

Г.А. ЛАРИОНОВ, А.В. ГОРОБЕЦ

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

О МЕХАНИЗМЕ ЭРОЗИИ СВЯЗНЫХ ПОЧВ И ГРУНТОВ*

Ц.Е. Мирцхулава [1970], впервые предложивший физически обоснованное уравнение эрозии, исходил из представления, что придонная скорость водных потоков не превышает пороговых значений для связных почв и грунтов и поэтому отрыв частиц почвы водным потоком может иметь место лишь при условии ослабления сил сцепления между частицами почвы на два порядка величины. Разрушение связей между частицами по его представлению носит усталостный характер и обусловлено возвратно-поступательными колебаниями частиц почвы, выступающих за пределы переходного слоя воды в область турбулентного течения, где скорость постоянно

* Выполнено по программе Президента РФ для поддержки ведущих научных школ (проект НШ-1010.2014.5)

пульсирует. Несколько позже Г.Р. Фостер [Foster, 1982] предложил свой вариант физически обоснованной модели эрозии, в которой проблема несоответствия между касательным напряжением на дне потока и сопротивлением почвы разрыву не рассматривается.

М.А. Нearing [Nearing et al., 1991a], исследовавший сопротивление образцов почвы нарушенного сложения разрыву, показал, что касательные напряжения на дне склоновых потоков на три порядка меньше, чем сопротивление почвы разрыву, а отрыв частиц почвы потоком согласно его представлениям происходит в точках срыва вихрей, где касательное напряжение [Grass, 1970] в 150 раз выше средней величины. Срыв вихрей со дна потока носит случайный характер и поэтому, модель эрозии, предложенная М.А. Нearingом [Nearing, 1991b], носит вероятностный характер.

В упомянутых выше моделях прослеживается несоответствие между силами межагрегатного сцепления, удерживающими частицы почвы в покое и гидравлическими силами, вызывающими их отрыв. В модели Ц.Е. Мирцхулавы [1970] сила сцепления почвы уменьшается в результате усталостного разрушения межагрегатных связей на два порядка, в то время как поток может срывать частицы связной почвы при тысячекратном уменьшении сцепления. Также по определению поток не способен срывать частицы почвы в точках срыва вихрей, где касательное напряжение на два порядка выше средней величины. Для отрыва частиц почвы потоком в точках срыва касательное напряжение должно превышать среднее значение на три порядка. Между тем обе модели при адекватной параметризации показывают удовлетворительное описание результатов экспериментальных данных. Таким образом, можно полагать, что существует некий, еще неизвестный механизм разрушения межагрегатных связей в почвах и грунтах. Известно, что разрыхленная почва со временем уплотняется и консолидируется, что приводит к увеличению ее противозрозионной стойкости. При высыхании увлажненной почвы ее частицы под действием капиллярных сил сближаются и прижимаются друг к другу. Этот процесс протекает более активно при приложении к почве отрицательного давления (сосущей силы) [Nearing 1991a]. Можно предположить, что при увлажнении почвы под слоем воды, капиллярные силы в этом случае отсутствуют, происходят явления обратные консолидации. Известно, что при погружении сухой почвы в воду связанный грунт частично или полностью распадается на отдельные части, что объясняют расклинивающим эффектом водной пленки на поверхности почвенных агрегатов и действием пузырьков заземленного в порах воздуха [Качинский, 1970].

Известны и другие явления, которые не имеют объяснения в рамках известных физически обоснованных моделей эрозии. Так согласно этим моделям при прочих равных условиях интенсивность смыва почвы в модельных опытах должна находиться в линейной зависимости от активного фактора. В гидромеханической модели эрозии [Мирцхулава, 1970] это разность между единицей и отношением квадрата придонной скорости к квадрату пороговой величины скорости. В гидрофизической модели эрозии [Ла-

рионов, Краснов, 2000] смыв пропорционален кубу скорости в придонной области потока толщиной в 1 см в диапазоне скоростей превышающих пороговое значение более чем в 1,5-2 раза (рис. 1).

