

УДК 551.435.162:551.4.025

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА МЕХАНИЗМА РАЗМЫВА В НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ФОРМИРОВАНИЯ ОВРАГА[#]

© 2023 г. **Г. А. Ларионов¹**, **С. Ф. Краснов¹**, **Л. Ф. Литвин¹**, **А. В. Горобец^{1,*}**,
Л. В. Кобыльченко (Куксина)¹, **Н. Р. Крючков²**

¹ *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Москва, Россия*

² *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, факультет почвоведения, Москва, Россия*

*E-mail: GorobetsAV@geogr.msu.ru

Поступила в редакцию 14.05.2022 г.

После доработки 04.09.2022 г.

Принята к публикации 10.11.2022 г.

В работе излагаются результаты и теоретическое обоснование экспериментального исследования механизма и интенсивности размыва в начальной стадии формирования вершин оврагов. Экспериментальная струйная установка позволяет изменять угол атаки струи от 0.5 до 90° при скоростях истечения до 6 м/с. Угол атаки в опытах изменялся с шагом в 10°, скорость течения выдерживалась в диапазоне 1.01–1.04 м/с. Зависимость интенсивности размыва грунта от угла атаки струи характеризуется положительным трендом в диапазоне от нуля до 40°. При более высоких значениях (в диапазоне углов от 50 до 90°) интенсивность последовательно снижается. Наиболее низкие абсолютные значения наблюдались при угле атаки 90°. Предполагаются две основные причины специфики изменения интенсивности размыва почвы и грунта при различных углах атаки потока — гидратационная и гидромеханическая. Первая обуславливает ослабление и разрушение межагрегатных связей проникающей в грунт водой, вторая — сочетанием направления сил гидродинамического напора и сил, удерживающих частицу (агрегат) на месте. Анализ сил, воздействующих на отдельную частицу грунта падающей струей, показывает максимум этого воздействия при угле атаки 41°. Сток в руслах оврагов происходит эпизодически и полученные результаты следует относить к начальному периоду размыва — периоду до образования так называемой воронки размыва.

Ключевые слова: вершинные уступы, скорость размыва, струйная установка, угол атаки, гидратация, гидродинамика размыва

DOI: 10.31857/S2949178923010085, **EDN:** GQFSMY

ВВЕДЕНИЕ

Образование и развитие оврагов — один из самых наглядных и эффективных процессов рельефообразования на хозяйственно освоенных равнинах России. Развитие оврагов наносит практически невосполнимый ущерб земельным ресурсам и отрицательно влияет на состояние окружающей среды — ускоряя и усиливая транспорт загрязняющих веществ в реки и водоемы. Плотность и густота оврагов на равнинах ЕТР достигают 5 ед./км, средняя густота — до 1.3 км/км² (География овражной эрозии, 2006). Научное обоснование борьбы с оврагообразованием имеет более чем столетнюю историю, но развитие новых технологий землепользования, строительства и т.д., тре-

бует современных разработок методов и способов этой борьбы. В частности, необходима углубленная оценка физики механизма роста оврагов. Главными точками роста оврагов являются вертикальные уступы и круто наклонные участки тальвегов в вершинах оврагов. Падающая с уступов струя воды размывает нижележащее днище, образуя так называемую “воронку размыва”. Для определения глубины ожидаемого размыва гидравликами был предложен ряд формул, в том числе и специально для вершин оврагов. В формуле Ц.Е. Мирцхулавы (Мирцхулава, 1970) одним из основных факторов глубины ожидаемого размыва, помимо гидравлических характеристик потока, принят гранулометрический состав грунта и угол наклона ниспадающей струи к горизонту. На первоначальном этапе воронки размыва ниспадающая струя соприкасается с “ровной” поверхностью днища, поскольку воронка размыва, оставленная предыдущим эпизодом стока, зарав-

[#] Ссылка для цитирования: Ларионов Г.А., Краснов С.Ф., Литвин Л.Ф. и др. (2023). Экспериментальная оценка механизма размыва в начальной стадии формирования оврага // Геоморфология и палеогеография. Т. 54. № 2. С. 97–104. <https://doi.org/10.31857/S2949178923010085>; <https://elibrary.ru/GQFSMY>

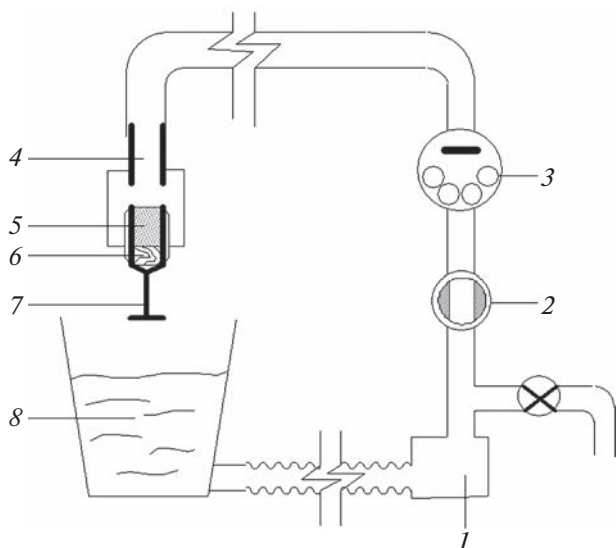


Рис. 1. Схема установки для исследования разрушения почв и грунтов струей воды.

