

*Работа посвящается памяти
Владимира Михайловича Гендугова*

ДИНАМИКА ПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

УДК 631.44

Г.П. Глазунов¹, Г.А. Ларионов², А.В. Горобец³

РЕЖИМЫ ДВИЖЕНИЯ И МЕХАНИЗМЫ ИСТИРАНИЯ ПОЧВЕННЫХ АГРЕГАТОВ ПРИ ЭРОЗИИ ПОЧВ

Трудность построения полной модели водной эрозии почв на склоне определяется разномасштабностью составляющих ее процессов, достигающей в пределе 10^9 . Отсюда следует, что элементы общей теории эрозии почвы необходимо строить с учетом масштаба. Целью данной работы было получение в рамках гидравлического приближения аналитического решения задачи об измельчении почвенных агрегатов в процессе переноса стационарным склоновым потоком. В связи с этим исследовали отрыв, перенос, преобразование и переотложение единичной, первоначально свободно лежащей на дне временного водного потока почвенной частицы (агрегата). Как и ранее, в случае с ветровой эрозией почвы, исследование проводили методами механики многофазных сред в мезомасштабе, в отличие от эмпирических и подходов на основе произвольно вводимых уравнений и статистических распределений. Под преобразованием частицы понимается ее истирание в результате многократного ударного взаимодействия с ложем временного водного потока на склоне. В результате, в рамках гидравлического приближения впервые найдено (в форме уравнений) аналитическое решение задачи об измельчении в результате истирания почвенных агрегатов, переносимых стационарным склоновым потоком. Установлено, что степень истирания, характеризуемая отношением текущего радиуса почвенного агрегата к исходному, определяется его механическими свойствами и соотношением гидравлических характеристик потока и агрегатов. При этом механические свойства агрегата учитываются двумя эмпирическими коэффициентами уравнения истирания, а гидравлические характеристики потока и агрегата – эрозионным числом. В результате теоретического решения расширен физический смысл эрозионного числа, которое оказалось не только соотношением вихревой подъемной силы и силы веса агрегата, определяющим тип его движения в потоке, но и показателем его предельного истирания при транспортировке стационарным водным потоком. Указанные коэффициенты, учитывающие механические свойства истираемых водным потоком агрегатов, могут быть найдены экспериментально, опытами в гидравлических лотках, подобных использованному в настоящих исследованиях.

Ключевые слова: истирание, абразия, эрозионное число, вихревая подъемная сила, устойчивость агрегатов, транспорт наносов

Введение. Важнейшими процессами, характеризующими водную эрозию, являются формирование на склоне временного водного потока и его взаимодействие с почвой, приводящее к отрыву, переносу, преобразованию и переотложению почвенных частиц и агрегатов. Описание этих процессов и составляет основу теории водной эрозии почвы. Несмотря на обширность накопленного экспериментального материала и ясность качественных представлений о составляющих механизма процесса эрозии, построить полную модель явления пока не удастся. Причина этого кроется в самом явлении, которое представляет собой совокуп-

ность разномасштабных процессов. Пространственные масштабы процессов отрыва и выноса почвенных частиц склоновым потоком определяются размером частиц и глубиной потока. Как правило, они укладываются в диапазон 0,001–100 мм. Масштабы процессов переноса и переотложения частиц определяются длиной русел временных водотоков на склоне и имеют порядок 10–1000 м. Таким образом, характерные пространственные масштабы процессов единичного явления водной эрозии почвы в пределе различаются в 10^9 раз. Отсюда следует, что элементы общей теории явления эрозии почвы необходимо строить с учетом масштаба. Целью данной работы было

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, факультет почвоведения, кафедра земельных ресурсов и оценки почв, профессор, докт. биол. н.; *e-mail:* glazng@mail.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Научно-исследовательская лаборатория эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева, ведущий научный сотрудник, докт. геогр. н.; *e-mail:* laronov425@mail.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Научно-исследовательская лаборатория эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева, науч. с., канд. биол. н.; *e-mail:* GorobetsAV@geogr.msu.ru

получение в рамках гидравлического приближения аналитического решения задачи об измельчении почвенных агрегатов в процессе переноса стационарным склоновым потоком. В связи с этим в данной работе исследуются отрыв, перенос, преобразование и переотложение единичной, первоначально свободно лежащей на дне сформировавшегося временного водного потока почвенной частицы (агрегата). В отличие от чисто эмпирических подходов [Wang et al., 2014] и подходов с использованием произвольно вводимых уравнений [Domokos et al., 2014] и статистических распределений [Le Bouteiller et al., 2011], исследование, как и ранее, в случае с ветровой эрозией почвы, проводится методами механики многофазных сред в мезомасштабе [Гендугов, Глазунов, 2007]. Под преобразованием частицы в процессе ее переноса водой понимается истирание в результате многократного ударного взаимодействия с ложем временного водного потока на склоне. Особенностью подхода является использование представлений о вихревом характере подъемной силы, действующей на частицу со стороны потока [Глазунов, Гендугов, 2000], и о малости концентрации почвенных частиц в потоке, что позволяет пренебречь взаимным влиянием частиц в потоке и их влиянием на поток, ограничившись учетом влияния потока на частицы.

