

УДК 631.4

ВЛИЯНИЕ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ НА РАЗМЫВ МОДЕЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ ПОЧВЫ***© 2015 г. Г. А. Ларионов, О. Г. Бушуева, Н. Г. Добровольская, З. П. Кирюхина, С. Ф. Краснов, Л. Ф. Литвин***Географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, 119991, Москва, Ленинские горы
e-mail: larionov425@mail.ru*

Поступила в редакцию 05.02.2014 г.

Статья посвящена теоретическому анализу и экспериментальному исследованию соотношения донной и боковой эрозии в мелководных склоновых потоках. Результаты анализа, проведенного по соотношению срывающихся частиц почвы сил и удерживающих ее в покое, показали, что при близкой к пороговой величине скорости потока размыв боковой стенки русла многократно превышает донный размыв. С увеличением скорости потока различия в темпах размыва дна и боковых стенок ручейка сглаживаются. Скорость бокового размыва сильно зависит от угла наклона бортика ручейков. Экспериментальные исследования влияния угла наклона поверхности образца к горизонту полностью подтвердили теоретические выводы. Следует иметь в виду, что в естественных условиях боковой размыв, конечно, ограничивается и законами гидравлики. С расширением русла при прочих равных условиях за счет бокового размыва ширина потока растет и, соответственно, его скорость уменьшается до значений ниже пороговой величины, в результате чего размыв русла прекращается.

Ключевые слова: донная эрозия, боковая эрозия, срыв частиц почвы с наклонной поверхности почвенного образца.

DOI: 10.7868/S0032180X15070072

ВВЕДЕНИЕ

В экспериментальных исследованиях по водной эрозии испытуемый образец почвы, как правило, располагают на дне гидравлического лотка. Полученные таким образом результаты дают представление о глубинной эрозии. Однако в наиболее распространенном типе эрозии – ручейковой эрозии, происходит не только врезание русла ручейков, но и расширение его за счет так называемой боковой эрозии – размыва их бортов. Физическому моделированию боковой эрозии практически не уделялось внимания. Настоящая работа посвящена боковому размыву, но в специфических условиях косоугольного удара струи о стенку ручья. При подходе оси потока к борту ручья под острым углом имеет место гидромониторный эффект, на который впервые указал Маккавеев [7]. Благодаря этому, темп размыва почвы на вогнутых берегах ручьев усиливается пропорционально кубу синуса угла подхода оси струи к берегу [1]. Но и при отсутствии изгибов в руслах ручьев есть

основания полагать, что размыв бортов может протекать быстрее, чем ложа ручья, так как при захвате частицы со дна потока приходится преодолевать силу ее веса, а на боковой стенке вес частицы напротив способствует ее отрыву. Необходимость учета этого момента стала совершенно очевидной после выяснения механизма разрушения связей между частицами почвы в процессе эрозии. Как было установлено ранее, гидратация почвы приводит к появлению сил отталкивания ориентационного характера между частицами почвы, и соответственно к нарушению связей между ними, и поток лишь захватывает частицы, совершая работу только по подъему частиц и приданию им поступательного движения [3].

Целью работы является теоретический анализ бокового размыва и экспериментальное исследование смыва модельных образцов почвы, поверхность которых расположена под различными углами наклона к горизонту.

Рассмотрим подход Лелявского [6], предложенный для оценки размыва речных берегов. Согласно этому подходу, размыв отлогого берега на

* Работа выполнена при поддержке Программы президента для поддержки ведущих научных школ, проект НШ-1010.2014.

прямолинейном участке является линейной функцией касательного напряжения

$$\tau = \rho g H I, \quad (1)$$

где τ – касательное напряжение, ρ – плотность воды, g – ускорение силы тяжести, H – глубина, I – уклон. Из этого следует, что борта ложа потока должны быть вертикальными и даже нависающими, но, поскольку борта рек обычно сложены несвязными или слабосвязными песками, они осыпаются, образуя борт крутизной равной углу внутреннего трения водонасыщенного грунта. При этом скорость размыва дна русла должна опережать скорость размыва бортов. Как видно, в подходе Лелявского [6] не принимается во внимание, что при захвате частиц на дне потоку приходится преодолевать силу тяжести, в то время как при захвате частицы с борта сила тяжести или ее составляющая, в случае не вертикальности борта, способствуют процессу захвата частицы потоком воды.

