятность отрыва частицы в результате перекачивания \tilde{P}_{ij} определяется возможно-

стью реализации двух событий ее перемещения (перекатывания) с вероятностью Q_{ij} и отрыва с вероятностью P_{ij} :

$$\tilde{P}_{ij} = P_{ij} \cdot Q_{ij}. \quad (1)$$

Перекатыванию препятствуют соседние частицы, поэтому при вычислении вероятности перекатывания частицы (i, j) учитываем вероятность перемещения (или отрыва) соседней частицы $(i+1, j)$, расположенной по направлению движения воздуха. С учетом вариантов отрыва частиц (после перекатывания и непосредственно) получим для (1):

$$\tilde{P}_{ij} = \begin{cases} P_{ij} \cdot P_{i+1,j} & \text{при } r < 10^{-4} \text{ м} \\ P_{ij} \cdot \tilde{P}_{i+1,j} & \text{при } r > 10^{-4} \text{ м} \end{cases}$$

откуда

$$\tilde{P}_{ij} = \begin{cases} P_{ij} \cdot P_{i+1,j} & \text{при } r_{ij} < 10^{-4} \text{ м} \\ \begin{cases} P_{ij} \cdot P_{i+1,j} & \text{при } r_{i+1,j} < 10^{-4} \text{ м} \\ P_{ij} \cdot P_{i+1,j} \cdot \tilde{P}_{i+2,j} & \text{при } r_{i+1,j} > 10^{-4} \text{ м} \end{cases} & \text{при } r_{ij} < 10^{-4} \text{ м} \end{cases}. \quad (2)$$

Таким образом, учитывая вероятности отрыва соседних частиц (2), получаем итоговую формулу для отрыва частицы после перекатывания:

$$\tilde{P}_{ij} = \begin{cases} \prod_{k=0} P_{i+k,j} & \text{при } r_{i+k,j} < 10^{-4} \text{ м} \\ \tilde{P}_{i+k+1,j} \prod_{k=0} P_{i+k,j} & \text{при } r_{i+k,j} > 10^{-4} \text{ м} \end{cases}.$$

Первоначально отрыв частиц от поверхности происходит в области, где сосредоточены мелкие частицы, отрывающиеся без перекатывания. Такая область является неустойчивой к воздействию ветра. Дальнейшее выветривание происходит с расширением таких областей (рис. 4), так как «освобождается» свободное пространство для перекатывания более крупных частиц.

«Остров неоднородности», как устойчивое образование к воздействию ветра, при несильном ветре (3,5-5 м/с) создает условия для торможения около него других достаточно крупных перекатывающихся частиц. Это приводит к росту острова.

При «сильном» ветре (6,5-7 м/с) происходит непрерывный отрыв частиц на границе первоначальных малых островов, из-за чего эти острова исчезают: перекатывающиеся без отрыва частицы поверхности не дают вклад в рост острова, так как их мало, и они не «успевают» скапливаться. Однако в динамических движениях, учитывающих осаждение частиц, при горизонтальном расположении поверхности участвует всего лишь несколько верхних последовательно сдуваемых слоев почвы. Воздух поднимает с поверхности частицы граничного слоя. При этом открывается воздействию ветра верхний слой почвы, и он оказывается новым граничным слоем. Частицы выдуваются из

этого слоя. Так происходит несколько раз до тех пор, пока поднятые частицы из первоначального граничного слоя не осаждаются на поверхность.

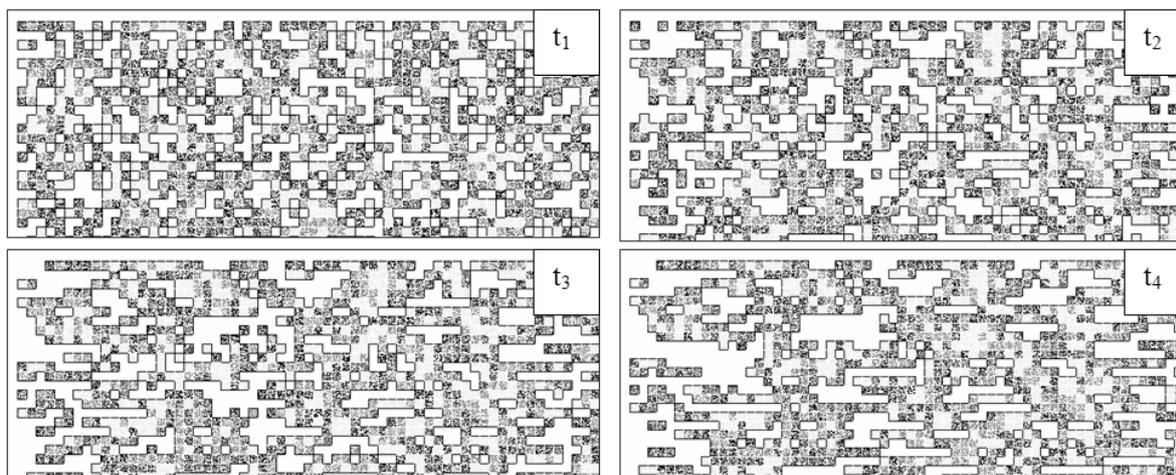


Рис. 4. Вычислительный эксперимент: укрупнение островов неоднородности с течением времени: t_1, t_2, t_3, t_4 - последовательные моменты времени