1 – насос; 2 – конический кран; 3 – расходомер; 4 – насадка квадратного сечения; 5 – кассета с образцом; 6 – плунжер; 7 – подающий винт; 8 – приемная емкость для воды. Насадка может вращаться в плоскости, перпендикулярной плоскости рисунка.

Fig. 1. The diagram of the installation for studying soil and subsoil destruction with water jet.

1 – pump; 2 – plug valve; 3 – flow meter; 4 – square nozzle; 5 – cartridge with the sample; 6 – plunger; 7 – feeding screw; 8 – water discharge tank. The nozzle may rotate in the plane perpendicular to the plane of the figure.

нивается процессами оплывания, обваливания грунта.

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 и овражных систем многолетнюю историю (Арманд, 1948; Маккавеев и др., 1961; Косов, Никольская, 1974; Dabney et al., 2004).

Результаты экспериментов, изложенные ниже, как раз и имели целью оценить влияние угла наклона падающей струи (угла атаки струи) на интенсивность размыва грунта в период до образования воронки размыва.

МЕТОДИКА И ОБОРУДОВАНИЕ

В экспериментах по оценке механизма и интенсивности размыва в верховьях оврагов была задействована авторская струйная установка, ранее примененная для оценки размыва почв при высоких скоростях и углах атаки (Ларионов и др., 2018). Ранее устройства подобного типа для оценки сопротивления почв и грунтов размыву широко использовались российскими исследователями (Бастраков, 1994; Золотов, 2005), а зарубежными для оценки влияния физико-химических свойств почв и грунтов на интенсивность их размыва (Hanson, Cook, 2004; Courivaud et al., 2009; Kimiaghalam et al., 2016).

Основное и принципиальное отличие авторской установки – струя воды из насадки поступает на поверхность размываемого образца почвы или грунта под различными углами атаки. Этот угол определен углом между направлением струи и поверхностью почвы в точке удара струи. Угол атаки устанавливался путем изменения наклона насадки от 0.5 до 90°. Общая схема струйной установки представлена на рис. 1.

Направляющее струю устройство-насадка (4) представляет собой короткую квадратную трубу сечением 4 см², шарнирно закрепленную на раме и соединенную через гибкий рукав с водомерным счетчиком и насосом. Кассета (5) с испытуемым образцом, размером 17 × 17 мм и высотой 30 мм, устанавливается в специальный кассетодержатель, который вертикально прикреплен к раме установки. С нижней стороны к кассетодержателю через резиновое уплотнение крепится пластина с подающим винтом плунжера. Сбоку по центру кассетодержателя расположен винт, обеспечивающий фиксирование кассеты в заданном положении. Насадка благодаря гибкому рукаву и оси ее вращения, совпадающей с центральной осью поверхности образца, располагается на неизменном расстоянии от него при любых углах наклона. Кроме того, такое конструктивное решение позволяет поверхности образца всегда полностью находиться под воздействием струи. В приемной емкости для воды (8) помещается фильтр из плотного нетканого материала в форме усеченного конуса. Фильтр предназначен для задержания агрегатов и частиц размываемых образцов с тем, чтобы снизить мутность циркулирующей воды (Ларионов и др., 2008). Подающий винт, предназначенный для экструирования образца почвы из кассеты, приводится в движение рукояткой. Вращая рукоятку, наблюдатель во все время опыта поддерживает поверхность образца почвы ровень с краями кассеты. Подсветка зоны контакта струи воды с образцом миниатюрной светодиодной лампой повышает четкость визуального наблюдения размыва образца, включая и срыв отдельных агрегатов почвы, а также

улучшает условия фотофиксирования положения поверхности размываемого образца.

В качестве исходного материала для изготовления модельных образцов использовался легкоглинистый пахотный горизонт чернозема (Воловский район Тульской области). Из него сухим просеиванием отбирались агрегаты размером 1–2 мм, из которых формировались модельные образцы с плотностью 1.3 г/см³. Навески почвы помещались в алюминиевые бюксы и насыщались водой до 24%-ной влажности от массы воздушно-сухой почвы, что соответствует 55% от капиллярной влагоемкости, которая определялась для фракции 1–2 мм методом капиллярного насыщения в трубках. При такой влажности почва достигала предельной или близкой к ней консолидации (Nearing et al., 1988). После 16–18-часовой выдержки образец укладывался в кассету и его плотность доводилась до заданной величины (1.3 г/см³), характерной для пахотных горизонтов почв (Кузнецов, 1981).