Построение теоретической модели переноса и истирания частиц потоком. Способность вихревого потока отрывать и переносить почвенные частицы относится к действию вихрей, ось вращения которых совпадает с направлением силы тяжести, а возникновение такого рода вихрей – к взаимодействию водного потока с руслом. При этом подъемная сила, действующая на частицу в неглубоком потоке, определяется с учетом расстояния частицы от дна y :

$$F_y = K_{**} \rho U^2 \left(1 - \frac{y}{h}\right) S_m. \quad (1)$$

Здесь K_{**} – коэффициент подъемной силы, ρ – плотность воды, U – средняя по сечению скорость временного водного потока на склоне, y – расстояние от дна потока вдоль перпендикуляра к дну, h – глубина потока, S_m – площадь миделева сечения частицы почвы. В формуле (1) учитывается, что подъемная сила вихря имеет наибольшее значение у дна ($y = 0$), а вблизи зеркала воды ($y = h$) – исчезает.

Помимо этой силы на частицу в потоке действуют: а) сила лобового давления; б) сила тяжести; в) выталкивающая сила Архимеда; г) отклоняющая сила Магнуса; д) силы присоединенных масс Бассэ; е) подъемная сила Жуковского; ж) сила вязкого сопротивления Стокса. Однако в модели, по причине сравнительной малости, не учитываются подъемная сила Жуковского (поскольку при равенстве продольных скоростей потока и частицы, которое имеет место в действительности, она стремится к нулю), «унаследованная» сила Бассэ, возникающая из-за нестационарности пограничного слоя вокруг частицы (поскольку в принятом масштабе исследования поток представляется стационарным) и попе-

речная сила Магнуса, возникающая вследствие вращения частицы в потоке (поскольку рассматривается плоская модель). Кроме того, при достаточно большой скорости склонового потока продольная скорость частицы, оторванной от дна, становится равна скорости самого потока. Средняя скорость потока будет определена в рамках крупномасштабного приближения гидравлики (по формуле Шеши).

Ограничиваясь стационарным плоским потоком и указанными условиями, выпишем уравнения движения сферической частицы радиуса r в проекции на ось x :

$$v_x = U, \quad (2)$$

и в проекции на ось y (перпендикулярно дну):

$$\frac{4}{3} \pi r^3 \rho_{\text{ч}} \frac{dv_y}{dt} = K_{**} \rho U^2 \cos \alpha \pi r^2 \left(1 - \frac{y}{h}\right) - \frac{4}{3} (\rho_{\text{ч}} - \rho) g \pi r^2 \cos \alpha - 6 \pi \mu r v_y, \quad (3)$$

где α – угол падения склона, $\rho_{\text{ч}}$ – плотность почвенного агрегата, g – ускорение свободного падения, μ – вязкость воды. Разделив обе части (3) на $K_{**} \rho U^2 \cos \alpha \pi r^2$, получим уравнение

$$\frac{4}{3} \frac{r \rho_{\text{ч}}}{K_{**} \rho U^2 \cos \alpha} \frac{d^2 y}{dt^2} = \left(1 - \frac{y}{h}\right) - \frac{4}{3} \left(\frac{\rho_{\text{ч}}}{\rho} - 1\right) \times \times \frac{gr}{K_{**} U^2} - \frac{6 \mu}{r K_{**} \rho U^2 \cos \alpha} \frac{dy}{dt}. \quad (4)$$

Введем, как и в работах [Глазунов, Гендугов, 2000; Гендугов, Глазунов, 2009а, 2009б], эрозионное

число $E_r = \frac{3}{4} \frac{\rho K_{**} U^2}{(\rho_{\text{ч}} - \rho) gr}$, представляющее собой отношение подъемной силы к весу частицы, и безраз-

мерные переменные: $z = 1 - \frac{1}{E_r} - \frac{y}{h}$; $\tau = \frac{U t}{r}$.

Тогда уравнение (4) приводится к виду

$$A \ddot{z} + B \dot{z} + z = 0, \quad (5)$$

где

$$A = \frac{4}{3} \frac{\rho_{\text{ч}}}{\rho} \frac{h}{r K_{**} \cos \alpha}; \quad B = \frac{6}{K_{**}} \frac{h}{r \text{Re}}; \quad \text{Re} = \frac{U r \rho}{\mu}.$$

Уравнение (5) является линейным дифференциальным уравнением второго порядка с постоянными коэффициентами. Его решение ищется при начальных условиях:

$$t = \tau = 0; \quad z_0 = \left(1 - \frac{1}{E_r}\right); \quad v_y = U \frac{h}{r} \frac{dz}{d\tau} = 0. \quad (6)$$

Заметим, что согласно (6), при $E_r > 1$ существует физически значимое решение (5), а $z \leq 0$ соответствует движению частицы по дну (вдоль оси x).

Решение уравнения (5) будем искать стандартным способом. Выпишем характеристическое уравнение

$$A\lambda^2 + B\lambda + 1 = 0 \quad (7)$$

и определим его корни

$$\lambda_{1,2} = \frac{B}{2A} \left(-1 \pm \sqrt{\frac{4A}{B^2}} \right). \quad (8)$$

Поскольку $A > 0$ и $B > 0$, собственные значения (λ_1, λ_2) различны, действительны и отрицательны при условии

$$1 > \frac{4A}{B^2}. \quad (9)$$

Иначе говоря, решение (5) имеет вид:

$$z = c_1 e^{\lambda_1 \tau} + c_2 e^{\lambda_2 \tau}. \quad (10)$$

Здесь c_1, c_2 – константы интегрирования, которые определяются из начальных условий (6), т. е.

$$\tau = 0; \quad 1 - \frac{1}{E_r} = c_1 + c_2; \quad c_1 \lambda_1 + c_2 \lambda_2 = 0. \quad (11)$$

Определив из этих равенств c_1 и c_2 , выпишем решение для $\frac{y}{h}$

$$\frac{y}{h} = \left(1 - \frac{1}{E_r} \right) \left[1 - \frac{1}{\left(1 - \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)} \left(e^{\lambda_1 \tau} - \frac{\lambda_1}{\lambda_2} e^{\lambda_2 \tau} \right) \right]. \quad (12)$$

Из (12) следует, что частицы этого сорта движутся по монотонным траекториям, приближаясь к предельной для себя глубине $\frac{y}{h} = 1 - \frac{1}{E_r}$.

