

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СТРУКТУРИРОВАНИЯ И ТРАНСФОРМАЦИИ СЛУЧАЙНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ ПОВЕРХНОСТИ ПОД ВЛИЯНИЕМ ВЕТРА

Малиновская Е. А., Каплан Л. Г.

(Россия, Ставрополь)

Рассмотрено воздействие ветра на почву. Показано, что на поверхности почвы возникают случайные структурные образования. Предложена модель формирования структур с учетом отрыва, перекатывания и осыпания почвенных частиц.

Введение. Структурирование и трансформация случайных образований поверхности почвы происходит под влиянием ветра. Процессы взаимодействия на границе атмосферы и почвы приводят к ветровой эрозии, загрязнению атмосферы частицами поверхности техногенного происхождения [1], влияют на опустынивание и эродируемость почв [2] и должны учитываться при разработке палеогеографических сценариев [3]. В настоящей работе исследовано влияние ветра на граничный слой почвы, в частности, структурирование поверхности и устойчивость возникших структур.

В работе Э. К. Бютнера [4] рассмотрен перенос частиц поверхности за счет сальтаций (прыжков) частиц при турбулентном режиме приземного ветра. Формирование структур и механизмы отрыва частиц при этом не рассматриваются.

Согласно результатам проведенных нами лабораторных наблюдений, условия отрыва частиц определяют наиболее существенные параметры возникающих структур на поверхности почвы. Условия возникновения структур поверхности под влиянием ветра, исходя из предложенной нами модели отрыва [5], описаны ниже.

1. Выявление условий структурирования поверхности.

Механизм отрыва нами рассмотрен в рамках последовательного гидродинамического подхода. За основу взята плоская модель, исходя из предположения, что частицы имеют шарообразную форму (рис.1). С большой точностью это предположение оправдывается для мелких частиц.

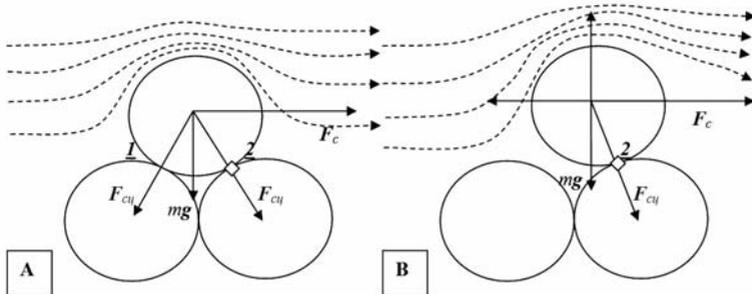


Рис. 1. Силы, действующие на частицу в граничном слое

Считается, что частица, лежащая на поверхности плотно уложенного верхнего слоя частиц, находится в устойчивом положении. На нее действуют сила тяжести mg , сила сцепления F_{c1} и сила реакции опоры со стороны частиц нижнего слоя. Частица находится в потенциальной энергетической яме. За счет ветра (сила Стокса F_c) или других внешних воздействий необходимо совершить работу A_q для ее отрыва от поверхности против сил сцепления и тяжести. При оценке характера отрыва учтено, что начальный сдвиг частицы реализуется по одному из двух сценариев: при отрыве и последующем вертикальном движении частицы непосредственно с поверхности нижележащего слоя (для малых частиц с радиусом $r < 8 \cdot 10^{-5}$ м) или при ее быстром перекачивании (с радиусом $r > 8 \cdot 10^{-5}$ м). При некотором радиусе r_n сценарий «меняется». Соответственно указанным сценариям, работа ламинарного потока ветра по отрыву частицы от поверхности определяется зависимостями:

$$A_4 = \begin{cases} D_3 r^4 + \left[\frac{D_1}{2} u_*^2 + D_2 v_z \right] r^3, & r < r_n, \\ B_2 r^4 + (u_*^2 + 2u_* v_k + \sqrt{2} v_k) B_4 r^3 + B_3 r^2 (u_* - v_k) + B_1 r, & r > r_n. \end{cases}, (1)$$