Угол атаки струи устанавливался путем изменения наклона насадки. В первом варианте опыта угол составлял 0.5°. Далее угол атаки изменялся с шагом в 10° вплоть до 90°. Повторность опытов в каждой серии – 5–10 измерений. Расход воды устанавливался по водомерному счетчику, а скорость потока определялась как частное от деления расхода на сечение насадки. Скорость истечения воды из насадки во всех вариантах опыта составляла 1.01–1.04 м/с. Температура воды в установке поддерживалась в диапазоне – 18–21°C (Ларионов и др., 2014). Опыты проводились до полного размыва образца, а интенсивность размыва оценивали массой сухой почвы, потерянной с единицы площади образца в единицу времени (г/(м² с)).

РЕЗУЛЬТАТЫ И АНАЛИЗ

Статистическая обработка результатов (табл. 1) показывает, что вариабельность показателей интенсивности размыва находится в тех же пределах, что и в опытах с гидравлическими лотками (Ларионов и др., 2011).

Изменение интенсивности размыва в зависимости от угла атаки струи демонстрирует ее постепенное нарастание при значениях углов вплоть до 40°. При более высоких значениях (в диапазоне углов от 50 до 90°) интенсивность резко и сравнительно равномерно снижается. Наиболее низкие значения интенсивности размыва наблюдались при угле атаки струи 90° (рис. 2).

Подобная картина имела место в предыдущей серии исследований интенсивности размыва от величины угла атаки водной струи (Ларионов и др., 2018). Эксперименты проводились на аналогичной установке, но при более высокой скоро-

Таблица 1. Интенсивность размыва почвенных образцов при различных углах истечения потока

Table 1. Rate of erosion of soil samples at different angles of flow direction

Угол атаки струи, град.	<i>n</i>	$\bar{x}$, г/(м ² с)	<i>s</i> , г/(м ² с)	<i>Cv</i> , %
0.5	5	71.7	9.4	13
10	6	81.4	11	14
20	10	80.8	14	17
30	6	106	11	10
40	5	120	18	15
45	6	70.9	6.1	8.6
50	6	38.4	3.6	9.4
60	6	30.0	3.9	13
70	6	27.0	4.8	18
80	6	16.6	3.2	19
90	5	11.5	1.2	10

Примечание. *n* – объем выборки (повторность измерения); $\bar{x}$ – среднее арифметическое значение; *s* – стандартное отклонение; *Cv* – коэффициент вариации.

сти истечения струи (1.24 м/с) и большем шаге изменения угла (15°) во всем диапазоне. Увеличенный шаг обусловил более сглаженный вид тренда, а высокая скорость – повышенные абсолютные значения интенсивности размыва. Рост интенсивности размыва при увеличении угла атаки в диапазоне от 0 до 50° зафиксирован и для русловых потоков (Ларионов и др., 2016б) при существенном отличии их гидравлических свойств от гидравлики струйчатых потоков.

Близкая по форме зависимость (с максимумом при угле атаки в 40–45° и абсолютном минимуме при 85°) установлена при оценке влияния угла атаки волны на интенсивность перемещения наносов (Khalifa, and Zahra, 2014).

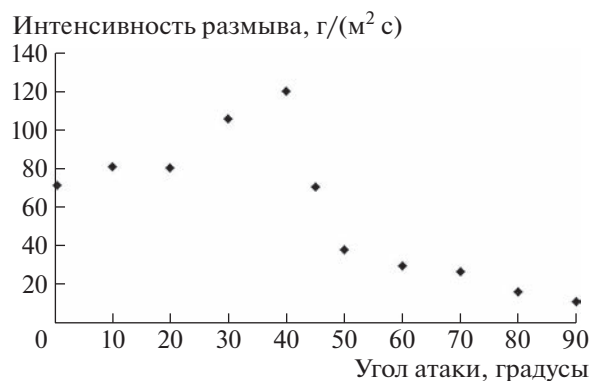


Рис. 2. Зависимость интенсивности размыва почвы от угла атаки струи воды.

Fig. 2. The relationship between soil erosion rate and the water jet heading angle.