Если $4A = B^2$, то, согласно (8), $\lambda_1 = \lambda_2 = -\frac{B}{2A}$ и

$$r_* = \frac{3}{2} h \left(\frac{2\rho \cos \alpha}{\rho_q K_{**} \text{Re}_z^2} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (13)$$

Здесь $\text{Re}_z = \frac{\rho z U}{\mu}$. В этом случае общее решение

(5) имеет вид

$$z = (c_1 + c_2 \tau) e^{-\frac{B}{2A} \tau}. \quad (14)$$

Из начальных условий (6) имеем

$$c_1 = z_0 = 1 - \frac{1}{E_r}; \quad c_2 = \frac{B}{2A} c_1. \quad (15)$$

Следовательно,

$$z = \left(1 - \frac{1}{E_r} \right) \left(1 + \frac{B}{2A} \tau \right) e^{-\frac{B}{2A} \tau}. \quad (16)$$

Из (16) следует, что при $\tau \rightarrow \infty \quad z \rightarrow 0$, т. е.

$\frac{y}{h} = 1 - \frac{1}{E_r}$. Так как $x = Ut$, то $\tau = \frac{x}{r}$. Подставив эти выражения в (12) и (16), получим уравнения траекторий частиц при $r \leq r_*$.

Рассмотрим теперь случай, когда $1 - \frac{4A}{B^2} < 0$ и собственные значения являются комплексно сопряженными. В таком случае общее решение (5) имеет вид

$$z = e^{-\frac{B}{2A} \tau} (c_1 \cos \beta \tau + c_2 \sin \beta \tau), \quad (17)$$

где $\beta = \frac{B}{2A} \sqrt{\frac{4A}{B^2} - 1}$. Из начальных условий (6)

имеем:

$$c_1 = 1 - \frac{1}{E_r}; \quad c_2 = \frac{B}{2A\beta} c_1 = \frac{1 - \frac{1}{E_r}}{\sqrt{\frac{4A}{B^2} - 1}}; \quad E_r > 1. \quad (18)$$

С учетом вида c_1 и c_2 запишем (17) как

$$z = \left(1 - \frac{1}{E_r} \right) \left(\cos \beta \tau + \frac{\sin \beta \tau}{\beta} \right) e^{-\frac{B}{2A} \tau}. \quad (19)$$

Подставив в (19) $\tau = \frac{x}{r}$, получим уравнение траектории колебательного движения частицы в потоке

$$\frac{y}{h} = \left(1 - \frac{1}{E_r} \right) \left[1 - \left(\cos \frac{\beta x}{r} + \frac{B}{2A\beta} \sin \frac{\beta x}{r} \right) \right] e^{-\frac{Bx}{2Ar}}. \quad (20)$$

Из уравнения (20) следует, что с удалением от точки старта колебания частицы поперек потока затухают и ее траектория стремится к предельной высоте

$$z = 1 - \frac{1}{E_r} > 0. \quad (21)$$

Рассмотрим, наконец, случай, когда $E_r = 0$. При этом, как следует из (20), $y = 0$. То есть при $E_r \leq 1$ частица остается на дне.

Выпишем уравнение движения частицы по дну при $E_r < 1$, предполагая, что трение определяется по закону Кулона и G – коэффициент трения. В этом случае имеем

$$\begin{aligned} \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_q \frac{dv_x}{dt} &= G_* \pi r^2 (U - v_x)^2 - \\ &- \Phi \left[\frac{4}{3} \pi (\rho_q - \rho) g r^3 - K_{**} g U^2 \pi r^2 \right] \times \\ &\times \cos \alpha + \frac{4}{3} \pi (\rho_q - \rho) g r^3 \sin \alpha. \end{aligned} \quad (22)$$

Пренебрегая инерционным членом, получим оценку скорости частицы

$$\left(1 - \frac{v_x}{U}\right)^2 = \frac{\cos \alpha \varphi_{\tau} K_{**}}{G} \left(\frac{1}{E_r} - 1\right) - \frac{\sin \alpha}{K_{**} G} \frac{1}{E_r}. \quad (23)$$

Если α мало, то

$$\frac{v_x}{U} = 1 - \left[\frac{\varphi_{\tau} K_{**}}{G} \left(\frac{1}{E_r} - 1\right) \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (24)$$

При этом частица остается неподвижной, если

$$\frac{\varphi_{\tau} K_{**}}{G} \left(\frac{1}{E_r} - 1\right) \geq 1. \quad (25)$$

То есть неподвижными остаются частицы радиуса

$$r \geq \frac{3}{4} \left(1 + \frac{G}{\varphi_{\tau} K_{**}}\right) \frac{K_{**} U^2}{g \left(\frac{\rho_{\text{ч}}}{\rho} - 1\right)}. \quad (26)$$

Представленный анализ свидетельствует о том, что если эрозионное число $E_r < 1$, то покоившаяся на дне частица под воздействием вихря может либо двигаться, либо оставаться на месте. В процессе движения из-за трения о дно она истирается. Поэтому изменение массы частицы в единицу времени пропорционально силе трения

$$\frac{dm}{dt} = -\xi \left[\frac{4}{3} \pi r^3 (\rho_{\text{ч}} - \rho) g - K_{**} \pi r^2 \rho U^2 \right]. \quad (27)$$