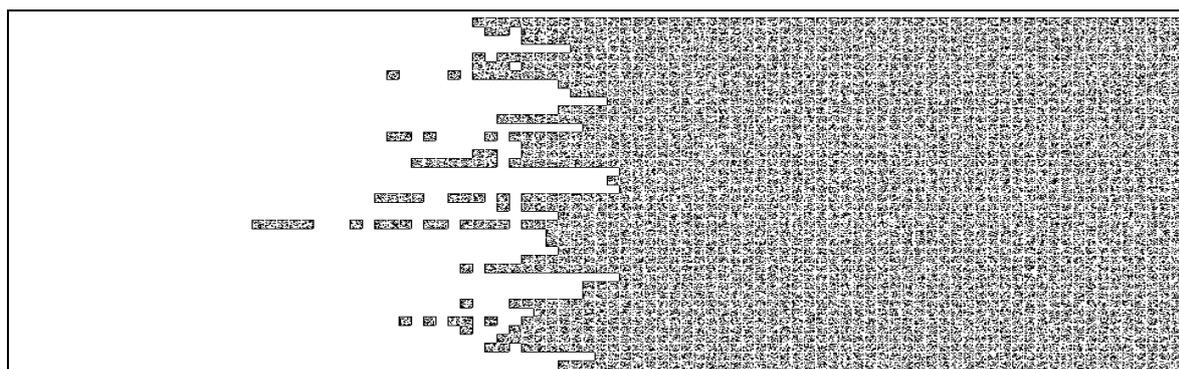


Рис. 5. Вычислительный эксперимент: возникновение островов при скорости ветра 4,8 м/с на высоте 1 м при скатывании частиц к стенке

Устойчивость частиц к воздействию «слабого» и «сильного» ветров проявляется двумя различными способами. При «слабом» ветре она определяется неподвижностью относительно крупных частиц и скоплением около них более мелких перекатывающихся частиц. При «сильном» ветре устойчивость появляется за счет ограниченности числа участвующих слоев почвы в пылении. При этом области, где сосредоточены частицы, отрывающиеся при перекатывании, являются устойчивыми к воздействию ветра. Там зарождаются структуры поверхности.

5. Фрактал линии наветренного склона при формировании структуры поверхности. Нами построена простая модель выветривания для выяснения условий формирования структуры поверхности только с учетом отрыва некоторого процента от числа всех частиц поверхности и скатывании остальных к стенке.

Полагая, что частицы захватываются случайным образом равномерно по всей протяженности площадки, сколько бы ни был мал верхний слой, процент захватываемых частиц будет одинаковым. Пусть для определенности он равен 50 %, тогда коэф-

фициент, характеризующий уменьшение протяженности взаимодействующего с атмосферой слоя a во времени $k = 1/2$. Оставшиеся на поверхности частицы перекатываются в плотно уложенные слои и задерживаются за счет появляющегося препятствия на их пути в виде стенки.

Далее нами показано, что процессы перекатывания частиц определяют фрактальность линии поверхности.



Рис. 6. Схема построения фрактала линии поверхности при выветривании частиц

Схема построения фрактала показана на рисунке 6. На нулевом шаге $N=0$ нами построен элемент, называемый инициатором [3]. В нашем случае инициатором является горизонтальная линия поверхности до момента воздействия ветра на ее частицы, это отрезок длиной $M = 1$. Далее на первом шаге отрезок нами разбивается на две части, которые находятся на разных уровнях. За счет этого в средней части между этими отрезками появляется дополнительный малый отрезок, соединяющий эти два уровня. Полученную фигуру называют генератором [3], длина которого в нашем случае $M = (1 + \Delta h)$, где $\Delta h = 2r$. Далее каждый из отрезков генератора за исключением отрезка, соединяющего два уровня, подвергается подобному преобразованию, затем выполняется третий шаг построения и т.д. до бесконечности.