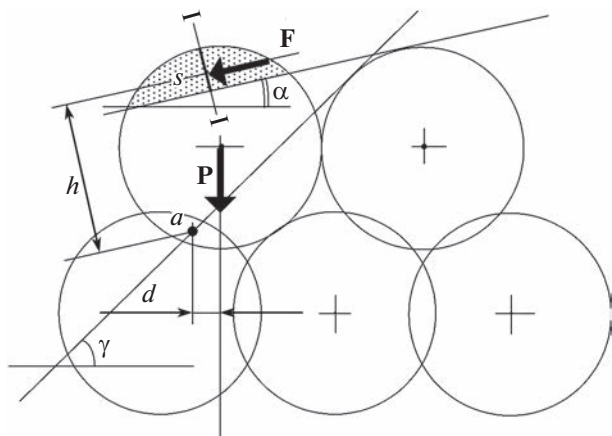


Рис. 3. Силы, действующие на частицу при угле атаки менее критической величины (угол α меньше угла γ). Пояснение обозначений приведено в тексте.

Fig. 3. Forces affecting the particle at the angle of attack lower than critical (angle α lower than angle γ). An explanation of the items is given in the text.

Раскрытие физической сущности “гидромониторного эффекта” (Маккавеев, 1955) требует исследований взаимодействия падающего потока воды и размываемого грунта на “микроуровне”. Можно предположить, что для размыва гумусированных черноземов с прочными межагрегатными связями наибольшее влияние на интенсивность размыва имеет разрушение этих связей при гидратации. Ранее показано (Ларионов и др., 2016а), что разрушение связи между частицами при отсутствии внешнего механического давления и наличии свободной поровой воды происходит в результате расклинивающего действия той диффузной части пленок воды, которые образуются при гидратации двойного электрического слоя (слой Гуи-Чепмена). В результате частицы внешнего слоя отодвигаются от основной массы на расстояние заведомо больше, чем дальность действия межмолекулярных сил (< 50 нм) (Осипов, 2014). В итоге такие частицы можно рассматривать как свободно лежащие на поверхности образца, а подъемная сила слоя воды уже действует на них. В этом случае даже при низких скоростях течения поток способен захватывать частицы, несмотря на то, что при этом касательное напряжение на три порядка меньше, чем сопротивление почвы разрыву (Nearing et al., 1991).

Из этого следует, что скорость размыва связного зернистого грунта при постоянной скорости потока и при прочих равных условиях зависит от темпов разрушения межагрегатных связей в поверхностном слое почвы под действием свободной поровой воды. Скорость и объем поступления воды в поверхностный слой почвы зависят от угла атаки. При угле атаки в 90° часть струи, попадающей в зазор между частицами верхнего слоя,

теряет скоростной напор уже при встрече со вторым слоем частиц грунта. В связи с этим вода медленнее и не столь глубоко проникает в почвенные образцы в процессе размыва и, следовательно, медленнее протекает разрушение межагрегатных связей. Соответственно, замедляется и срыв частиц грунта струей воды. Кроме того, с возрастанием угла атаки струи возрастает пригружающий эффект, максимум которого достигается при углах, близких к 90° . Этим эффектом объясняется и более заметное падение интенсивности размыва для углов атаки больше 40° .

Причины зависимости интенсивности размыва почвы от угла атаки струи, помимо сочетания разрушения межагрегатных связей водой с изменением гидродинамического напора, имеют и гидромеханическую составляющую. Вероятно, эта составляющая для связных грунтов с менее сильными межагрегатными связями, чем гумусированные почвы, имеет преимущество. Частица, лежащая на поверхности образца, испытывающая гидродинамическое давление струи воды, будет неподвижна, пока сумма моментов сил, действующих на нее, по часовой стрелке относительно точки вращения “а” (рис. 3) будет больше суммы моментов сил против часовой стрелки. Из рисунка видно, что на частицу действуют сила веса, приложенная к ее центру тяжести, и сила давления струи, приложенная к центру тяжести поперечного (лобового) сечения той части частицы, которая не “прикрыта” соседней частицей, испытывающей давление струи.

Следует заметить, что если момент от силы веса величина постоянная и не зависит от угла атаки α , то момент от силы давления струи зависит от угла атаки, определяющего площадь воздействия струи на частицу и точку приложения силы давления. При постоянной скорости потока сила давления будет возрастать с увеличением угла атаки вследствие роста поперечной площади воздействия от нуля до максимального значения, равного поперечной площади почвенной частицы.

Отметим, что поток воздействует только на ту часть частицы, которая не прикрыта соседней частицей со стороны потока. Исходя из предположения, что форма частицы шар, площадь лобового сечения I—I будет равна площади сегмента круга, отсекаемого касательной, проведенной под углом атаки α к поверхности соседней частицы.

Запишем уравнение моментов сил действующих на частицу сил, относительно опорной точки “а”:

$$M_a = Pd - Fh, \quad (1)$$

где M_a — сумма моментов всех сил, действующих на частицу; P, d — соответственно вес и плечо момента почвенной частицы; F, h — соответственно

сила и плечо лобового давления. Сила лобового давления равна:

$$F = 0.5C\rho_0V^2S, \quad (2)$$

где ρ_0 — плотность воды; V — скорость потока; S — площадь поперечного сечения; C — коэффициент формы.