Мирицхулава также уделил внимание проблеме боковой эрозии, но в масштабе макрорусел. Детально не анализируя процесс боковой эрозии, он полагал, что площадь поперечного сечения стабилизированного русла потока следует определять по морфологическим зависимостям с “учетом физико-технических показателей сопротивления грунтов”, слагающих русло водотока [8].

Рассмотрим иной подход к влиянию силы тяжести частиц на размыв боковой стенки русла потока. Запишем силы (F), действующие в потоке на частицу, в следующем виде:

$$F = \rho_w k_{if} v^2 d^2 - \cos \alpha (\rho_p - \rho_w) \mu g d^3, \quad (2)$$

где ρ_w – плотность воды, k_{if} – обобщенный коэффициент лобового давления и подъемной силы, v – скорость потока, d – диаметр частицы почвы, α – угол наклона поверхности образца к горизонту, ρ_p – плотность почвенной частицы, μ – коэффициент трения скольжения, g – ускорение силы тяжести. Разделив обе части уравнения 2 на первый член правой его части, получим следующее безразмерное соотношение

$$\frac{F}{\rho_w k_{if} v^2 d^2} = 1 - \frac{\cos \alpha (\rho_p - \rho_w) \mu g d}{\rho_w k_{if} v^2}, \quad (3)$$

в левой части которого числитель есть величина постоянная при любом положении поверхности образцов относительно горизонта, если скорость потока и размер частиц почвы не изменяются. Как следует из гидрофизической модели эрозии [2, 5], смыв пропорционален кубу скорости потока, но так как в данном случае нас интересует смыв при одной и той же скорости, то соотношение сил даст нам представление о влиянии положения поверхности образца на интенсивность его размыва.

Таблица 1. Зависимость скоростей размыва от скорости потока и ориентации грунта относительно горизонта (расчет по зависимости (3))

Угол наклона в градусах	Скорость размыва при скорости потока, м/с		
	0.525	0.96	2.00
0	1.00	1.00	1.00
45	868	1.13	1.02
90	2944	1.44	1.08
135	5020	1.75	1.13
180	5881	1.88	1.15

Численный анализ уравнения (3) (табл. 1) показывает, что чем больше скорость потока, тем меньше влияние положения поверхности образца на его смыв. С уменьшением скорости течения воды различия в темпах размыва образцов почвы с разными углами наклона поверхности к горизонту будут увеличиваться. Очевидно, что по сравнению с размывом ложа потока они будут максимальными при скоростях потока, близких к пороговым значениям, при которых размыва дна потока не происходит, а на боковых стенках сила тяжести способствует отрыву частиц почвы.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Размыв модельных образцов почвы проводили в трубе прямоугольного сечения с внутренними размерами 19.5×29.9 мм и длиной $L = 1020$ мм, изготовленной из плексигласа толщиной 12 мм. На концах труба соединяется с короткими стальными патрубками через переходники, один конец которых имеет прямоугольное сечение по размеру трубы, другой – круглое сечение для соединения с патрубком диаметром 20 мм. Один патрубок соединяется эластичным напорным шлангом через вентиль с насосом, другой – через вентиль и шланг с резервуаром для воды, из которого вода через тканевый фильтр возвращается к насосу. На одной из широких сторон трубы на расстоянии 650 мм от ее начала сделан проем размером 20×20 мм для кассеты с почвой длиной 70 мм (рис. 1). Для более полного охвата кассеты проем продолжается и за пределами стенки трубы. Он выполнен из плексигласа прямоугольной формы в виде квадратной толстостенной трубки. В средней ее части имеется отверстие с резьбой для крепежного винта, при помощи которого кассета с образцом фиксируется в проеме трубы. По углам в стенки трубки вмонтированы четыре шпильки, на которые надевается квадратная пластинка с квадратным же отверстием под кассету. Она предназначена для поджатия нескольких слоев компрессионных резиновых прокладок,

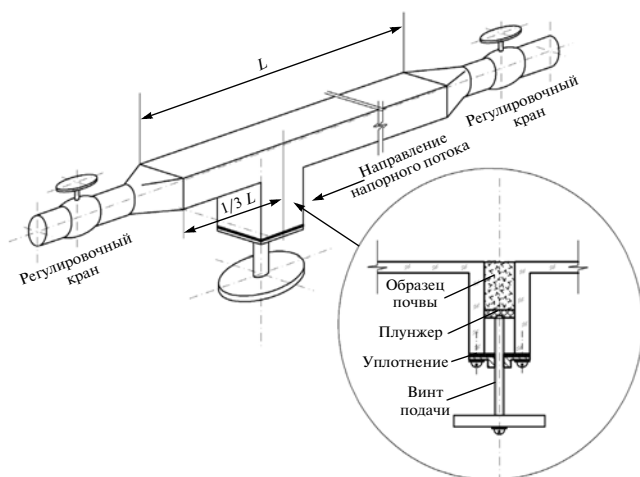


Рис. 1. Схема гидравлической трубы.