Здесь $m = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_{\text{ч}}$, а ξ – коэффициент пропорциональности. Запишем это уравнение в виде

$$4\pi r^2 \rho_{\text{ч}} \frac{dr}{dt} = -\xi \left[\frac{4}{3} \pi (\rho_{\text{ч}} - \rho) g r^3 - K_{**} \rho U^2 \pi r^2 \right],$$

а затем приведем его к форме

$$\frac{dr}{dt} = -\xi \left[\frac{1}{3} \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{\text{ч}}}\right) g r - \frac{K_{**}}{4} \frac{\rho}{\rho_{\text{ч}}} U^2 \right]. \quad (28)$$

Интегрируя (28), получим решение в виде

$$\begin{aligned} \frac{1}{3} \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{\text{ч}}}\right) g r - \frac{K_{**}}{4} \frac{\rho}{\rho_{\text{ч}}} U^2 &= \\ &= \left[\frac{1}{3} \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{\text{ч}}}\right) g r_0 - \frac{K_{**}}{4} \frac{\rho}{\rho_{\text{ч}}} U^2 \right] e^{-\bar{\xi} t}, \end{aligned} \quad (29)$$

где $\bar{\xi} = \frac{\xi}{3} \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{\text{ч}}}\right) g$ с размерностью $\left[\frac{1}{c}\right]$. Это решение удобно записать так

$$\frac{r}{r_0} - E_{r_0} = (1 - E_{r_0}) e^{-\bar{\xi} t}. \quad (30)$$

Здесь r_0 – начальный радиус частицы, а E_{r_0} – исходное значение эрозионного числа

$$E_{r_0} = \frac{K_{**} \frac{\rho}{\rho_{\text{ч}}} U^2}{\frac{4}{3} g r_0 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{\text{ч}}}\right)}. \quad (31)$$

Из (30) видно, что закон истирания частицы близок к экспоненте.

Из рассмотренной модели следует, что если в потоке частица сначала находится на идеальной плоскости, то в последующем она может либо оставаться в покое, либо перемещаться по дну, истираясь, либо двигаться в подвешенном состоянии. Однако дно русла временного потока на склоне не является идеальной плоскостью и всегда имеет неровности, сопоставимые с размером частицы. Огибая эти выступы в процессе движения по дну, частица может получить вертикальную составляющую скорости и оторваться от дна, а через какое-то время вновь упасть с некоторой вертикальной составляющей скорости. При этом частица некоторое время находится в контакте с дном, после чего вновь отскакивает в поток. В результате в потоке появляются сальтирующие частицы, которые, истираясь, теряют массу. Поэтому через некоторое число скачков они переходят в категорию подвешенных в потоке.

Режим сальтирующих частиц можно создать искусственно, внеся их в поток, как в опытах, через поверхность. Остановимся подробнее на описании режима движения, когда частица с некоторой начальной скоростью v_0 на поверхности потока глубиной h падает на дно. Траектория движения в потоке и скорость удара частицы о дно определяются из уравнения (16). После удара частица некоторое время движется в контакте с дном, а затем отскакивает назад в поток с той же скоростью, с которой она падала. Исследования задачи взаимодействия частицы с поверхностью почвы представлены в работах по исследованию ветровой эрозии [Гендугов, Глазунов, 2007, 2009а, 2009б]. Не повторяя здесь постановки задачи, воспользуемся полученными в [Гендугов, Глазунов, 2007] решениями, модифицируя их применительно к склоновому потоку. При этом, как и в задаче об истирании частицы, движущейся по дну, принимается, что в периоде контакта она истирается пропорционально нормальной составляющей действия силы на дно, т. е. согласно уравнению

$$\frac{dm}{dt} = \bar{\theta} F_y \quad (\bar{\theta} = \text{const}). \quad (32)$$

Воспользуемся видом F_y из [Гендугов, Глазунов, 2007]:

$$F_y = \gamma \pi r^2 \rho_{\text{ч}} U^2 \left(\frac{v_{0y}}{U} \right)^{\frac{4}{5}} \sin K_{**} t, \quad (33)$$

где $K_{**} = \frac{v_{0y}}{\gamma_0 r \left(\frac{v_{0y}}{U} \right)^{\frac{4}{5}}}$, γ_0, γ – постоянные,

$$m = \frac{4}{3} \rho_q \pi r^3.$$

Время взаимодействия частицы с почвой определяется из (33) при условии $F_y = 0$, т. е. $t = \frac{\pi}{K_{**}}$.

Для решения (32) сделаем ряд упрощений: вместо переменной силы (33) будем пользоваться сред-

ним ее значением за период, вместо $\left(\frac{v_{0y}}{U} \right)^{\frac{4}{5}}$ будем для простоты рассматривать мало отличающуюся от нее величину $\frac{v_{0y}}{U}$. Наконец, будем определять v_{0y} при $y = 0$, $\cos \alpha = 1$ и в безынерционном приближении $\left(\frac{dv_y}{dt} \approx 0 \right)$. В этом случае

$$v_{0y} = \frac{K_{**} \rho U^2 r - \frac{4}{3} \left(\frac{\rho_q}{\rho} - 1 \right) g r^2}{6v}. \quad (34)$$

С учетом этих приближений выявляем, что период контакта $t_* = \gamma \frac{r}{U}$ уменьшается с уменьшением радиуса частицы, а уравнение истирания принимает вид

$$4\pi r^2 \rho_q \frac{dr}{dt} = \frac{\bar{\theta} \gamma_1}{6} \frac{\rho_q U \pi r^2}{v} \times \left[K_{**} U^2 r - \frac{4}{3} \left(\frac{\rho_q}{\rho} - 1 \right) g r^2 \right]. \quad (35)$$