Таким образом, из первого уравнения следует, что движение частицы начнется только в случае, когда момент силы лобового давления водного потока превысит момент силы тяжести, который остается постоянным для всех значений угла атаки. Момент силы давления водного потока с увеличением угла атаки постоянно возрастает, благодаря росту площади поперечного сечения частицы, на которую воздействует поток, до того момента, когда угол атаки достигнет значения угла γ (рис. 3). Угол γ образован касательной, проведенной из точки “а” к поверхности соседней частицы.

На рис. 4 показана схема приложения действующих на частицу сил при угле атаки большем угла γ . Исходя из схемы рисунка, запишем уравнение моментов сил относительно все той же точки “а”:

$$M_a = Pd - F_1h_1 + F_2h_2, \quad (3)$$

где F_1, F_2 — соответственно силы лобового давления, создающие момент против и по часовой стрелке; h_1, h_2 — соответственно плечи моментов против и по часовой стрелке. Остальные обозначения прежние.

Отличием уравнения (3) от (1) является наличие третьего члена, обусловленного тем, что струя как бы разделяется на две части, одна из которых продолжает поворачивать (отрывать) частицу от опоры, оказывая давление на часть поперечного сечения частицы площадью S_1 , другая — прижимать к ней, действуя на другую часть сечения площадью S_2 . Опрокидывающий момент, с ростом угла атаки, начинает уменьшаться.

Таким образом, угол атаки, равный углу γ , является критическим, поскольку именно при этом угле воздействие струи на почвенные частицы максимально, что и определяет максимальное значение интенсивности смыва. Для данной формы укладки и формы частиц зернистого грунта значение угла атаки, при котором интенсивность смыва максимальна, равно 41° , что вполне согласуется с данными экспериментов (рис. 2).

В заключение отметим, что значение угла атаки, при котором интенсивность смыва монофракционных образцов почвы максимальна, не зависит от скорости потока, размера и плотности частиц, а определяется лишь формой их укладки.

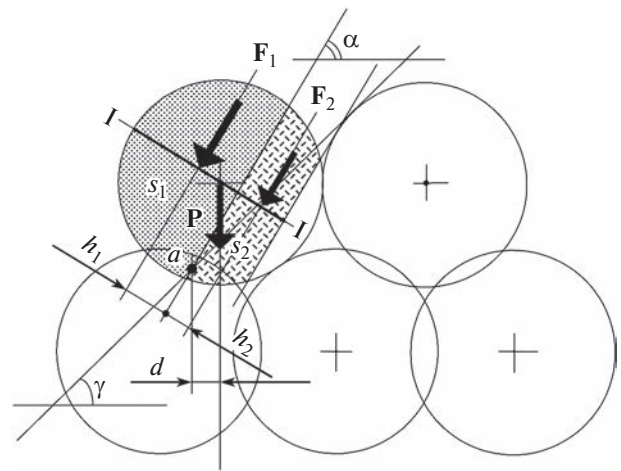


Рис. 4. Силы, действующие на частицу при угле атаки более критической величины (угол α больше угла γ). Пояснение обозначений приведено в тексте.

Fig. 4. Forces affecting the particle at the angle of attack higher than critical (angle α larger than angle γ). An explanation of the items is given in the text.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Интенсивность роста оврагов в значительной мере зависит от морфологии их вершин, прежде всего, вертикальных уступов и круто наклонных быстротиков с различной крутизной тальвега. Интенсивность смыва вершин оврагов, помимо гидрологических характеристик водных потоков, зависит и от угла сочленения русла быстрого течения с дном оврага (угла атаки).

Результаты экспериментов с размывом модельных образцов агрегированных связных грунтов свидетельствуют о более сложной картине изменения интенсивности смыва во всем возможном диапазоне углов атаки потока ($0.5-90^\circ$), чем это предполагалось ранее. На начальном этапе размыва максимум интенсивности смыва зафиксирован при угле атаки потока в узком диапазоне (около 40°). Эта закономерность может быть использована для расчетов скорости образования воронки размыва, образующейся в последующем. Величина угла наклона падающей струи влияет на интенсивность смыва и в самой воронке. Так, Ц.Е. Мирцхулавой экспериментально показано, что допускаемые донные скорости увеличиваются с ростом угла падения, и это увеличение тем более контрастно, чем больше сцепление грунта (Мирцхулава, 1970).

