

© 2016 г. Г.А. ЛАРИОНОВ, Л.Ф. ЛИТВИН, С.Ф. КРАСНОВ, З.П. КИРЮХИНА,
Н.Г. ДОБРОВОЛЬСКАЯ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗМЫВА БЕРЕГОВЫХ ОБРЫВОВ И ОТКОСОВ

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
географический факультет, Россия
e-mail: larionov425@mail.ru*

Процессы размыва вертикальных и наклонных береговых уступов моделировались на малом гидрологическом лотке с изогнутым руслом и в гидравлической трубе прямоугольного сечения. Интенсивность размыва литологически однородного материала вертикального уступа находится в прямой зависимости от угла набегания (угла атаки) потока на берег: $W_\alpha = 349.8(1 + 3.21 \sin^3 \alpha)$, где W_α интенсивность смыва при углах атаки α . Установлена прямая степенная зависимость ($W_\beta = 82 + 1.72\beta^{0.71}$) интенсивности размыва подводного берегового откоса (W_β) от его наклона (β) к поверхности потока. Результаты математического моделирования свидетельствуют о сдвиге соотношения глубинной и боковой эрозии в пользу последней по мере роста скоростей течения. По своим морфометрическим, временным и гидравлическим параметрам используемые модели наиболее близки к параметрам процессов и морфологии русел свойственных склоновой сети мелководных потоков. Для них характерны крутые изгибы русел, высокие скорости течения и бурность потока на пике паводка. Все эти признаки встречаются также в речной сети, особенно на горных реках. На равнинных реках наиболее правомерны аналогии процессов в паводок при условии его прохождения в бровках пойменных берегов.

Ключевые слова: промоина, размыв, донная эрозия, боковая эрозия, угол атаки.

Введение

В геоморфологических исследованиях все большую долю занимают современные процессы рельефообразования, интерес к которым соответствует и запросам практики. При этом многие инженерные решения затруднительны, а то и невозможны, без проникновения в физическую сущность и механизм процессов или, по крайней мере, без количественного описания результатов этих процессов и их взаимосвязей с определяющими факторами. В этом отношении особая роль принадлежит активному эксперименту и физическому моделированию, имеющим в области исследования эрозионно-русловых систем многолетнюю историю [1, 2]. Размыв русловых откосов – важный аспект функционирования эрозионно-русловых систем на всех масштабно-структурных уровнях, начиная со склоновых микроручейков и кончая реками. В речных системах это не только проблема разрушения зданий и сооружений, потери земель и сельхозугодий, но и важная составляющая суммарного стока наносов, без оценки которой невозможна и оценка транспорта загрязняющих веществ. Интерес к этой проблеме отражается в росте количества научных публикаций.

Статья посвящена экспериментальному исследованию размыва русловых обрывов на изгибах русла при “набегании” потока на берег, т.е. при изменении направления потока по отношению к размываемой поверхности (угла атаки), а также влияния наклона поверхности береговых откосов относительно плоскости дна водотока на интенсивность их размыва и на соотношение бокового и глубинного врезания.

Модельные потоки по гидравлическим и морфометрическим характеристикам наиболее близки к микроручьям склоновой русловой сети, однако, результаты могут быть приложимы и к более крупным водным потокам с бурным течением, поскольку такие потоки во время паводков обладают сходными гидравлическими (скорость течения, число Фруда) и морфологическими (большая крутизна излучин, коленообразность изгибов) параметрами.

Угол атаки. Эксперименты по оценке влияния угла атаки на интенсивность размыва вертикальных обрывов проводились на циркуляционном гидравлическом лотке длиной 206,9 см, шириной русла 10 и глубиной потока 3 см, скорость течения равнялась 1.22–1.25 м/с, число Фруда – больше 1 (5.22), т.е. в бурном потоке. Для получения русла с коленообразным изгибом в лоток устанавливались вкладыши, позволявшие изменять угол изгиба (рис. 1). Контейнер (поперечной площадью 2×7 см) с испытуемым образцом устанавливали в специальном проеме сбоку лотка, располагая его под различным углом (0, 10, 20, 30, 40 и 50°) по отношению к оси потока. Опыт начинался после пуска и стабилизации потока в лотке, а заканчивался полным размывом образца, поверхность которого в течение всего опыта располагалась вровень с боковой стенкой лотка, обращенной навстречу течению, что достигалось выдвиганием (выдавливанием) образца из контейнера специальным винтом.