После сокращений и перевода в безразмерный вид это уравнение запишем так

$$\frac{d\bar{r}}{dt} = -\theta \text{Re} \bar{r}^2 \left(1 - \frac{E_{r_0}}{\bar{r}} \right). \quad (36)$$

Здесь $\bar{r} = \frac{r}{r_0}$, r_0 – начальный радиус частицы,

$$\theta = \frac{\bar{\theta} \gamma_1}{18} \left(\frac{\rho_q}{\rho} - 1 \right) g \text{ с размерностью } \left[\frac{1}{c} \right], \text{Re}_0 = \frac{U r_0}{\nu},$$

$$E_{r_0} = \frac{K_{**} U^2}{\frac{4}{3} \left(\frac{\rho_q}{\rho} - 1 \right) g r_0}.$$

Уравнение (36) легко интегрируется

$$1 - \frac{E_{r_0}}{\bar{r}} = (1 - E_{r_0}) e^{-\omega t}.$$

Здесь $\omega = \theta \text{Re}_0 E_{r_0}$.

Записав это решение в форме

$$\bar{r} = \frac{E_{r_0}}{1 - (1 - E_{r_0}) e^{-\omega t}}. \quad (37)$$

убеждаемся, что за время контакта t_* частица истирается и ее радиус становится равным r_* . При этом сила давления на дно в момент отрыва соответствует r_* . После отскока частица радиуса r_* вновь падает на дно и силой давления, соответствующей r_* , начинает истираться в следующий период контакта. Иначе говоря, если последовательно суммировать промежутки времени контакта частицы с дном, опуская периоды ее движения в потоке, то решение (37) уравнения (35) определяет закон истирания сальтирующей частицы (рис.).

Уравнение (37) позволяет установить предельный радиус r_∞ истираемой частицы, который может быть достигнут в стационарном потоке в случае достаточной длины русла. Принимая ($t \rightarrow \infty$) из уравнения (37) получаем

$$\bar{r} = E_{r_0}, \quad (38)$$

из которого следует

$$r_\infty = r_0 E_{r_0}. \quad (39)$$

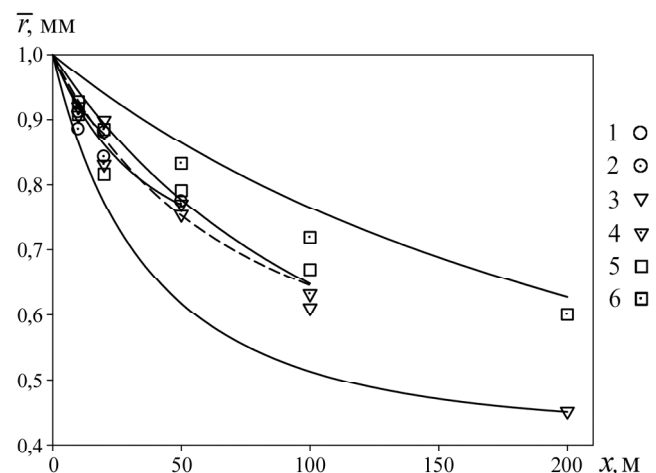


Рис. Зависимость радиуса истирающей частицы ($\bar{r}$, мм) от пройденного пути (x , м): 1–6 – средние экспериментальные значения по вариантам опыта (см. табл.), линии – расчет по уравнению (37) при значениях w и E_{r_0} из таблицы

Fig. Relationship between the radius of abrading particles ($\bar{r}$, mm) and the travel distance (x , m): 1–6 – mean empirical values by experiment variants (see number in the Table), lines are calculated according to the equation (37) at w and E_{r_0} values from the Table

Тем самым расширен физический смысл эрозионного числа, которое в данном случае выступает коэффициентом предельного истирания частицы в стационарном потоке.

Материалы и методы экспериментальных исследований. Для проверки разработанной теории провели опыты по измерению истирания агрегатов чернозема в зависимости от скорости потока и длины русла (табл.). Искусственное русло (гидравлический лоток) имело постоянные длину (10 м) и ширину дна (0,1 м). Для имитации естественной шероховатости ложа склоновых потоков дно лотка было оклеено окатанным гравием (диаметром 0,3–1,0 см). Поверх слоя гравия наносили смесь суглинка с клеем ПВА, которая заполнила пространство между камешками и покрыла их тонким сплошным слоем. Так формировали поверхность, сходную по рельефу и микрошероховатости с ложем склоновых потоков [Ларионов и др., 2007; Ларионов, 2008]. Во всех вариантах опыта стабильно выдерживали гидравлические параметры: уклон устанавливали от 2 до 5 градусов; расход воды – от 0,2 до 0,6 л/с; глубина потока вдоль русла была постоянной – 5 или 10 мм; средняя скорость – от 0,35 до 0,67 м/с [Ларионов, 2008].

Объект экспериментальных исследований – мезоагрегаты из пахотного горизонта выщелоченного чернозема (Воловский р-н, Тульская обл.). В работе [Ларионов и др., 2017] приведены основные физико-химические свойства и гранулометрический состав пахотного горизонта чернозема. Содержание физической глины, т. е. частиц с эффективным диаметром $<0,01$ мм, в почве равно 59,3%, т. е. пахотный горизонт исследованной почвы – легкоглинистый.