Далее нами определена Хаусдорфова размерность D для величины отрезка M , характеризующего изменение линии поверхности. Как известно, D определяется соотношением между линейными размерами элементов покрытия и числом этих элементов [3]. В нашем случае более точно посчитать размерность можно, взяв размер элемента покрытия, равным $\Delta h = 2r$ (в безразмерном виде). При этом считаем, что число шагов

преобразований определяется как $n = \frac{h}{\Delta h}$. Число элементов покрытия для линии на нулевом шаге равно $\frac{M}{\Delta h}$. Тогда размерность определяем по формуле:

$$D = -\frac{\log\left(\frac{M}{\Delta h} + n\right)}{\log \Delta h}. \quad (3)$$

Откуда, подставляя числовые значения в (3) получаем, что $D = 1,18$. Таким образом, эволюция структуры поверхности имеет фрактальный характер с Хаусдорфовой размерностью $D = 1,18$ [3].

Эволюционное уравнение, которое характеризует изменение начальной координаты верхнего взаимодействующего с атмосферой слоя, имеет вид:

$$\frac{\partial a}{\partial t} = \varepsilon_1 a_0 k^t,$$

где $\varepsilon_1 = 1 \text{ с}^{-1}$. Полученное уравнение представляет собой граничное условие для изменения структуры поверхности.

Полагая, что ветер одинаково влияет на все открытые слои различных уровней, исходя из выше описанного метода построения фрактала, получаем в численном безразмерном виде изменения протяженности слоев при выдувании:

$$\begin{aligned} a_0^0 &= 1, \quad a_0^1 = k a_0^0, & \dots, & \quad a_0^i = k^i a_0^0, & \dots, & \quad a_0^n = k^n a_0^0; \\ a_1^0 &= 1, \quad a_1^1 = 1, \quad a_1^2 = k(a_0^1 - a_1^1), & \dots, & \quad a_1^i = k(a_0^{i-1} - a_1^{i-1}), & \dots, & \quad a_1^n = k(a_0^{n-1} - a_1^{n-1}); \\ & \dots & & & & & \\ a_j^0 &= 1, \quad a_j^1 = 1, & \dots, & \quad a_j^i = k(a_{j-1}^{i-j} - a_j^{i-j}), & \dots, & \quad a_j^n = k(a_{j-1}^{n-j} - a_j^{n-j}); \\ & \dots & & & & & \end{aligned}$$

где верхний индекс определяет время, а нижний – номер слоя (отсчет ведется от верхнего к нижним). Уравнение динамики процесса выветривания песчинок на основе дискретной записи и реализованного кода в программе нами представлено как

$$\frac{\partial a}{\partial t} = -\varepsilon_2 k \frac{\partial a}{\partial z}. \quad (4)$$

где $\varepsilon_2 = 1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. В итоге получено известное уравнение волны (4), которое в нашем случае описывает изменение протяженности слоев на разных уровнях при выветривании.

Таким образом, нами построен фрактал, определяющий линию поверхности при частичном выдувании граничного слоя почвы. Исходя из описания этого процесса в численном виде, получена дифференциальная форма уравнения изменения протяженности слоев, которая по виду соответствует уравнению волны.

6. Взаимосвязь процессов структурирования с интенсивностью испускания частиц поверхностным источником. Интенсивность испускания частиц поверхност-

ным источником в динамике определяется появлением структур поверхности: «островов неоднородности», ряби, дюн, их ростом и разрушением. При этом существенны процессы осаждения ранее поднятых частиц поверхности. Нами показано, что при учете механизмов отрыва частиц, процессов перекачивания и осыпания при значительном локальном угле наклона в вычислительном эксперименте наблюдается спонтанное возникновение структур поверхности (рис. 7).