Предполагаются две основные причины изменения интенсивности размыва почв и грунтов при различных углах атаки — гидратационная и гидромеханическая. Первая обуславливает ослабление и разрушение межагрегатных связей проникающей в грунт водой, вторая — взаимодействием направления гидродинамического напора

и сил, удерживающих частицу (агрегат) на месте. Предполагается одновременное действие этих процессов с вероятным преобладанием одного из них в зависимости от прочности межагрегатных связей.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-27-00316, <https://rscf.ru/project/22-27-00316>. При подготовке модельных образцов использовалась инфраструктура научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева МГУ в рамках темы по госзаданию (№ 121051100166-4). Авторы благодарны своим коллегам О.Г. Бушуевой, Н.Г. Добровольской и З.П. Кирюхиной активным участникам экспериментов и обработки результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Арманд Д.Л. (1948). Обзор экспериментальных методов в геоморфологии // Проблемы физической географии. Т. XIII. М.—Л.: Изд-во АН СССР, С. 37—58.
- Бастраков Г.В. (1994). Эрозионная устойчивость рельефа и противоэрозионная защита земель. Брянск: Изд-во БГПИ, 260 с.
- География овражной эрозии / Е.Ф. Зорина. (2006). М.: Изд-во МГУ, 324 с.
- Золотов А.И. (2005). Оценка эрозионной устойчивости пахотных земель Ульяновского Предволжья с целью их противоэрозионного использования // XX пленарное межвуз. координац. совещ. по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов (Ульяновск, 13—15 октября 2005 г.) / Доклады и краткие сообщения. Ульяновск: УГПУ, С. 40—44.
- Косов Б.Ф., Никольская И.И. (1974). Экспериментальные исследования процесса развития оврага // Геоморфология. № 3. С. 39—45. <https://doi.org/10.15356/0435-4281-1974-3-39-45>
- Кузнецов М.С. Противоэрозионная стойкость почв. М.: Изд-во МГУ, 1981. 135 с.
- Ларионов Г.А., Бушуева О.Г., Горобец А.В. и др. (2018). Влияние угла атаки на скорость размыва связного зернистого грунта на примере черноземной почвы // Почвоведение. 2018. № 2. С. 253—256. <https://doi.org/10.7868/S0032180X18020132>
- Ларионов Г.А., Бушуева О.Г., Добровольская Н.Г. и др. (2011). Эродируемость модельной почвы различной плотности // Почвоведение. № 8. С. 995—999.
- Ларионов Г.А., Бушуева О.Г., Добровольская Н.Г. и др. (2014). Влияние температуры воды и влажности почвы на эродируемость образцов чернозема (модельный опыт) // Почвоведение. № 7. С. 890—896. <https://doi.org/10.7868/S0032180X14070107>
- Ларионов Г.А., Бушуева О.Г., Добровольская Н.Г. и др. (2016а). Оценка вклада сил негидравлической природы в нарушение связей между почвенными частицами в процессе водной эрозии // Почвоведение. № 5. С. 593—598. <https://doi.org/10.7868/S0032180X16050117>
- Ларионов Г.А., Добровольская Н.Г., Кирюхина З.П., Литвин Л.Ф. (2008). Влияние взвешенных наносов на эродируемость почв // Почвоведение. № 7. С. 871—876.
- Ларионов Г.А., Литвин Л.Ф., Краснов С.Ф. и др. (2016б). Экспериментальные исследования размыва береговых обрывов и откосов // Геоморфология. № 2. С. 51—58. <https://doi.org/10.15356/0435-4281-2016-2-51-58>
- Маккавеев Н.И. (1955). Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР, 346 с.
- Маккавеев Н.И., Хмелёва Н.В., Заитов И.Р., Лебедева Н.В. (1961). Экспериментальная геоморфология. М.: Изд-во Моск. ун-та, 194 с.
- Мирихулава Ц.Е. (1970). Инженерные методы расчета и прогноза водной эрозии. М.: Колос, 240 с.
- Courivaud J.-R., Fry J.-J., Bonelli S. et al. (2009). Measuring the erodibility of soil materials constituting earth embankments: a key input for dams and levees safety assessment // Hydro. 2009. 9 p.
- Dabney S.M., Shields F.D.-Jr., Temple D.M., Langendoen E.J. (2004). Erosion processes in gullies modified by establishing grass hedges // Transactions of the ASAE. Vol. 47. No. 5. P. 1561—1571.
- Hanson G.J., Cook K.R. (2004). Apparatus, test procedures, and analytical methods to measure soil erodibility in situ // Applied Engineering in Agriculture. American Society of Agricultural Engineers. Vol. 20. No. 4. P. 455—462. <https://doi.org/10.13031/2013.16492>
- Khalifa M.A., Zahra Kh.A. (2014). Collective Review in Particular Reference to Soil Erosion around Maritime Structures, Effects of the Angle of Wave: Attack on Coastal Areas Formation and Variation on Transport Rates // American Journal of Marine Science. Vol. 2. No. 1. P. 25—32. <https://doi.org/10.12691/marine-2-1-4>
- Kimiaghalam N., Clark S.P., Ahmari H. (2016). An experimental study on the effects of physical, mechanical, and electrochemical properties of natural cohesive soils on critical shear stress and erosion rate // International Journal of Sediment Research. Vol. 31. P. 1—15. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2015.01.001>
- Nearing M.A., Bradford J.M., Parker S.C. (1991). Soil Detachment by Shallow Flow at Low Slopes // Soil Science Society of America Journal. Vol. 55. No. 2. P. 339—344. <https://doi.org/10.2136/sssaj1991.03615995005500020006x>
- Nearing M.A., West L.T., Brown L.C. (1988). A Consolidation Model for Estimating Changes in Rill Erodibility // Transactions of the ASAE. Vol. 31. No. 3. P. 696—700. <https://doi.org/10.13031/2013.30769>
- Osipov V.I. (2014). Physicochemical Theory of Effective Stresses in Soils // Water Resources. Vol. 41. No. 7. P. 801—818. <https://doi.org/10.1134/S0097807814070094>