Почва была высушена и просеяна через сита с ячейками диаметром 10 и 1 мм. Фракцию почвенных агрегатов 1–10 мм капиллярно увлажняли в течение 12 часов, затем подвергали мокрому просеиванию (по методу Савинова) на сите с ячейками 1,66 мм. После нового высушивания были отобраны водопрочные агрегаты размером 2 и 4 мм. Из этих фракций набирали образцы – по 10 агрегатов в каждом. Навески взвешивали с точностью до 0,001 г, раскладывали на фильтровальную бумагу так, чтобы агрегаты не касались друг друга. Агрегаты капиллярно увлажняли в течение 12 часов, подавая воду снизу через фильтровальную бумагу [Ларионов и др., 2007; Ларионов, 2008].

Навеску водопрочных агрегатов известного среднего диаметра сливали (с высоты примерно 10 см, ограниченной высотой бортиков лотка) вместе с водой из чашки в поток в головной части лотка. Все транспортируемые потоком агрегаты попадали на сито с ячейками размером 0,25 мм у нижнего конца лотка. Уловленные агрегаты, подвергшиеся истиранию, либо высушивали и взвешивали, либо вновь подавали в поток в головной части лотка. Таким способом увеличивали время переноса агрегатов и пройденный ими путь (длину русла). Использовали следующие величины пути: 10, 20, 50, 100, 200 м. Сохранившиеся частицы агрегатов высушивали на бумажном фильтре и взвешивали. Разность между начальным и конечным весом образца рассматривали как потери агрегатов на истирание и разрушение до размеров менее 0,25 мм. В каждой серии, т. е. для каждой длины пути, опыты проводили в 3–6-кратной повторности [Ларионов, 2008].

Исходный радиус агрегатов рассчитывали как среднее из диаметров отверстий двух соседних сит, использованных для накопления каждой фракции агрегатов. Для опытов из этой фракции отбирали агрегаты, наиболее близкие по размеру к средней величине. Текущий радиус агрегатов в ходе переноса и истирания рассчитывали по сферической модели (при одинаковой плотности твердой фазы почвы, равной 2500 кг/м^3), используя исходную навеску и массу уловленных агрегатов после высушивания. Усредненные по вариантам опыта (см. табл.) значения нормированного радиуса

$\bar{r} = \frac{r}{r_0}$ в функции пройденного пути $x = tU$ приведены на рисунке.

Обсуждение результатов исследований. Поскольку потоки в опытах мелкие (диаметр частиц соизмерим с глубиной), необходимо определить значение y в (1). Имея в виду, что вихревая подъемная сила принимает максимальное значение у дна, а минимальное (нулевое) – на поверхности потока, используя простейший, линейный закон изменения подъемной силы с глубиной, приняли $y = h/2$. Из работ [Глазунов, Гендугов, 2000; Гендугов, Глазунов, 2009а, 2009б] взяли среднее значение $K_{**} = 0,06$ и приняли плотность твердой фазы агрегатов равной 2500 кг/м^3 . В результате в двух вариантах опыта из шести получили эрозионное число меньше единицы на всем пути потока, а в первом варианте – лишь на

Т а б л и ц а

Варианты и некоторые результаты опытов

№ опыта	Уклон, градус	Радиус r_0 , мм	Глубина h , мм	Расход, л/с	Скорость U , м/с	Коэффициент ω	Эрозионное число, E_{r_0}	Re_0 при $t = 10^\circ\text{C}$	$\theta \cdot 10^6$
1	2	1	10	0,5	0,51	0,0202	0,80	619	32,6
2	5	2	5	0,3	0,67	0,0155	0,69	1430	10,9
3	2	2	10	0,5	0,53	0,0063	0,43	707	8,9
4	3	2	10	0,6	0,57	0,0048	0,50	865	5,5
5	3	2	5	0,2	0,42	0,0009	0,27	346	2,6
6	2	2	5	0,2	0,35	0,0003	0,19	200	1,5

участке от нуля до 20 м, во втором – до 50 м, а в четвертом и пятом – до 100 м. Во всех вариантах значения ω достоверно определяются методом регрессионного анализа, что свидетельствует о совпадении теории истирания с опытом. Остальные варианты при определении констант (см. табл.) не учитывались, поскольку, согласно теории, при эрозионном числе больше единицы частица переносится потоком без контакта с дном. Измельчение таких частиц имеет своей причиной не истирание, а ударное разрушение в начальный момент подачи частиц в поток.

Полученные значения коэффициента ω закономерно изменяются с изменением эрозионного числа и числа Рейнольдса (см. табл.):

$$\omega = \theta \operatorname{Re}_0 E_{r_0}. \quad (40)$$

В рамках принятых допущений и ограничений впервые получено аналитическое решение задачи об истирании почвенных частиц в процессе переноса склоновым потоком в форме уравнений (30) и (37); экспериментально доказана справедливость уравнения (37) в случае переноса агрегатов чернозема, искусственно вводимых в поток. Качественная картина истирания (см. рис.) аналогична результатам эксперимента по измерению истирания гранулированных препаратов, покрытых полимерным защитным покрытием [Perfetti et al., 2012], для оценки которой нет теории, что приводит к использованию чисто эмпирических методов. Имея параметры (в случае достаточно глубоких потоков – только скорость) временных и постоянных русловых потоков и минимальные сведения о размываемых почвах, с его помощью можно оценить средний размер донных наносов в руслах на больших расстояниях.

Найденная зависимость еще раз подчеркивает исключительную роль эрозионного числа, которое представляет собой отношение подъемной силы к весу частицы в воде. Поскольку для опытов отбирались однородные агрегаты, в каждом варианте они характеризовались одним и тем же исходным значением эрозионного числа E_{r_0} . Если текущее значение эрозионного числа больше единицы, частица переносится потоком без истирания. И наоборот, если эрозионное число меньше единицы, частица переносится потоком сальтацией, с истиранием. Поскольку истирание сопровождается уменьшением

веса частицы и, соответственно, увеличением эрозионного числа, оно будет продолжаться только до тех пор, пока эрозионное число не превысит единицу. После этого частица будет переноситься потоком в подвешенном состоянии без истирания.