служащих для устранения течи воды через щели между кассетой и внутренними поверхностями стенок квадратной трубки. На ней также крепится устройство для выдавливания почвы из кассеты по мере ее размыва.

Материалом для исследования послужил тяжелосуглинистый чернозем из Воловского р-на Тульской обл. Для изготовления модельных образцов использовали фракции 1–2 мм, полученные при рассеиве сухой почвы на стандартном наборе сит. Навески почвы помещали в металлические бюксы и смачивали водой, в количестве, обеспечивающем 24%-ную влажность почвы за 12–16 часов до начала эксперимента.

Непосредственно перед экспериментом замоченную навеску высыпали из бюкса на лист пергамина и перемешивали, а затем небольшими порциями переносили почву в кассету, в нижнюю часть которой предварительно вставляли вкладыш, передающий давление от подающего винта образцу почвы. Вкладыш со стороны, обращенной к почве, покрывали пергаментом, чтобы наблюдателю легче было отметить момент окончания опыта. Каждую порцию почвы разравнивали по сечению кассеты и уплотняли металлическим пестиком, достаточно плотно входящим в кассету. Перед укладкой последней порции почвы кассету помещали в камеру винтового пресса, ставили на нее надставку и уже в нее высыпали, разравнивали и уплотняли пестиком остаток почвы. Затем в надставку вставляли другой вкладыш, по высоте точно равный надставке, и вращали винт пресса до отказа. В результате этого поверхность образца и края кассеты оказывались в одной плоскости.

Подготовленный таким образом образец помещали в проем трубы вместе с кассетой так, чтобы поверхность образца находилась в одной плоско-

сти с внутренней стенкой трубы. Затем фиксировали кассету зажимным винтом, надевали на нее три уплотнительных резиновых прокладки и, надев на нее квадратную пластину с проемом для кассеты, закручивали гайки для обеспечения герметичности соединения кассеты с трубой. До начала опыта, пользуясь вентилем на выходе из насоса настраивали на расход воды, обеспечивающий среднюю скорость потока в трубе 0.95–0.97 м/с. При этой скорости были выполнены все эксперименты. Поддержание средней скорости в более узком диапазоне не представлялось возможным по техническим причинам. Расход воды измеряли с помощью водомерного счетчика и кинокамеры.

Так как скорость размыва почвы зависит от температуры воды [3], то в продолжении опыта ее поддерживали в диапазоне 19–23°C, доливая в резервуар соответственно теплую или холодную воду.

Скорость размыва образцов определяли при пяти различных положениях поверхности образца относительно продольной оси лотка: 0, 45, 90, 135 и 180 градусов. В каждом варианте опыты проводили в 5-кратной повторности. Время полного размыва модельного образца почвы определяли по секундомеру — за момент окончания опыта принимали появление светлой подложки из пергамина на плунжере, через который передается усилие от подающего винта в процессе экструзии образца из кассеты по мере его смыва. Все исследования были проведены на модельных образцах почвы плотностью 1.3 г/см³.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты экспериментов свидетельствуют о большой роли положения размываемой поверхности образца относительно горизонта (табл. 2). Образцы, поверхность которых находится в горизонтальной плоскости, размываются более чем в 1.5 раза медленнее, чем образцы с противоположным расположением размываемой поверхности. Для более корректной оценки влияния исследуемого фактора на интенсивность эрозии необходимо привести экспериментальные данные к одной температуре воды и к одной скорости потока, так как поддерживать эти параметры в продолжении опытов в выбранных пределах не представлялось возможным. Так, температура воды в холодные дни опускалась до 19 градусов, а в теплые в отдельных опытах повышалась до 23 градусов. Как отмечалось выше, скорость потока по техническим причинам также не удавалось поддерживать на одном уровне во всех вариантах опытов и более того в ряде случаев она несколько различалась и внутри вариантов. В связи с этим экспериментально полученные скорости размыва образцов по всем вариантам были приведены к температуре 20°C и скорости потока — 0.96 м/с.