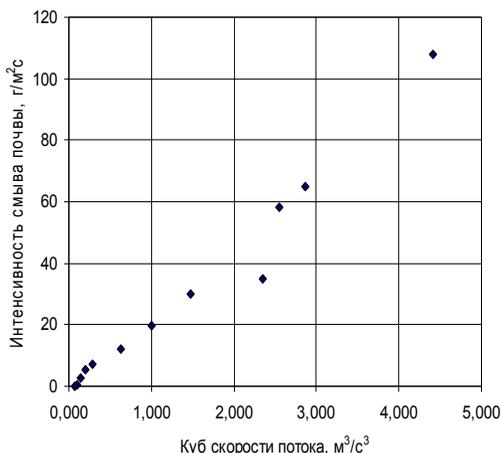


Рис. 1. Зависимость между кубом скорости потока и скоростью размыва модельных образцов почвы плотностью 1,2 г/см³.

Однако при определении скорости размыва образцов почвы с более высокой плотностью выяснилось, что линейная зависимость между кубом скорости потока и смывом при достижении некоторой скорости нарушается (рис. 2) и при этом затраты энергии потока на смыв почвы многократно увеличиваются. В рамках существующих представлений о механизме эрозии почв объяснить эти явления не представляется возможным [Ларионов и др., 2012].

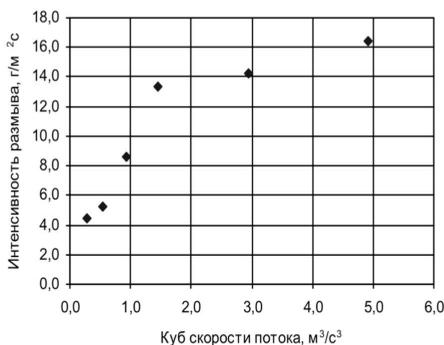


Рис. 2. Связь между скоростью размыва модельных образцов почвы плотностью 1,5 г/см³ и кубом скорости потока.

Случай подсказал направление, в котором может быть найдено решение этой проблемы. При исследовании размыва почвы на гидравлических

лотках обычно в целях экономии используется некоторый объем воды, величина которого определяется конструктивными особенностями оборудования и техническими возможностями исследовательского коллектива. В нашем случае использовался небольшой объем воды – около 40-50 литров. В процессе работы механическая энергия, придаваемая воде насосом, превращалась в тепловую, в результате чего при проведении серии экспериментов с постоянной скоростью воды в лотке и с образцами почвы одинаковой плотности, температура воды, как показали измерения, поднялась с 13-14 до 25-30 градусов. Результаты показали, что в каждом последующем эксперименте скорость размыва была, выше, чем в предыдущем. Тогда была поставлена серия экспериментов для подтверждения случайно подмеченного явления [Ларионов и др., 2014]

Анализ влияния температуры вода на скорость размыва образцов в диапазоне от 0 до 25⁰С с шагом 5 градусов показал, что при увеличении температуры воды на 10 градусов эродируемость почвы увеличивается в 1,5-1,6 раза, что практически укладывается в рамки правила Вант-Гоффа, которое отражает влияние скорости движения молекул, реагирующих веществ, частоты и силы их соударений, на скорость реакции (рис. 3). Из этого следует, что разрушение связей между частицами почвы – это результат действия не гидравлических сил, а скорее кинетической энергии молекул воды. Молекулы воды вследствие теплового [Броуновского движения] проникают в область межагрегатных контактов и притягиваются положительной или отрицательной стороной диполя к поверхности почвенной частицы. По мере накопления молекул воды в области межагрегатных контактов расстояние между агрегатами увеличиваются настолько, что короткодействующие Ван-дер-Вальсовы силы исчезают и силы сцепления между агрегатами пропадают.

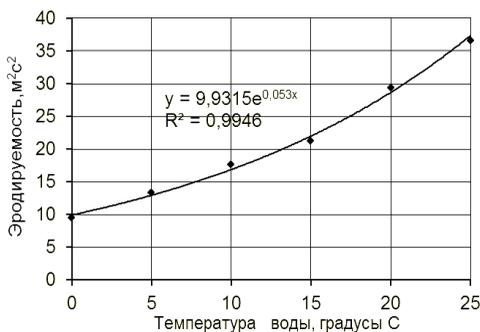


Рис. 3. Зависимость эродируемости почвы от температуры воды.