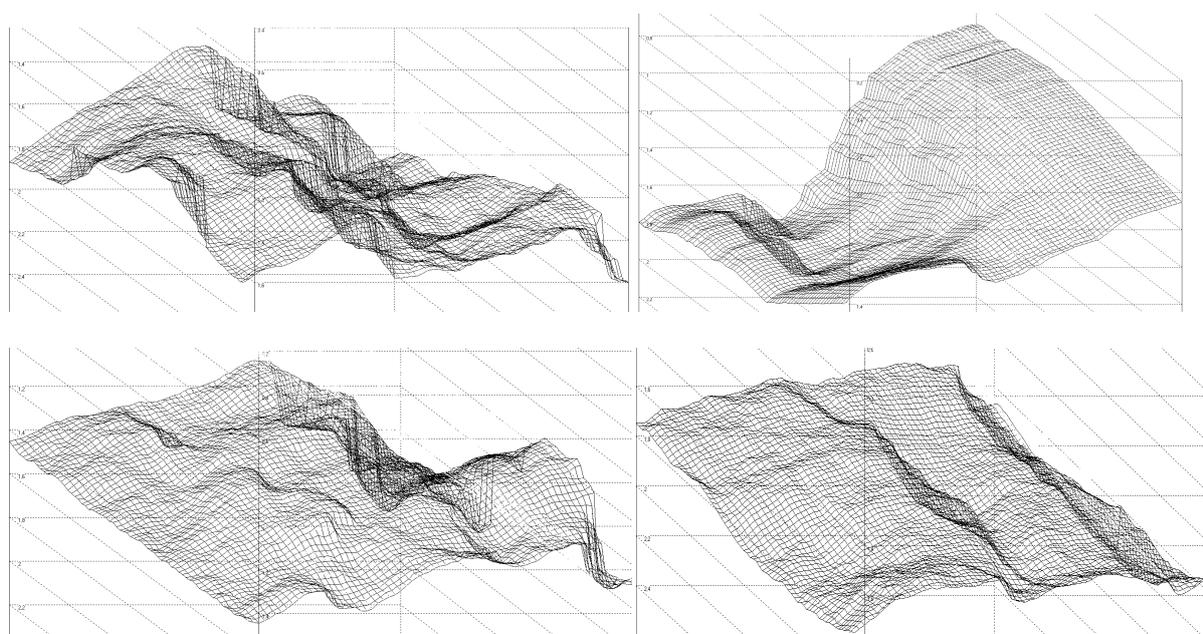


Рис. 7. Вычислительный эксперимент: структурирование поверхности под влиянием ветра

Появление структур определяется состояниями отдельных частиц. Исследование взаимосвязи процессов структурирования и интенсивности выдувания частиц возможно в вычислительном эксперименте.

Для исследования динамических процессов воздействия ветра на сухую песчаную почву разработан программный комплекс (ПК) «Сабугс», основанный на предложенных математических моделях процессов выветривания песчаной почвы. ПК «Сабугс» включает в себя следующие блоки: модель отрыва частиц, модель структурирования и отложение частиц в слое почвы, модель источника аэрозоля при выветривании частиц поверхности и модель распределения частиц в атмосфере, а также управляющий блок ПК. Результаты численных экспериментов находятся в хорошем качественном и количественном соответствии с реальными процессами, что свидетельствует об адекватности предложенных моделей и методов изучения ветровой эрозии и пыления.

7. Основные выводы. На основе анализа существующих моделей ветровой эрозии, динамики атмосферы и распространения примесей уточнены механизмы и предложена модель отрыва частиц песчаной поверхности под влиянием ветра. С использованием этой модели показано, что за счет различия условий и механизмов отрыва частиц разного размера возникают области более активного и менее активного выдувания почвы. Анализ энергии частицы при воздействии ветра показал, что на поверхности формируются области устойчивые к воздействию ветра, названные автором «островами неоднородности».

«Остров неоднородности» изменяет характеристики поверхностного источника аэрозолей при пылении и ветровой эрозии. Исследованы динамические свойства этого источника. На основе представлений о возникновении «островов неоднородности», а также анализа физической модели отрыва частиц предложена модель поверхностного источника аэрозолей в атмосфере. В вычислительном эксперименте показано, что при наличии островов неоднородности с течением времени происходит структурирование поверхности.

Модель отрыва частиц от поверхности, модель структурирования поверхности и модель поверхностного источника аэрозолей в атмосфере согласованы путем объединения в программе с доступным пользователю интерфейсом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малиновская Е.А., Каплан Л.Г. Модель отрыва частиц поверхности // Маркшейдерия и недропользование. 2007. № 3. С.55-61.
2. Бютнер Э.К. Динамика приповерхностного слоя воздуха. Ленинград: Гидрометиздат, 1978. С.156.
3. Крылов С.С., Бобров Н.Ю. Фракталы в геофизике: учебное пособие. СПб.: Издательство С.-Петербургского университета, 2004. 138 с.
4. Лойцянский Л.Г. Механика жидкостей и газов. М., «Наука», 1970. 804 с.
5. *Hau Lu*. An integrated wind erosion modeling system with emphasis on dust emission and transport // A thesis submitted in fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, School of Mathematics The University of New South Wales Sydney, Australia, Mathematical Science, 1999.

MODELING SUPERFICIAL SOURCE OF ATMOSPHERIC AEROSOL UNDER THE INFLUENCE OF WIND ON SAND PARTICLES

Malinovskaya E. A.

Characteristics of sand surface particles under influence of wind are studied. Static and dynamic properties of superficial source of atmospheric aerosol (sand particles separated from surface by wind) are investigated in computational experiment: source strength under different wind speed, dynamic changing of source strength in the presence of surface structures considering/neglecting precipitation of earlier lifted particles