Установлено, что предельный размер истираемой частицы предопределен ее исходным размером r_0 и начальным эрозионным числом E_{r_0} , которое, согласно уравнению (39), является коэффициентом ее предельного истирания в стационарном потоке.

Истирание агрегатов, характеризующихся эрозионным числом больше единицы, в настоящих опытах объясняется разрушением при введении их в поток в головной части лотка. Этот же механизм действовал, очевидно, во всех случаях введения частиц в поток, внося ошибку в окончательный результат измерения степени истирания и в полученные эмпирические коэффициенты. Уменьшить эту ошибку можно путем изменения процедуры введения частиц в поток.

Существование тесной связи между коэффициентом ω и начальным эрозионным числом E_{r_0} позволяет считать коэффициенты уравнения (40) почвенными характеристиками истираемости, которые могут быть определены в опытах, аналогичных проведенным.

Выводы:

- в рамках гидравлического приближения впервые получено аналитическое решение задачи об истирании почвенных частиц в процессе переноса стационарным склоновым потоком в форме уравнений (30), (37) и (39);

- степень истирания, в виде отношения текущего радиуса частицы к исходному, определяется механическими свойствами частицы и соотношением гидравлических характеристик потока и частицы;

- свойства частицы учитываются двумя эмпирическими коэффициентами уравнения (38), а гидравлические характеристики потока и частиц – эрозионным числом;

- продемонстрирована полезность эрозионного числа, впервые введенного в ветроэрозионных исследованиях, и при моделировании водной эрозии;

- расширен физический смысл эрозионного числа, которое оказалось коэффициентом предельного истирания частицы в стационарном потоке.

Благодарности. Работа выполнена по плану НИР (ГЗ) Научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова и в рамках государственного задания МГУ (номер гос. регистрации: 115122210057-9) кафедры земельных ресурсов и оценки почв факультета почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова. Основные результаты статьи по праву принадлежат В.М. Гендугову, ведущему научному сотруднику кафедры волновой и газовой динамики механико-математического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, выдающемуся ученому, лауреату премии Совета Министров СССР и премии имени М.В. Ломоносова в области науки, бессменному руководителю межфакультетского семинара по применению методов механики в смежных науках, ушедшему из жизни до выхода статьи в свет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Гендугов В.М., Глазунов Г.П. Ветровая эрозия почвы и запыление воздуха. М.: Физматлит, 2007. 240 с.

Гендугов В.М., Глазунов Г.П. О единстве механизмов водной и ветровой эрозии почвы // Почвоведение. 2009а. № 5. С. 598–605.

Гендугов В.М., Глазунов Г.П. Подъемная сила в водном потоке, размывающем почву // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2009б. № 2. С. 32–36.

Глазунов Г.П., Гендугов В.М. О подъемной силе ветра, переноса почвенных частиц // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2000. № 3. С. 43–52.

Ларионов Г.А. Истирание почвенных агрегатов в склоновых потоках // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 16. / под ред. Р.С. Чалова. М., 2008. С. 74–83.

Ларионов Г.А., Бушуева О.Г., Добровольская Н.Г., Кирюхина З.П., Литвин Л.Ф., Максимова И.А. Разрушение почвенных агрегатов в склоновых потоках // Почвоведение. 2007. № 10. С. 1263–1269.

Ларионов Г.А., Добровольская Н.Г., Кирюхина З.П., Краснов С.Ф., Литвин Л.Ф., Горобец А.В., Судницын И.И. Влия-

ние плотности почвы, сопротивления разрыву и инфильтрации воды на скорость разрушения межагрегатных связей // Почвоведение. 2017. № 3. С. 354–359. DOI: 10.7868/S0032180X17010099.

Domokos G., Jerolmack D.J., Sipos A.Á., Török Á. How River Rocks Round: Resolving the Shape-Size Paradox, PLOS ONE, 2014, vol. 9, no. 2, e88657, DOI: 10.1371/journal.pone.0088657.

Le Bouteiller C., Naaïm-Bouvet F., Mathys N., Lavé J. A new framework for modeling sediment fining during transport with fragmentation and abrasion, J. Geophys. Res. Earth Surf., 2011, vol. 116, F03002, DOI: 10.1029/2010JF001926.

Perfetti G., Depypere F., Zafari S., van Hee P., Wildeboer W.J., Meesters G.M.H. Attrition and abrasion resistance of particles coated with pre-mixed polymer coating systems, Powder Technology, 2012, vol. 230, no. 11, p. 1–13, DOI: 10.1016/j.powtec.2012.04.009.

Wang J., Li Z., Cai C., Ma R. Particle size and shape variation of Ultisol aggregates affected by abrasion under different transport distances in overland flow, Catena, 2014, vol. 123, no. 4, p. 153–162, DOI: 10.1016/j.catena.2014.07.020.