EXPERIMENTAL ESTIMATE OF EROSION MECHANISM AT THE EARLY STAGE OF GULLY FORMATION¹

**G. A. Larionov^a, S. F. Krasnov^a, L. F. Litvin^a, A. V. Gorobets^{a, #}, L. V. Kobylchenko (Kuksina)^a,
and N. R. Kriuchkov^b**

^aLomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia

^bLomonosov Moscow State University, Soil Science Faculty, Moscow, Russia

[#]E-mail: GorobetsAV@geogr.msu.ru

The article presents results of experiment and its theoretical justification aimed to study the mechanism and intensity of the early stage of gully head formation. The experiment was carried out using the jet installation that allows to change the angle of the water stream from 0.5 to 90° with the flow velocity of up to 6 m/s. The flow angle was changed with a 10° step, while the flow velocity was maintained in the range of 1.01–1.04 m/s. The intensity of soil erosion positively correlates with the flow angles (angles of attack) in the range from zero up to 40°. When the angle was increased to 50–90°, the intensity continuously declined. The lowest absolute values of erosion intensity were observed when the water flow was normal to the soil surface. There are two main reasons why the intensity of soil erosion changes with changing angle of stream flow; the first is hydraulic, the second is hydro-mechanical. The former determines weakening and destruction of inter-aggregate bonds by the water penetrating into the soil; the latter – by the combined vectors of forces of hydrodynamic head and forces keeping the particle (aggregate) in place. The experiment showed that the maximum impact of water jet on a separate soil particle occur at angle of 41°. The flow in a gully happens occasionally and the results obtained should be attributed to the early stage of erosion: the stage before formation of a so called gully headcut.

Keywords: gully headcut, erosion rate, jet installation, angle of attack, hydration, washout hydrodynamics

ACKNOWLEDGMENTS

The study was performed within the framework of the grant of the Russian Science Foundation No. 22-27-00316, <https://rscf.ru/en/project/22-27-00316/>. The preparation of model samples involved the infrastructure of the Makkaev Research Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Lomonosov Moscow State University within the framework of the state assignment No. 121051100166-4. The authors are grateful to their colleagues O.G. Bushueva, N.G. Dobrovol'skaya and Z.P. Kiryukhina for their active participation in experiments and data processing.

REFERENCES

- Armand D.L. Revue of experimental methods in geomorphology. *Problemy fizicheskoi geografii*. Vol. XIII. Moscow–Leningrad: AN SSSR (Publ.), 1948. P. 37–58. (in Russ.)
- Bastrakov G.V. (1994). *Erozionnaya ustoichivost' rel'efa i protiverozionnaya zashchita zemel'* (Erosion resistance of relief and anti-erosion protection of land. Bryansk: Izd-vo BGPI (Publ.), 260 p. (in Russ.)
- Courivaud J.-R., Fry J.-J., Bonelli S. et al. (2009). Measuring the erodibility of soil materials constituting earth embankments: a key input for dams and levees safety assessment. *Hydro*. 9 p.
- Dabney S.M., Shields F.D.-Jr., Temple D.M., Langendoen E.J. (2004). Erosion processes in gullies modified by establishing grass hedges. *Transactions of the ASAE*. Vol. 47. No. 5. P. 1561–1571.
- Hanson G.J., Cook K.R. (2004). Apparatus, test procedures, and analytical methods to measure soil erodibility in situ. *Applied Engineering in Agriculture. American Society of Agricultural Engineers*. Vol. 20. No. 4. P. 455–462. <https://doi.org/10.13031/2013.16492>
- Khalifa M.A., Zahra Kh.A. (2014). Collective Review in Particular Reference to Soil Erosion around Maritime Structures, Effects of the Angle of Wave: Attack on Coastal Areas Formation and Variation on Transport Rates. *American Journal of Marine Science*. Vol. 2. No. 1. P. 25–32. <https://doi.org/10.12691/marine-2-1-4>
- Kimiaghalam N., Clark S.P., Ahmari H. (2016). An experimental study on the effects of physical, mechanical, and electrochemical properties of natural cohesive soils on critical shear stress and erosion rate. *International Journal of Sediment Research*. Vol. 31. P. 1–15. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijsrc.2015.01.001>
- Kosov B.F., Nikol'skaya I.I. (1974). Experimental studies of the gully development process. *Geomorfologiya*. No. 3. P. 39–45. (in Russ.) <https://doi.org/10.15356/0435-4281-1974-3-39-45>
- Kuznetsov M.S. (1981). *Protiverozionnaya stoikost' pochvy* (Erosion resistance of soils). Moscow: MGU (Publ.), 1981. 135 p. (in Russ.)
- Larionov G.A., Bushueva O.G., Dobrovol'skaya N.G. et al. (2011). Erodibility of model soils with different densities. *Eurasian Soil Science*. Vol. 44. No. 8. P. 914–918. <https://doi.org/10.1134/S1064229311040065>