где $B_1 = \cos \frac{\pi}{3} F_{cyl}$, $B_2 = mg \cos \frac{\pi}{6}$, $B_3 = -6\pi\mu \sin \frac{\pi}{3}$, $B_4 = \frac{2\pi\rho}{2} \cos \frac{\pi}{6}$,

$D_1 = -2\pi\rho$, $D_2 = 6\mu r$, $D_3 = \frac{4}{3}\pi\rho_0 g$ – постоянные коэффициенты,

определяемые значениями силы сцепления, силы тяжести, силы Стокса и силы давления. S , m – площадь поверхности и масса

частицы, ρ – плотность воздуха, $h = \frac{z}{r \cos(\pi/3)}$ – высота подъема

некоторой крайней точки частицы над ее первоначальным положением, z – высота подъема частицы, $v_{kx} = u_* - v_k$ – относительная скорость движения потока воздуха в верхней части частицы при ее вращении.

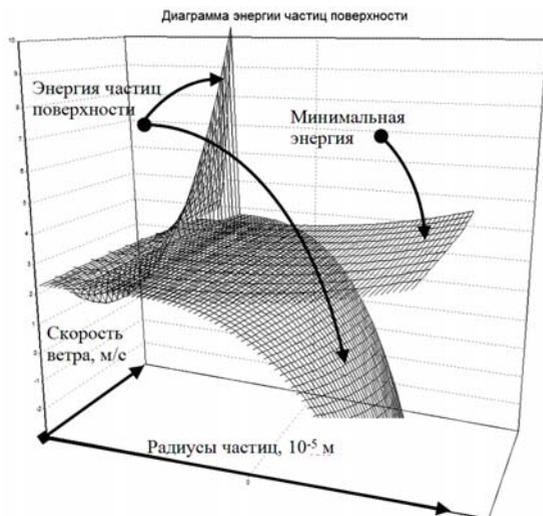


Рис. 2. Диаграмма сравнения энергии частицы с минимальной

Для обоих сценариев энергия оторванной частицы описывается многочленами четвертой степени (1). Нами проведено исследование этих многочленов и выявлены причины структурирования. В качестве эталона для сравнения принята потенциальная энергия оторванной ветром частицы на высоте, равной ее среднему радиусу. В относительных единицах рассчитана полная энергия частицы поверхности на указанной высоте (рис.2) в зависимости от скорости ветра и радиуса. Исследование полученных зависимостей привело к выводам:

1. энергия малых частиц с увеличением скорости ветра резко увеличивается и значительно превышает указанную эталонную энергию, поэтому при ветре происходит их отрыв, а не перекачивание;
2. отрыв более крупных частиц, но меньших $r = 3 \cdot 10^{-4}$ м, происходит при относительно больших скоростях ветра (4–5 м/с), при меньших скоростях происходит их перекачивание;
3. для крупных частиц $3 \cdot 10^{-4} < r < 6 \cdot 10^{-4}$ м возможно только перекачивание;
4. для очень крупных частиц $r > (6-8) \cdot 10^{-4}$ м отрыв и перекачивание невозможны при обычных скоростях ветра.

Минимальные силы сцепления частиц сухой песчаной почвы определяют возможность структурирования ее поверхности. Крупные частицы не переносятся ветром, образуются острова, которые с течением времени растут, и далее происходит структурирование поверхности. При больших силах сцепления, характерных для влажной почвы, этого не происходит.

2. Формирование «островов неоднородности». Средний размер частиц песка различных пустынь находится в пределах $10^{-4} < r < 10^{-6}$ м. Распределения частиц по размерам в одних случаях близки к логарифмически нормальным, в других — ближе к нормальным [4].

При этом крупные частицы с $r > 3 \cdot 10^{-4}$ м практически полностью отсутствуют, а доля пылеватых глинистых частиц с $r < 2 \cdot 10^{-5}$ м сравнительно невелика.