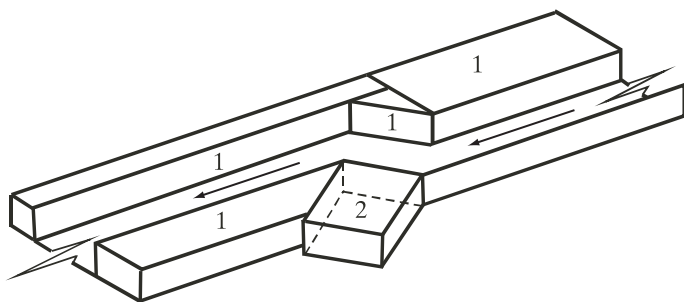


Рис. 1. Схема гидрологического лотка для исследования угла атаки на размыв вертикального берегового обрыва
1 – деревянные набортные вкладыши для изменения направления потока, 2 – контейнер для кассеты с образцом (стрелкой показано направление течения)

Интенсивность размыва образца ($\text{г} \times \text{м}^{-2} \times \text{с}^{-1}$) рассчитывалась делением веса почвы в контейнере на продолжительность размыва и на поперечную площадь образца. Средняя скорость определялась делением расхода на сечение потока, а кроме того, трубкой Пито измерялась скорость на высоте, соответствующей середине образца, в четырех точках – на подходе к колену в середине потока и у боковой стенки; а также в самом колене у образца почвы и у противоположной стенки.

Использовались модельные образцы почвы однородные по плотности (1.2 г/см^3), влажности (24%) и по механическому составу – почвенные агрегаты тяжелосуглинистого чернозема двух фракций – 0.5–2 мм и менее 0.5 мм в пропорции $6 \div 1$. Тщательное соблюдение этих параметров при подготовке образцов позволило устранить влияние литологического фактора, а также снизить вариабельность скорости размыва до 4–11% в каждой серии. Повторность опытов – 6–9-кратная.

Размыв русловых откосов. В этой серии опытов размыв модельных образцов проводили в герметичной плексигласовой трубе прямоугольного сечения 19.5×29.9 мм длиной $L = 1020$ мм. На одной из стенок трубы на расстоянии 650 мм от ее начала располагался проем площадью 20×20 мм с кассетодержателем. Кассета для образца имела длину 70 мм и площадь сечения 20×20 мм. Здесь же крепилось устройство для выдавливания почвы, по мере ее размыва, из кассеты, с тем, чтобы поверхность образца всегда находилась в плоскости стенки трубы. До начала опыта подающий воду насос настраивали на расход воды, обеспечивающий среднюю скорость потока в полностью заполненной трубе 0.95–0.97 м/с. Расход воды измеряли в подающем шланге с помощью водомерного счетчика и видеокамеры.

Для изготовления модельных монофракционных образцов использовались почвенные агрегаты фракции 1–2 мм. Плотность образца составляла 1.3 г/см^3 , влажность – 24%. Подготовленный образец в кассете помещали в проем трубы так, чтобы поверхность образца находилась в одной плоскости с внутренней стенкой трубы. Так как скорость размыва почвогрунта зависит от температуры воды [3], то в продолжение

каждого опыта поддерживалась одинаковая температура, а диапазон для всей серии опытов составлял 19–23 °С.

Скорость размыва образцов определяли при пяти различных положениях поверхности образца относительно горизонта: 0, 45, 90, 135 и 180°, которые в морфологическом смысле соответствуют понятиям “дно”, “крутой склон”, “вертикальный обрыв”, “нависающий карниз” и “кровля тоннеля”. Все эти варианты встречаются в природе. (В эрозиоведении известно такое явление как “тоннельная эрозия”, часто сопровождающее суффозию.) В каждом варианте опыты проводились в 5-кратной повторности.

Результаты и обсуждение

Эксперименты по влиянию угла атаки выявили следующую картину распределения скоростей водного потока и удельной интенсивности смыва на прямолинейных и изогнутых отрезках русла мелководного потока (табл. 1).