Это предположение было проверено экспериментально [Ларионов и др., 2014]. Для эксперимента использовали монозернистые (1-2мм в диаметре) образцы черноземной почвы плотностью 1,3 г/см³.

Для оценки роли воды как вещества, участвующего в нарушении связей между частицами почвы, была принята следующая методика проведения

эксперимента. Вода подавалась в лоток с паузами, в продолжении которых поток воды отсутствовал, но почвенный образец находился под слоем воды 1 см. Эксперимент начинался с паузы. В одном – двух сантиметрах ниже образца помещали глухую перемычку высотой несколько более сантиметра и наливали воду, в количестве, обеспечивающем необходимую глубину воды. Такая глубина выдерживалась и в потоке. После паузы следовала активная фаза эксперимента – перемычка снималась и включался насос. Включение насоса производилось с таким расчетом, чтобы к моменту удаления перемычки лобовая часть потока достигала образца почвы. Вода подавалась в лоток заданное время. Затем насос отключался за несколько секунд до начала следующей паузы, с таким расчетом, чтобы тыльная часть потока оказалась у кассеты с образцом, когда наступал момент установки перемычки. Образцы испытывались на скорость размыва при пяти различной длительности паузах – 1, 2, 3, 4 и 5 минут. При каждой длительности паузы образцы испытывались при различной продолжительности активных фаз: 15, 30 и 60 секунд. Каждый эксперимент продолжался до полного размыва образца. При всех сочетаниях пауз и активных фаз эксперименты проводились в 4-5 кратной повторности. В качестве контроля служили опыты, проводившиеся по обычной методике – без пауз. Всего было испытано 65 образцов.

Результаты экспериментов приведены в таблице 1. С увеличением длительности пауз суммарная продолжительность времени активной части эксперимента сокращается.

Таблица 1. Влияние продолжительности паузы и размыва на интенсивность смыва почвы модельных образцов

Продолжительность паузы, мин.	Продолжительность размыва, сек.	Интенсивность размыва		
		M, г/с·м ²	σ , г/с·м ²	C _v , %
0	-	14,0	5,6	39,7
1	15	140,2	32,7	23,3
1	30	61,6	12,7	20,7
1	60	31,1	4,5	14,4
2	15	165,0	55,4	33,6
2	30	66,8	18,0	27,0
2	60	50,5	13,5	26,8
3	15	211,4	48,0	22,7
3	30	93,8	30,9	33,0
3	60	61,4	10,1	16,4
4	15	196,0	58,4	29,8
4	30	98,0	16,2	16,5
4	60	67,3	30,6	45,5
5	15	173,0	44,1	25,5
5	30	110,5	17,3	15,7
5	60	68,1	19,3	28,3

Примечание: M – среднее арифметическое значение, σ – среднее квадратическое отклонение, C_v – коэффициент вариации

Соответственно увеличивается скорость размыва, так как захват частиц, лишившихся связи с соседними, и их вынос за пределы кассеты совершается за счет кинетической энергии потока. Визуальные наблюдения показывают, что после каждой паузы в первые мгновения после пуска воды происходит массовый захват частиц почвы (рис. 4). Затем этот процесс резко замедляется и в оставшуюся часть активной фазы можно лишь эпизодически наблюдать срыв отдельных частиц или нескольких практически одновременно. После очередной паузы картина повторяется вновь и вновь до тех пор, пока из кассеты не смоются последние остатки почвы (рис. 5).

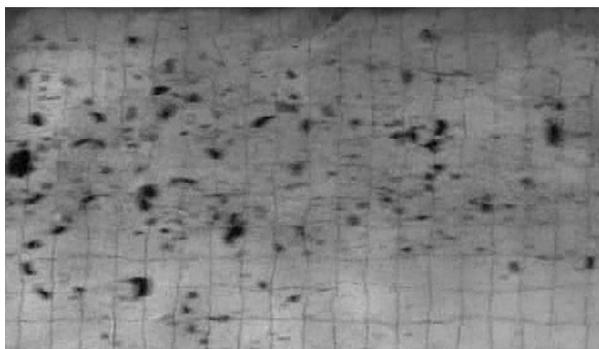


Рис. 4. Вид на лоток ниже кассеты с образцом в первые секунды после пуска воды после очередной паузы. В поле зрения – масса сорванных частиц почвы.