Нами был проведен следующий эксперимент. Частицы разного размера были равномерно распределены по поверхности, и на нее был направлен поток воздуха. С течением времени частицы приблизительно одинакового размера скопились, образуя сравнительно высокие «острова неоднородности». Высота этих островов оставалась неизменной. В соседних областях продолжалось выветривание частиц, и уровень поверхности понижался.

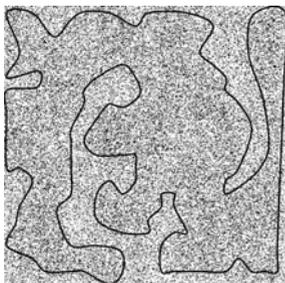


Рис. 3. «Острова неоднородности»: численный эксперимент

В численном эксперименте нами проанализировано формирование такого острова, исходя из механизма отрыва частиц поверхности. За основу взято условие достаточности энергии частицы для ее подъема при ламинарном потоке ветра: $E_c + U_c \geq L_{кр}$. Подтверждено, что возможно образование «островов неоднородности» (рис.3), где частицы взаимодействуют с большим количеством соседних частиц. Часть островов остается устойчивыми к воздействиям ветра, и их уровень остается неизменным. При значительном возвышении «острова» происходит осыпание частиц на его границе.

3. Изменение уровня поверхности с течением времени.

При разработке модели формирования структур поверхности учтены отрыв частиц, их осыпание и скатывание. Рассмотрим песчаную площадку, с поверхности которой безвозвратно выветриваются частицы. Если энергия больше критического значения $L_{кр}$ частицы, при которой возможен ее подъем над уровнем гранич-

ного слоя почвы, то она ускоряется и выпрыгивает за пределы площадки. В точке, откуда вылетела частица, понижается уровень на величину ее диаметра. Изменение уровня h поверхности рассчитано, исходя из условия достаточности энергии частицы для отрыва от нее:

$$h(t, x, y) = \begin{cases} h(t', x, y), E_u + U_u \geq L_{кр}, \\ h(t', x, y) + dh, E_u + U_u < L_{кр}. \end{cases} \quad (2)$$

При значительном изменении уровней поверхности учтены процессы осыпания. Для их описания использована модель песчаной кучи, предложенная П. Баком, Т. Чангом, К. Визенфельдом [6]. В соответствии с этой моделью при большом локальном наклоне поверхности происходит осыпание, т.е. соскальзывание песчинок вниз на соседние участки поверхности. Из этого выражения следует, что осыпание происходит, когда разность высот соседних элементов поверхности превышает некоторую критическую величину. За счет изменения уровня поверхности меняется потенциальная энергия частиц: при замене одной оторванной частицы на другую из нижнего слоя, при условии, что некоторая частица осталась на месте, но произошел отрыв соседних частиц.

Скатывание частиц учтено, принимая во внимание энергию частицы. Если она меньше минимального значения $L_{кр}$, при которой возможен отрыв от поверхности (2), то частица перекаатывается. Условие для скатывания частиц представлено в виде:

$$h(t, x + jdx, y) = \begin{cases} h(t', x + jdx, y), L_n > L_u, \\ \begin{cases} h(t', x + jdx, y) - dh \\ h(t', x_L + jdx, y) + dh \end{cases}, L_n < L_u < L_{кр}. \end{cases} \quad (3)$$

где L_n — энергия частицы, при которой невозможно перекаатывание. Первое условие в (3) — для случая малости энергии частицы, когда ее положение остается неизменным. Уровень поверхности остается прежним. Второе условие в (3) учитывает перекаатывание и характеризует локальные изменения уровня поверхности. Про-

исходит повышение уровня в точке, куда падает частица и понижение там, откуда она перекачивается. При этом если на одном уровне близко друг к другу оказались несколько частиц, то влияние ветра наибольшее на ту, которая находится на наветренной стороне, поверхность которой максимально открыта. Если число взаимодействующих частиц превышает некоторое критическое количество $j = n$, их перекачивание невозможно.