Таблица 1

Влияние угла атаки на распределение скоростей потока и интенсивность размыва вертикальных ударных бортов русла

Угол атаки, град.	Число опытов	Интенсивность размыва, $г \times м^{-2} \times с^{-1}$	Коэффициент вариации, C_v (%)	Скорость потока, м/с	
				ударный борт	противоположный борт
0	9	363.0	9.8	1.18	1.07
10	8	367.9	5.4	1.27	0.51
20	7	394.6	4.3	1.23	–0.52*
30	7	467.0	5.4	1.28	–0.54*
40	6	627.6	11.5	1.21	0.54
50	6	873.2	8.1	1.18	0.64

Примечание. * – противотечение.

Изменения скорости течения не обнаруживают четкой зависимости от величины угла атаки, как у ударного борта, так и у противоположного; амплитуда изменений средних скоростей 5 и 24% соответственно (рис. 2). Однако распределения скоростей потока в поперечных створах на прямолинейном участке и на изгибе различны. На прямолинейном отрезке скорости у противоположных берегов отличаются несущественно, вероятно, в пределах естественных флуктуаций или ошибок измерения. На изгибах скорость у ударного “вогнутого” размываемого обращенного навстречу потоку берега возрастала незначительно, но резко и примерно одинаково при всех углах атаки снижалась у расположенной напротив стенки колена. При небольших углах атаки (20–30°) здесь отмечалась суводь-противотечение (табл. 1). Полученная картина распределения скоростей течения противоположна их распределению, выявленному в экспериментах для относительно пологих изгибов русла на прямоугольных лотках с недеформируемым дном [4, 5]. Но она близка к распределению скоростей, например, в отдельных крутых излуцинах Оби и Иртыша [5]. Н.И. Маккавеев [6] именно увеличение неравномерности скоростей течения считал наиболее существенной причиной увеличения эрозионной и транспортирующей способности потока на излуцинах при условии постоянства средней скорости течения, что и соблюдалось в условиях эксперимента.

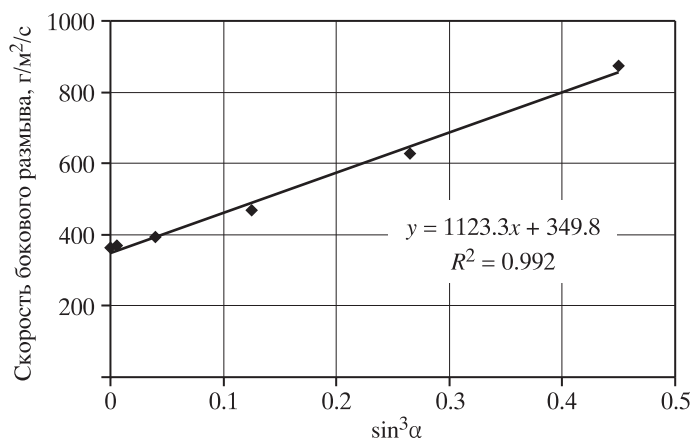


Рис. 2. Зависимость скорости размыва от угла набегания потока на береговой обрыв

Что касается влияния величины угла атаки на смыв, – возрастающий тренд выражен достаточно четко, рост относительных величин интенсивности смыва значителен (табл. 1). Такой высокий рост интенсивности не может быть объяснен только увели-

чением скорости у размываемого берега. Так, если исходить из представлений, лежащих в основе гидрофизической модели эрозии, то скорость размыва на изгибе русла должна быть пропорциональной кубу скорости потока [7]. Следовательно, например, при угле атаки в 40° скорость размыва (W_{40}) должна быть в 1.08 раза больше чем при нулевом угле атаки (W_0), что следует из пропорции

$$W_{40} = \frac{W_0 u_{40}^3}{u_0^3}, \quad (1)$$

где u_0 и u_{40} – скорости потока у образца на прямолинейном отрезке русла и на изгибе, соответственно. Однако в эксперименте (табл. 1) интенсивность размыва в этом случае существенно выше – в 1.73 раза. Это количественное различие будет сохраняться и во всех расчетах смыва по моделям эрозии, где аргументом функции эрозии является скорость течения в степени меньшей 3 [8, 9]; однако и в этом случае рассчитанные значения скорости размыва ударной стенки на повороте русла существенно меньше измеренных значений.

Наиболее тесную связь описание экспериментальных данных дает зависимость вида:

$$W_\alpha = W_0(1 + k \sin^3 \alpha), \quad (2)$$

где k – безразмерный коэффициент, α – угол атаки, градусы.