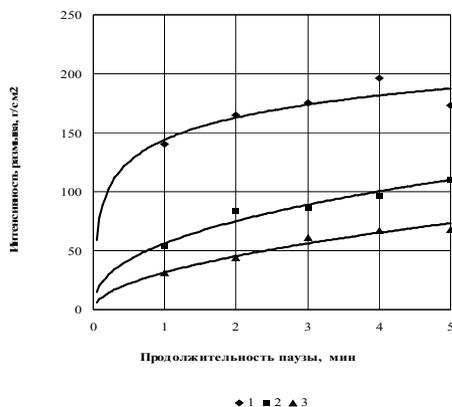


Рис. 5. Зависимость интенсивности размыва образцов в зависимости от продолжительности пауз и активной части эксперимента, продолжительностью: 15 с – 1; 30 с – 2; 60 с – 3.

Такой характер смыва по нашему мнению можно объяснить только тем, что ведущую роль в нарушении связей между частицами играют силы негидравлического генезиса, а именно силы межмолекулярного взаимодей-

ствия, которые, надо полагать, действуют как во время паузы, так и в активную фазу эксперимента.

Во время паузы связи между частицами почвы, очевидно, нарушаются, но визуально этот процесс внешне практически не заметен, частицы почвы не меняют своего положения и остаются на месте. Факт нарушения связей между частицами почвы обнаруживается в первые же мгновения после появления потока – все частицы с нарушенными связями захватываются потоком и выносятся за пределы кассеты. Процесс разрушения связей между частицам конечно продолжается на поверхности почвы и под слоем воды в потоке, тем более что согласно представлениям гидравлики на ложе потока существует тонкий слой воды, в котором отсутствует направленное движение молекул воды, но при этом сохраняется тепловое движение в результате которого и происходит очевидно нарушение связей между частицами почвы.

С ростом продолжительности паузы отчетливо прослеживается уменьшение скорости размыва образца при любой исследованной длительности активной фазы. Это очевидно обусловлено замедлением процесса разрушения связей между частицами почвы водой как химическим веществом дипольного строения по мере продвижения его с поверхности вглубь почвенной массы и накоплением на поверхности частиц лишившихся связи с нижележащими слоями почвы. Всё это свидетельствует о ведущей роли сил негидравлического происхождения в процессе нарушения связей между частицами почвы.

Поскольку прямое определение перечисленных параметров опытным путем на гидравлических лотках процедура очень трудоемкая, в эрозиоведении много внимания уделялось, легко определяемым почвенным параметрам, которые можно использовать для расчета таких эрозионных характеристик почв как эродируемость, критическая скорость потока, средний размер почвенных агрегатов, набор которых в каждом конкретном случае определяется эрозионной моделью.

Нами также проводился поиск почвенных параметров, которые могли бы использоваться для определения эрозионных характеристик и в первую очередь для определения эродируемости. В частности для этой цели исследовали связь между такими почвенными параметрами как плотность почвы, площадь межагрегатных контактов и сопротивление образцов почвы разрыву. Между перечисленными парами параметров отмечается почти линейная зависимость с высокими коэффициентами корреляции.

На рис. 6 в качестве примера представлена зависимость между плотностью почвы и сопротивлением почвы разрыву. Однако в свете представления о природе разрушения связей между почвенными агрегатами как результата результате межмолекулярного взаимодействия частиц почвы в присутствии достаточного количества воды, представляется логичным искать факторы, определяющие интенсивность разрушения межагрегатных связей в водных свойствах почвы. Важнейшим для решения нашей задачи представляется интенсивность впитывания воды в почву, так как только

после прохождения фронта промачивания в почве может начаться процесс разрушения межагрегатных связей. В связи с этим определяли скорость впитывания воды в модельные образцы почвы различной плотности. Результаты исследования приведены в таблице 3. Зависимость скорости разрушения межагрегатных связей от плотности образцов почвы и интенсивности впитывания воды приведена на рис. 7. Из рис. 7. следует, что зависимость между впитыванием и скоростью разрушения межагрегатных связей описывается линейной функцией, а между плотностью и разрушением межагрегатных связей зависимостью – степенная. В нашем случае линейная зависимость физически более обоснована.