С течением времени происходит структурирование поверхности. При рассмотрении дальнейшей трансформации уже организованной структуры учтены те же процессы, что и при начальном изменении уровня. В численном эксперименте при скорости ветра 5 м/с структурный элемент с высотой 0,2 см и длиной около 1,2 см сформировался через 1 час 24 мин. Угол наклона наветренной стороны составил 12° , угол наклона подветренной стороны 60° . Характерные формы поверхности, полученные в численных экспериментах, соответствуют реальным, наблюдаемым в природе. При структурировании поверхности происходило укрупнение элементов структур, их объединение, распад, изменение форм. Весьма часто наблюдались периодические структуры (рис.4).

Показано, что имеется различие в скоростях подветренной и наветренной сторон структуры, приводящее к ее росту и растяжению, особенно в нижней части. Это растяжение наиболее активно в моменты лавинообразного осыпания с подветренной стороны.

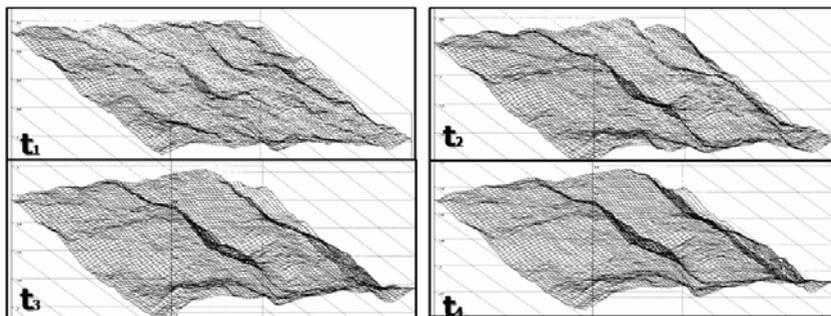


Рис. 4. Формирование структур поверхности под влиянием ветра

Заключение. Структурирование поверхности сухой почвы определяется характеристиками механизмов отрыва и особенностями распределения размеров частиц. Проведен анализ энергий частиц в соответствии с двумя сценариями, соответствующих отрыву или отрыву под влиянием ветра. В численном эксперименте обосновано возникновение «островов неоднородности», наблюдаемых в природе и физических экспериментах. Предложена система уравнений, описывающая изменения высоты поверхности песчаной почвы при осыпании и перекачивании частиц. Разработанные на основе предложенных моделей компьютерные программы собраны в единую имитационную модель взаимодействия поверхностного слоя почвы и атмосферы, заменяющую физический испытательный стенд.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Влияние атмосферного загрязнения на свойства почв / Под ред. Л.А. Гришиной. — М.: Изд-во МГУ, 1990. — 205 с.
2. Пачепский Я.А. Математические модели физико-химических процессов в почвах. — М.: Наука, 1992. — 120 с.
3. Волгин В.М., Ивлев Л.С., Кудряшов В.И. Изучение характеристик палеоклимата с использованием физических методов // Материалы 3-й международной конференции «Естественные и антропогенные аэрозоли» / Москва, 2001. С.4–7.
4. Бютнер Э.К. Динамика приповерхностного слоя воздуха. — Ленинград: Гидрометиздат, 1978. С.156.
5. Малиновская Е.А., Каплан Л.Г. Об отрыве частиц от поверхности земли при ветровой эрозии // Маркшейдерия и недропользование, 2007. №3. С. 33–47.
6. Крылов С.С., Бобров Н.Ю. Фракталы в геофизике: учебное пособие. — СПб.: Издательство С.-Петербургского университета, 2004. — 138с.

**MODELLING OF STRUCTURING AND TRANSFORMATION
PROCESSES OF SURFACE CASUAL FORMATIONS UNDER
INFLUENCE OF WIND**

Malinovskaya E. A., Kaplan L. G.

(Russia, Stavropol)

The influence of wind on soil considered. Casual structuring formations can appear on surface of soil showed. The model of structure forming proposed with taking into account detachment, rolling and falling of soil particles.