Исходя из уравнения регрессии рис. 2 приведенная выше зависимость приобретает вид:

$$W_\alpha = 3.498(1 + 3.21 \sin^3 \alpha). \quad (3)$$

Экспериментальные данные о влиянии угла атаки на интенсивность размыва подтверждают на качественном уровне обоснованность имеющихся теоретических моделей смыва, но количественные расхождения остаются необъясненными. Вероятно, в этом случае существенная роль принадлежит гидромониторному эффекту, на который впервые указал Н.И. Маккавеев [10]. В природе влияние крутизны излучины на интенсивность смыва прослеживается достаточно часто [11]. Неясность генезиса не препятствует использованию полученной эмпирической зависимости для совершенствования моделей смыва или при практических расчетах размыва береговых обрывов в крутых извилистых водных потоках различных размеров.

Эксперименты с **размывом береговых откосов** на прямолинейных участках русел водных потоков показали значимость влияния уклона откоса (положения размываемой поверхности относительно водной поверхности) на интенсивность его размыва (табл. 2).

Влияние крутизны берегового откоса на интенсивность размыва

Наклон откоса к горизонту, град.	Скорость потока воды, м/с	Интенсивность размыва		
		экспериментальная		приведенная*
		средняя, $\text{г} \times \text{м}^{-2} \times \text{с}^{-1}$	коэффициент вариации, C_v (%)	средняя, $\text{г} \times \text{м}^{-2} \times \text{с}^{-1}$
0	0.95	87.5	16.6	82.0
45	0.96	103.7	8.1	105.8
90	0.96	133.6	33.0	133.2
135	0.96	137.2	24.3	134.5
180	0.97	143.7	28.2	148.6

Примечание. * – приведенные к температуре 20° и скорости потока – 0.96 м/с.

Тенденция к увеличению интенсивности размыва с увеличением крутизны откоса от 0 до 90° выглядит достаточно убедительно (рис. 3). Заметна она и при дальнейшем увеличении уклонов, т.е. для ряда морфологических форм: “вертикальный обрыв” (90°), “нависающий карниз” (135°), “кровля тоннеля” (180°). Достоверность отличия средних величин при размыве дна от интенсивности размыва при наклоне в 0, 45, 90, 135 и 180° подтверждается при уровне доверительной вероятности 0.90. Максимальное значение 1.6 раза различия достигают при угле 180° – настолько быстрее размывается кровля тоннеля по сравнению с дном (рис. 3).

При проведении различных серий экспериментов не удавалось поддерживать единую температуру воды – она варьировала от 17 до 23 °С в разных сериях опытов. Более стабильны, но также изменчивы были и средние скорости потока – в пределах 2% (табл. 2). Между тем в условиях эксперимента температура воды оказывает заметное влияние на интенсивность смыва. При изменении температуры на 1° в диапазоне от 17 до 23 °С относительный градиент изменения интенсивности смыва на один градус составляет 0.074 [3]. Н.И. Маккавеев [6] относил увеличение скоростей и энергии потока при росте температуры воды на счет изменения физического коэффициента вязкости воды, который меняется почти на порядок при росте температуры от 0 до 100 °С. В этом случае эффект должен наблюдаться преимущественно при околороговых значениях скорости (~0.55 м/с). Но, вероятно, увеличение эрозионной способности потока с ростом температуры воды имеет и другие – физико-химические причины, поскольку в бурных потоках с высокими числами Фруда активация эрозии происходит и без изменения средних скоростей течения [3].

Для введения поправки на вариабельность скорости потока предварительно были вычислены средние значения эродуемости по

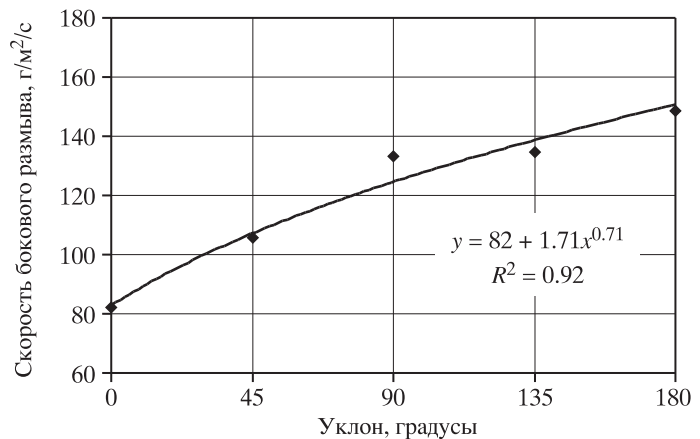


Рис. 3. Зависимость скорости размыва почвы от угла наклона берегового откоса

вариантам опыта путем деления скорости размыва в $\text{г} \times \text{м}^{-2} \times \text{с}^{-1}$ 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 эродируемости на куб средней по всем вариантам скорости потока воды в трубе.