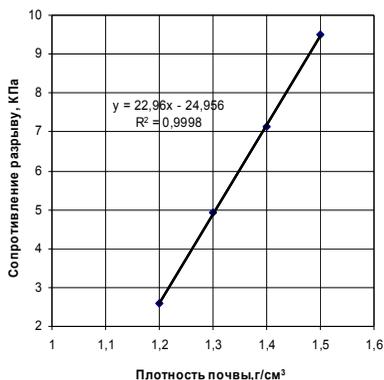


Рис. 6. Зависимость между плотностью и сопротивлением модельных образцов почвы разрыву.

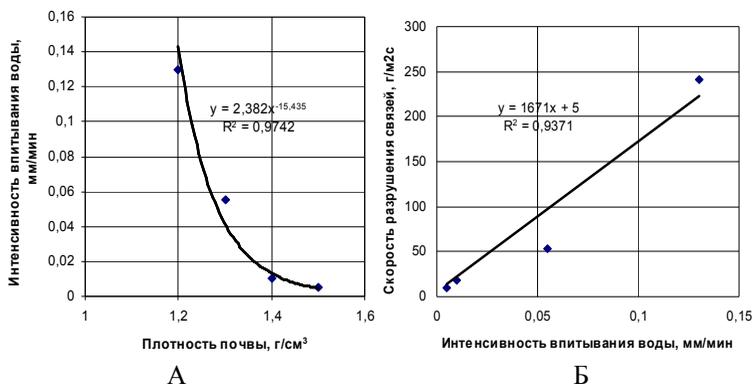


Рис. 7. Связь плотности почвы (А) и интенсивности впитывания воды (Б) со скоростью разрушения межагрегатных связей.

Таким образом, разрушение связей между почвенными агрегатами, происходящее в результате межмолекулярного взаимодействия, является ведущим процессом в механизме эрозии связных почв и грунтов. Без этого явления эрозия связных почв и грунтов была бы невозможна. Чтобы потоки

могли без участия сил межмолекулярного взаимодействия совершать отрыв почвенных частиц, их скорость должна превышать 30-35 м/с. Такая скорость в естественных условиях невозможна.

В свете сказанного находит логическое объяснение резкое выполаживание линии тренда на графиках зависимости интенсивности смыва от куба скорости потока, что ясно прослеживается на рис. 2. Разрушение межагрегатных связей в почве происходит при ее полном (выше капиллярной влагоемкости) водонасыщении. В результате теплового движения молекулы воды проникают в области межагрегатных контактов, что в конечном итоге приводит к увеличению расстояния между смежными агрегатами и, вследствие этого, к прекращению действия короткодействующих сил Ван-дер-Вальса между почвенными частицами. После полного исчезновения сил сцепления между частицами почвы поток захватывает их как свободно лежащие на дне потока песчинки. Таким образом, эрозия связных почв и грунтов – это двухкомпонентный процесс. Скорость разрушения связей между почвенными частицами определяется площадью межагрегатных контактов и температурой воды, а также скоростью поступления воды к фронту промачивания почвы, которая в свою очередь зависит от плотности почвы. По мере распространения разрушения межагрегатных связей вглубь почвы скорость процесса замедляется (табл. 2, рис. 6) и может остановиться вследствие пригружения вышележащим слоем с уже разрушенными связями.

Захват частиц почвы, лишившихся связей с соседними частицами, потоком аналогичен захвату частиц песка и поэтому интенсивность процесса пропорциональна кубу скорости потока в придонном слое [Ларионов и др., 2010]. В области, где скорость разрушения межагрегатных связей больше скорости захвата частиц потоком, то интенсивность размыва будет пропорциональна кубу скорости потока. Следует отметить, что смыв частиц, снижая эффект пригружения, способствует ускорению процесса разрушения межагрегатных связей. С момента, когда скорость разрушения межагрегатных связей становится меньше потенциальной способности потока к захвату частиц, темп эрозии лимитируется разрушением межагрегатных связей.

Можно также предположить, что в области высоких скоростей поток способен срывать частицы почвы не полностью лишившихся связей с нижележащей почвой. Однако результаты исследования эродированности образцов черноземной почвы в широком диапазоне скоростей (до 6,8 м/с) не подтвердили выше высказанное предположение.