Поступила в редакцию 16.07.2020

После доработки 18.10.2020

Принята к публикации 06.11.2020

G.P. Glazunov¹, G.A. Larionov²,
A.V. Gorobets³

MOVEMENT REGIMES AND MECHANISMS OF SOIL AGGREGATES DESTRUCTION IN THE PROCESS OF SOIL EROSION

An integrated model of slope soil erosion is hard to elaborate because of the up to billion-fold difference in scales of the processes involved. Therefore, the elements of the general theory of soil erosion should be developed with due consideration of their scale. The aim of the work was to apply the hydraulic approximation to obtain an analytical solution of the problem of soil aggregate size reduction as a result of attrition during transportation by a steady slope flow. To achieve it, we studied separation, transport, transformation and re-sedimentation of an individual soil particle (aggregate), initially resting on the bottom of a temporary water flow. Unlike empirical approaches and those based on arbitrarily introduced equations and statistical distributions, the study, as in the previous case of wind erosion, was carried out using the methods of multiphase media mechanics at mesoscale. Particle transformation is defined as its attrition due to repeated impact interaction with the bed of a temporary slope water flow. As a result, a novel analytical solution of the problem of soil aggregate size reduction due to attrition during transport by a steady slope flow has been found (in equations format) under the hydraulic approximation. It has been determined, that degree of abrasion, defined as a ratio of an actual soil particle radius to the initial one, depends on its mechanical properties and the relation between the hydraulic parameters of the flow and those of the aggregates. At this soil aggregate mechanical properties are represented by two empirical coefficients of the abrasion equation, while the hydraulic parameters of the flow and the aggregates are represented by the erosion number. As a result of theoretical solution, the physical meaning of the erosion number has been expanded; it appeared to be both a ratio of the vortex lift to the aggregate weight, governing the mode of aggregate motion in the flow, and a coefficient of its maximum abrasion during transportation by a steady water flow. The coefficients representing mechanical properties of aggregates abraded by water flow can be found empirically by experiments in hydraulic flumes, such as we used in our study.

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Soil Science, Department of Land Resources, Professor, D.Sc. in Biology; e-mail: glazng@mail.ru

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Makkaveev Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Leading Scientific Researcher, D.Sc. in Geography; e-mail: larionov425@mail.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Makkaveev Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Scientific Researcher, PhD in Biology; e-mail: GorobetsAV@geogr.msu.ru

Key words: destruction, abrasion, erosion number, vortex lift, aggregates stability, sediment transportation

Acknowledgments. The work was performed under the research plan of the Makkaveev Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes (Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University) and the State Assignment of the MSU (State registration no. 115122210057-9) for the Department of Land Resources and Soil Assessment of the Faculty of Soil Science, Lomonosov Moscow State University. The main results presented in the article were obtained by V.M. Gendugov, the Leading Scientific Researcher of the Department of Wave and Gas Dynamics of the Faculty of Mechanics and Mathematics, Lomonosov Moscow State University, a distinguished scholar, laureate of Prize of the USSR Council of Ministers and the Lomonosov Prize for science, a long-term leader of the interfaculty seminar on application of mechanics methods in related sciences, who passed away before the publication of the article.

REFERENCES

- Domokos G., Jerolmack D.J., Sipos A.A., Török Á. *How River Rocks Round: Resolving the Shape-Size Paradox*, PLOS ONE, 2014, vol. 9, no. 2, e88657, DOI: 10.1371/journal.pone.0088657.
- Gendugov V.M., Glazunov G.P. Pod'emnaya sila v vodnom potoke razmyvayushchem pochvu [The lifting force in water flow eroding the soil], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 17, Pochvovedenie*, 2009, no. 2, p. 32–36. (In Russian)
- Gendugov V.M., Glazunov G.P. Unity of mechanisms of water and wind erosion of soils, *Eurasian Soil Science*, 2009, vol. 42, no. 5, p. 553–560.
- Gendugov V.M., Glazunov G.P. *Vetrovaya erosiya pochvy i zapylenie vozduha* [Wind soil erosion and air dusting], Moscow, Fizmatlit Publ., 2007, 240 p. (In Russian)
- Glazunov G.P., Gendugov V.M. O pod'emnoj sile vetra perenosyashchego pochvennye chastitsy [The lifting force of wind transporting soil particles], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 17, Pochvovedenie*, 2000, no. 3, p. 43–52. (In Russian)
- Larionov G.A. [Destruction of soil aggregates in slope flows], *Eroziya pochv i ruslovye protsessy* [Soil erosion and channel processes], iss. 16, R.S. Chalov (ed.), Moscow, 2008, p. 74–83. (In Russian)
- Larionov G.A., Bushueva O.G., Dobrovol'skaya N.G., Kiryukhina Z.P., Litvin L.F., Maksimova I.A. Destruction of soil aggregates in slope flows, *Eurasian Soil Science*, 2007, vol. 40, no. 10, p. 1128–1134.
- Larionov G.A., Dobrovol'skaya N.G., Kiryukhina Z.P., Krasnov S.F., Litvin L.F., Gorobets A.V., Sudnitsyn I.I. Effect of soil density, tensile strength and water infiltration on the rupture rate of interaggregate bonds, *Eurasian Soil Science*, 2017, vol. 50, no. 3, p. 335–340.
- Le Bouteiller C., Naaim-Bouvet F., Mathys N., Lavé J. A new framework for modeling sediment fining during transport with fragmentation and abrasion, *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, 2011, vol. 116, F03002.
- Perfetti G., Depypere F., Zafari S., van Hee P., Wildeboer W.J., Meesters G.M.H. Attrition and abrasion resistance of particles coated with pre-mixed polymer coating systems, *Powder Technology*, 2012, vol. 230, no. 11, p. 1–13.
- Wang J., Li Z., Cai C., Ma R. Particle size and shape variation of Ultisol aggregates affected by abrasion under different transport distances in overland flow, *Catena*, 2014, vol. 123, no. 4, p. 153–162.

Received 16.07.2020

Revised 18.10.2020

Accepted 06.11.2020