Таблица 2. Средние значения (M), среднеквадратическое отклонение (σ) и коэффициент вариации (Cv) интенсивности размыва почв (экспериментальные и приведенные к температуре 20°C и скорости потока – 0.96 м/с)

Наклон образца почвы к горизонту, градус	Скорость потока воды, м/с	Интенсивность размыва почвы			
		экспериментальная			приведенная
		M , г/см ²	σ , г/см ²	Cv , %	M , г/см ²
0	0.95	87.5	14.5	16.6	82.0
45	0.96	103.7	8.4	8.1	105.8
90	0.96	133.6	44.2	33.1	133.2
135	0.96	137.2	33.3	24.3	134.5
180	0.97	143.7	40.5	28.2	148.6

Для приведения к стандартной температуре мы использовали данные, представленные в нашей работе, посвященной исследованию влияния температуры воды и влажности почвы, использованной для изготовления модельных образцов [3]. Согласно этой работе, при изменении температуры на 1 градус в диапазоне от 17 до 23°C относительный градиент изменения интенсивности смыва на 1 градус составляет 0.074. Отклонение температуры в положительную или отрицательную сторону в градусах от выбранной величины (20°C) умножали на вышеприведенный градиент, и полученную величину умножали на экспериментально полученную скорость смыва, а результат алгебраически суммировали с вышеупомянутой величиной.

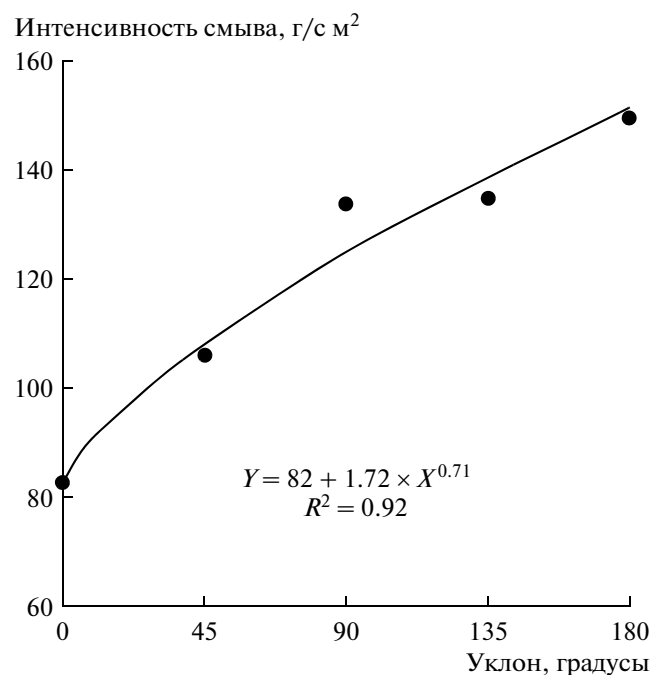
Для введения поправки на скорость потока предварительно были вычислены средние значения эродированности по вариантам опыта путем деления скорости размыва в г/с м² на куб средней скорости потока, как это следует из гидрофизической модели эрозии [5]. Приведенное к средней по всем вариантам опыта (0.96 м/с) скорости потока значение интенсивности смыва было рассчитано как произведение средней по вариантам опыта эродированности на куб средней по всем вариантам скорости потока воды в трубе. Приведенные к температуре воды 20°C и к одной скорости экспериментальные данные даны в табл. 2.

Результаты экспериментов обнаружили тесную зависимость между углом наклона поверхности образцов к горизонту. Она описывается показательной функцией (рис. 2).

Надо полагать, что в естественных условиях может иметь место иное соотношение между боковой и глубинной эрозией в связи с действием сопутствующих факторов эрозии. Например, увеличение плотности почвы вниз по профилю, сопровождающееся уменьшением эродированности, может существенно сократить интенсивность глубинной эрозии и способствовать развитию боковой. Содержание в потоке взвешенных наносов также может приводить к замедлению глубинной

эрозии и активации боковой, так как взвешенные наносы, кольматируя межагрегатные поры уменьшают эродированность выстилающей дно потока почвы. Напротив, наличие в потоке донных наносов песчаной фракции, увеличивая скорость размыва дна вследствие коррадирующего эффекта песчинок, будет уменьшать относительный вклад боковой эрозии в общие потери от эрозии [4].