Приведение к единым температуре и скорости потока не привело к сколько-нибудь заметным изменениям тренда – относительные разнонаправленные отклонения средних скоростей течения не превышают 6% (табл. 2), т.е. скорости течения можно считать одинаковыми во всех сериях эксперимента. Установлена прямая степенная зависимость ($W_{\beta} = 82 + 1.72\beta^{0.71}$) интенсивности размыва подводного берегового откоса (W_{β}) от его наклона (β) к поверхности потока.

Скорости потоков в натуральных условиях, при смене гидрологических циклов (сточных для склоновых, сезонных для рек), как известно, изменяются в широком диапазоне. Для оценки эрозионного эффекта уклона откоса относительно поверхности потока в большом диапазоне скоростей может быть использован физический анализ сил действующих на отдельную частицу. Для оценки именно относительного влияния наклона берегового откоса результаты такого анализа могут быть представлены следующим образом:

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

где F – сумма сил, действующих на частицу, 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. Уравнение дает возможность оценить соотношение действующих сил во всем диапазоне положений размываемой поверхности по отношению к поверхности потока. (В левой части 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 [7] смыв пропорционален кубу скорости потока. Поскольку в данном случае интересен смыв при одной и той же скорости, но при различных наклонах откосов, то соотношение сил определит меру влияния этого наклона на интенсивность размыва (табл. 3).

В целом результаты расчетов свидетельствуют о сохранении тенденции к росту интенсивности размыва с увеличением угла наклона берегового откоса в широком диапазоне скоростей водных потоков (табл. 3). При этом на фоне роста абсолютных значений интенсивности с увеличением угла наклона прослеживается снижение ее

относительных величин. Так, если при скорости 0.55 м/с (близкой к размывающей), различие в интенсивности размыва дна и кровли тоннеля составляет десятки раз, то при скорости в 2.0 м/с только 1.15 (табл. 3). То есть увеличение скорости течения приводит к выравниванию интенсивности глубинного и бокового врезов (вертикальных и горизонтальных деформаций русла). Теоретически это соотношение при малых скоростях течения (близких к пороговой размывающей скорости) должно приводить к постоянно-му неограниченному расширению

Таблица 3

Соотношения интенсивности размыва* русловых откосов и днища русла при различных скоростях течения

Наклон откоса к горизонту, град.	Скорость потока, м/с		
	0.55	0.96	2.00
0	1.00	1.00	1.00
45	5.14	1.13	1.02
90	15.15	1.44	1.08
135	25.15	1.75	1.13
180	29.29	1.88	1.15

Примечание. * – относительно интенсивности размыва дна в каждой серии опытов.

русла. Но в природе этого не происходит, поскольку при расширении русла снижается глубина потока и, соответственно, скорости течения [12, 13]. В склоновых микроустьях преобладание размыва берегов встречается гораздо чаще, что, как правило, обуславливается и различием в противоэрозионной устойчивости почвы на откосах и в днищах.

Заключение

Основными результатами физического моделирования является подтверждение теоретических положений о существенном влиянии величины угла набегания потока на берег (угла атаки) и уклона береговых (русловых) откосов на интенсивность размыва берегов.

При анализе результатов физического моделирования неизбежно возникают вопросы о соблюдении подобия моделируемых процессов и их соотношению с натурой. По своим морфометрическим, временным и гидравлическим параметрам используемые модели наиболее близки к параметрам процессов и морфологии русел свойственных склоновой сети мелководных потоков. Для этих потоков характерны крутые (вплоть до прямоугольных) изгибы русел, высокие скорости течения и бурность потока на пике паводка. Однако все эти признаки встречаются и в речной сети, особенно на горных реках. На равнинных реках наиболее правомерны аналоги процессов в паводок при условии его прохождения в бровках пойменных берегов.