Еще два любопытных явления, экспериментально установленных нами, вытекает из положения о негидравлическом генезисе разрушения связей между частицами почвы. В 1946 году И.Ф. Бурлай [1946] исходя из того, что закон Эри, согласно которому для любой скорости потока можно подобрать такую частицу, приходящую в движение при этой скорости, противоречит экспериментальным данным, высказал гипотезу об увеличении скорости трогания частиц наносов с ростом гидростатического давления.

Экспериментальная проверка этой гипотезы была проведена нами на почвенных образцах плотностью $1,3 \text{ г/см}^3$ в гидравлической трубе, дав-

ление в которой изменяли от 0 до 1,5 бар при постоянной скорости течения воды.

Результаты опыта свидетельствуют о том, что гидростатическое давление не распространяется в область межагрегатных контактов и поэтому частицы почвы прижимаются к нижележащим смежным частицам. Вследствие этого продвижение молекул воды в область межагрегатных контактов замедляется, и соответственно замедляется и скорость разрушения связей между частицами, что является обязательным условием эрозии связанных грунтов.

Таблица 2. Статистические показатели сопротивления почвы разрыву (кПа)

Плотность почвы, г/см ³	M	M _{сд}	min	max	δ	C _v , %
1,2	2,58	2,72	1,63	3,95	0,72	27,7
1,3	4,94	5,15	2,47	6,96	1,14	23,1
1,4	7,14	7,23	5,90	8,90	0,85	11,9
1,5	9,50	9,50	6,97	13,1	1,85	19,5

M – среднее; M_{сд} – медиана; min, max – минимальные и максимальные значения; δ – стандартное отклонение; C_v – коэффициент вариации.

Таблица 3. Плотность образцов почвы и интенсивность впитывания.

Плотность почвы, г/см ³	1,2	1,3	1,4	1,5
Интенсивность впитывания воды, мм/мин	0,13	0,055	0,-1	0,005

Еще одно проявление установленного нами двухкомпонентного механизма эрозии наблюдалось при исследовании влияния угла атаки струи вода на скорость размыва почвы. Эксперимент проводили на установке подающей воду в виде струи. В эксперименте угол подхода струи к поверхности образца изменяли с шагом 15 градусов. Начальный угол составлял 2,5 градуса. Результаты эксперимента представлены на рис. 9.

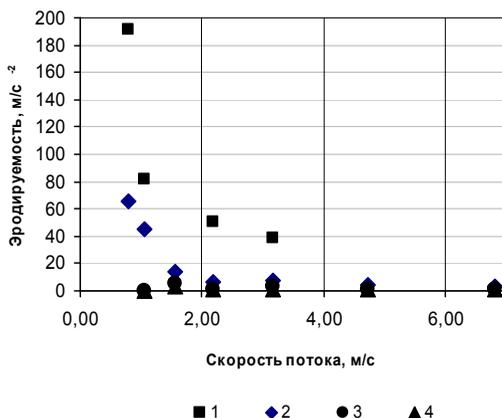


Рис. 8. Эродируемость образцов почвы различной плотности в широком диапазоне скоростей. Плотность 1 – 1,2; 2 – 1,3; 3 – 1,4; 4 – 1,5 г/см³.

Максимальная скорость размыва отмечалась при угле атаки в 45 градусов. Объяснение этому дается на рис. 10. При наиболее плотной гексагональной упаковке зерен грунта динамический напор распространяется на максимальную глубину при угле атаки в 45 градусов. Следовательно, в этом случае вода проникает в грунт при прочих равных условиях на большую глубину и в большем объеме почвы одновременно вызывает разрушение связей между частицами, что и является причиной ускоренного размыва.

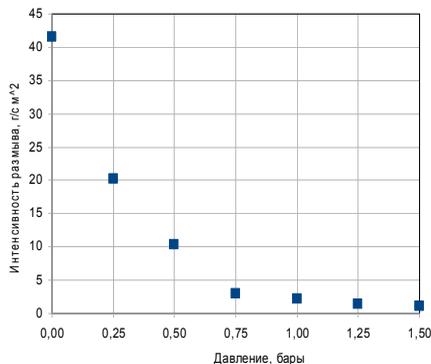


Рис. 9. Влияние гидростатического давления на скорость размыва почвы.