Все вышесказанное относится к смыву, приведенному к единице размываемой поверхности. В реальных условиях соотношение между поверхностями донного и бокового размывов может быть самым различным. Боковой размыв сам по себе ведет к увеличению поверхности дна ручейков, уменьшая, таким образом, свой вклад в общие потери почвы. Но при неизменном расходе

**Рис. 2.** Зависимость скорости размыва почвы от угла наклона поверхности образца к горизонту.

воды уменьшается глубина потока и, соответственно уменьшается его средняя скорость пропорционально корню квадратному из глубины потока, что в целом способствует сокращению потерь почв в результате ручейковой эрозии. Вместе с тем, донная эрозия, углубляя русло ручейка, не только увеличивает активную площадь боковой эрозии и таким образом увеличивает ее вклад в общие потери почвы, но в случае опускания отметок воды ниже уровня поверхности почвы еще и ведет к росту потерь почвы в результате обрушения подмытых бортов ручейка.

Таким образом, экспериментальные исследования боковой эрозии показывают, что в пересчете на единицу размываемой поверхности боковая эрозия, благодаря тому, что сила тяжести в этом случае способствует процессу смыва, превосходит донный размыв. Причем при малых скоростях потока, сравнимых с пороговыми значениями, боковой размыв во много раз больше донного, а с увеличением скорости различия уменьшаются, но, тем не менее, в диапазоне реальных скоростей склоновых потоков остаются ощутимыми.

Следует иметь в виду, что в реальных условиях в результате размыва бортов растет ширина ручейка, что при постоянном расходе воды ведет к уменьшению глубины потока. Как следствие этого, его скорости уменьшаются вплоть до порогового значения сначала для донного размыва, а затем и для боковой эрозии. Таким образом, соотношение между донной и боковой эрозией в природных условиях определяются еще и гидравлическими характеристиками потока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментальные исследования и теоретический анализ показали, что: а) интенсивность размыва почвы боковых стенок русла увеличивается пропорционально крутизне их откоса; б) вклад боковой эрозии на прямолинейных отрезках русел ручейков в общие потери почвы на распаханых склонах находится в обратной зави-

симости от скорости потока. При скоростях ручейковых потоков, сопоставимых с пороговыми значениями скорости, потери почвы складываются преимущественно за счет боковой эрозии. Если скорость потока многократно превышает пороговое значение, то относительный вклад боковой эрозии в общие потери эрозии уменьшается. Реальная картина соотношения боковой и донной ручейковой эрозии благодаря действию других факторов руслоформирования, вероятно, гораздо сложнее. Тем не менее, при построении физически обоснованных моделей эрозии, очевидно, необходимо принимать во внимание полученные зависимости развития ручейковой эрозии, на долю которой приходится основные эрозионные потери почвы с пахотных земель.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гендугов В.М., Ларионов Г.А., Добровольская Н.Г., Кирюхина З.П., Литвин Л.Ф. Механизмы боковой эрозии в склоновых ручьях // Почвоведение. 2008. № 3. С. 330–337.
2. Ларионов Г.А. Эрозия и дефляция почв: основные закономерности и количественные оценки. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1993. 200 с.
3. Ларионов Г.А., Бушуева О.Г., Добровольская Н.Г., Кирюхина З.П., Краснов С.Ф., Литвин Л.Ф. Влияние температуры воды и влажности почвы на эродируемость образца чернозема (модельный опыт) // Почвоведение. 2014. № 7. С. 878–889.
4. Ларионов Г.А., Добровольская Н.Г., Кирюхина З.П., Литвин Л.Ф. Влияние твердости донных наносов ложа потоков на его эрозионную способность // Почвоведение. 2005. № 4. С. 494–498.
5. Ларионов Г.А., Краснов С.Ф. Вероятностная модель размыва почв и связных грунтов // Почвоведение. 2000. № 2. С. 235–242.
6. Лебявский С. Введение в речную гидравлику. Пер. с англ. Л.: Гидрометеиздат, 1961. 230 с.
7. Маккавеев Н.И. Сток и русловые процессы. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1971. 115 с.
8. Мирицхулава Ц.Е. Инженерные методы расчета и прогноза водной эрозии. М.: Колос, 1970. 279 с.