При моделировании не учитывались часто встречающиеся литолого-гранулометрические различия пород, слагающих обрывы и откосы речных русел, обуславливающие изменчивость противоэрозионной стойкости пород в пределах единого берега, возможность развития оползневых и обвально-осыпных процессов. Влияние этих факторов, а также учет морфометрии береговых откосов, нуждаются в особых исследованиях. В настоящей работе была сделана попытка оценить влияние только гидравлической составляющей процессов размыва берегов.

Благодарность. Работа выполнена по гранту Президента РФ для поддержки ведущих научных школ (проект НШ-1010. 2014.5), при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-05-00474а) и по госбюджетной теме “Эволюция эрозионно-русловых систем и их составляющих в условиях изменения климата и антропогенных нагрузок”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арманд Д.Л. Обзор экспериментальных методов в геоморфологии // Проблемы физической географии. Т. XIII. 1948. С. 37–58.
2. Маккавеев Н.И., Хмелева Н.В., Заитов И.Р., Лебедева Н.В. Экспериментальная геоморфология. М.: Изд-во МГУ, 1961. 194 с.
3. Ларионов Г.А., Бушуева О.Г., Добровольская Н.Г., Кирюхина З.П., Краснов С.Ф., Литвин Л.Ф. Экспериментальные исследования влияния температуры воды и влажности почвы на эродируемость модельных образцов // Почвоведение. 2014. № 7. С. 890–896.
4. Розовский И.Л. Движение воды на повороте открытого русла. Киев: Изд-во АН УССР, 1957. 188 с.
5. Чалов Р.С. Русловедение: теория, география, практика. Т. 2. Морфодинамика речных русел. М.: КРАСНАНД, 2011. 960 с.
6. Маккавеев Н.И. Гидравлическая типизация эрозионного процесса // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 3. М.: Изд-во МГУ, 1973. С. 65–77.
7. Ларионов Г.А., Краснов С.Ф. Вероятностная модель размыва почв и связанных грунтов // Почвоведение. 2000. № 2. С. 235–242.
8. Мирзехулава Ц.Е. Основы физики и механики эрозии русел. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 304 с.
9. Швебе Г.И. Формирование водной эрозии, стока наносов и их оценка. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 184 с.
10. Маккавеев Н.И. Сток и русловые процессы. М.: Изд-во МГУ, 1971. 115 с.

11. Петухова Л.Н., Рысин И.И. Горизонтальные русловые деформации как фактор флювиального рельефообразования в Удмуртии // Проблемы флювиальной геоморфологии. Ижевск: Научная книга, 2006. С. 183–187.
12. Nachtigale J., Poesen J., Sidorchuk A., and Torry D. Prediction of concentrated flow width in ephemeral gully channels // J. Hydrological processes. 2002. Vol. 16. P. 1935–1953.
13. Torry D., Poesen J., Borelli L., and Knapen A. Channel width – flow discharge relationships for rills and gullies // J. Geomorphology. 2006. Vol. 76. P. 273–279.

Поступила в редакцию 02.12.2015

EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE CLIFFS AND BANKS WASHAWAY

G.A. LARIONOV, L.F. LITVIN, S.F. KRASNOV, Z.P. KIRYUKHINA, N.G. DOBROVOL'SKAYA

*Lomonosov Moscow State University, Geographical Department, Russia
e-mail: larionov425@mail.ru*

Vertical and inclined shores washout processes were simulated in the small-scaled water tunnel with curved bed and in the rectangular-sectioned hydraulic flume. Intensity of the washout of lithologically homogeneous material of vertical shore is in direct correlation with the attack angle of flow on the coast: $W_\alpha = 349.8(1 + 3.21 \sin^3 \alpha)$, where W_α is the intensity of washout at the attack angle α . The power-law relation ($W_\beta = 82 + 1.72\beta^{0.71}$) of underwater river bank washout intensity (W_β) from its incline (β) to the flow surface is fixed. Mathematic simulation results show that the ratio of side erosion to bottom erosion shifts to bottom erosion if flow velocity was increased. Due to their morphometric, timing and hydraulic parameters these models are closest to the processes parameters and morphology of the beds of slope drainage network of shallow waterflows. Sharp river bed curves, high flow velocities and flow turbulence on the top of high water are typical for them. All these features occur in the river drainage networks as well, especially on the mountainous rivers. On the plain rivers the most adequate are the high water processes analogues as long as high water passes in the berm edges of flood-plain coasts.

Keywords: rill channel; scour; bed erosion; side erosion; angle of attack.

doi:10.15356/0435-4281-2016-2-51-58