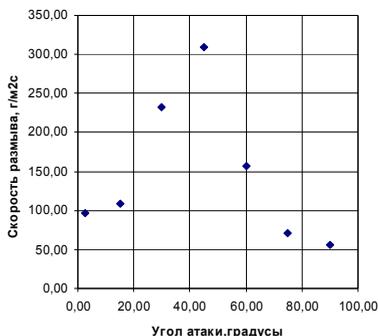


Рис. 10. Влияние угла атаки на скорость размыва зернистой почвы.

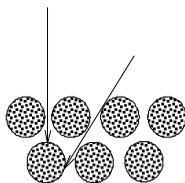


Рис. 10. Схема распространения динамического напора в зернистом грунте с гексагональной упаковкой.

Более чем в три раза меньшая скорость размыва при угле атаки в 90 градусов объясняет динамическим придавливанием частиц почвы к нижележащим смежным частицам, что ведет к замедлению разрушения межагрегатных связей и соответственно к снижению скорости размыва почвы.

Таким образом, впервые было установлено, что разрушение связей между частицами почвы и связного грунта происходит не за счет водного потока, а в результате взаимодействия почвенных частиц с водой на молекулярном уровне. В результате проникновения воды в область контактов между агрегатами расстояние между ними увеличивается настолько, короткодействующие силы Ван-дер-Ваальса, обеспечивающие сцепление, становятся исчезающе малыми и поток захватывает их как свободно лежащие на дне песчинки. Исследование скорости разрушения связей между частицами почвы показало, что она находится в линейной зависимости от скорости

впитывания воды в почву, поэтому она может служить индикатором податливости почв эрозии.

Установлено также, что в области малых скоростей потока, темпы нарушения связей между частицами почвы, превышает способность потока захватывать свободно лежащие на дне потока частицы. В области высоких скоростей потоков темпы эрозии определяются преимущественно интенсивностью разрушения межагрегатных связей, хотя скорость эрозии в этом случае заметно увеличивается с ростом скорости, так как поток начинает срывать частицы с остаточными величинами сцепления.

ЛИТЕРАТУРА

Бурлай И.Ф. О начальной скорости донного влечения. Метеорология и гидрология. № 6. 1946.

Ларионов Г.А., Краснов С. Ф. Вероятностная модель размыва почв и связных грунтов //Почвоведение. 2000. № 2.

Ларионов Г.А., Литвин Л.Ф., Краснов С.Ф., Добровольская Н.Г., Кирюхина З.П. Экспериментальные исследования взаимодействия потоков и почвогрунтов в области высоких скоростей//Маккавеевские чтения 2011. М.: Географический факультет МГУ. 2012 .

Ларионов Г.А., Бушуева О.Г., Добровольская Н.Г., Кирюхина З.П., Литвин Л.Ф., Краснов С.Ф. Влияние температуры воды и влажности почвы на эродиремость образцов чернозема (модельный опыт). // Почвоведение. 2010. №14.

Ларионов Г.А., Бушуева О.Г., Добровольская Н.Г., Кирюхина З.П., Литвин Л.Ф., Краснов С.Ф. Оценка вклада сил негидравлической природы в нарушение в нарушение связей между почвенными частицами. // Почвоведение 2014. №12.

Качинский Н.А. Физика почвы. Часть 2. Водно-физические режимы и свойства почв. М.: 2.Высшая школа»,1970.

Мирихулава Ц. Е. Инженерные методы расчета и прогноза водной эрозии. М.: Колос. 1970.

Foster G. R. Modeling the erosion process. // Hydrlogic modeling of small watersheds. Eds. C.T. Haan, H.P. Johnson, D.L. Brakensiek. ASAE monogr. # 5. St. Joseph, 1982.

Grass A.J. Initial instability of fine bed sand. J . Hydraulics Div., ASCE 96: 1970.

Nearing M. A. A probabilistic model of soil detachment by shallow turbulent flow. // Trans. ASAE. 1991b.

Nearing M.A., Parker S.C., Bradford J.M., and Elliot W.J. Tensile Strength of Thirty-Three Saturated Repacked Soils //Soil Science Society of America Journal. Vol.55. no.6. 1991a.