¹ For citation: Larionov G.A., Krasnov S.F., Litvin L.F. et al. (2023). Experimental estimate of erosion mechanism at the early stage of gully formation. *Geomorfologiya i Paleogeografiya*. Vol. 54. No. 2. P. 97–104 (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S2949178923010085>; <https://elibrary.ru/GQFSMY>

- Larionov G.A., Bushueva O.G., Dobrovol'skaya N.G. et al. (2014). Effect of the water temperature and soil moisture on the erodibility of chernozem samples: a model experiment. *Eurasian Soil Science*. Vol. 47. No. 7. P. 734–739. <https://doi.org/10.1134/S1064229314070096>
- Larionov G.A., Bushueva O.G., Dobrovol'skaya N.G. et al. (2016). Assessing the contribution of nonhydraulic forces to the destruction of bonds between soil particles during water erosion. *Eurasian Soil Science*. Vol. 49. No. 5. P. 546–550. <https://doi.org/10.1134/S1064229316050100>
- Larionov G.A., Bushueva O.G., Gorobets A.V., et al. (2018). Effect of impact angle on the erosion rate of coherent granular soil, with a chernozemic soil as an example. *Eurasian Soil Science*. Vol. 51. No. 2. P. 251–254. <https://doi.org/10.1134/S1064229318020072>
- Larionov G.A., Dobrovol'skaya N.G., Kiryukhina Z.P., Litvin L.F. (2008). Effect of suspended sediments on soil erodibility. *Eurasian Soil Science*. Vol. 41. No. 7. P. 768–773. <https://doi.org/10.1134/S1064229308070119>
- Larionov G.A., Litvin L.F., Krasnov S.F. et al. (2016). Experimental research of the cliffs and banks washaway. *Geomorfologiya*. No. 2. P. 51–58. (in Russ.). <https://doi.org/10.15356/0435-4281-2016-2-51-58>
- Makkaveev N.I. (1955). *Ruslo reki i eroziya v ee basseine* (River channel and erosion in its basin). Moscow: AN SSSR (Publ.), 346 p. (in Russ.)
- Makkaveev N.I., Khmeleva N.V., Zaitov I.R., Lebedeva N.V. (1961). *Eksperimental'naya geomorfologiya* (Experimental geomorphology). Moscow: Izd-vo Mosk. un-ta (Publ.), 194 p. (in Russ.)
- Mirtskhulava Ts.E. (1970). *Inzhenernye metody rascheta i prognoza vodnoi erozii* (Engineering methods of calculation and prediction of water erosion). Moscow: Kolos (Publ.), 240 p. (in Russ.)
- Nearing M.A., Bradford J.M., Parker S.C. (1991). Soil Detachment by Shallow Flow at Low Slopes. *Soil Science Society of America Journal*. Vol. 55. No. 2. P. 339–344. <https://doi.org/10.2136/sssaj1991.03615995005500020006x>
- Nearing M.A., West L.T., Brown L.C. (1988). A Consolidation Model for Estimating Changes in Rill Erodibility. *Transactions of the ASAE*. Vol. 31. No. 3. P. 696–700. <https://doi.org/10.13031/2013.30769>
- Osipov V.I. (2014). Physicochemical Theory of Effective Stresses in Soils. *Water Resources*. Vol. 41. No. 7. P. 801–818. <https://doi.org/10.1134/S0097807814070094>
- Zolotov A.I. (2005). Assessment of Erosion Resistance of Arable Lands of the Ul'yanovsk Pre-Volga Region for the Purpose of their Anti-erosion Use. *XX plenarnoe mezhvuzovskoe koordinatsionnoe soveshchanie po probleme erozionnykh, ruslovykh i ust'evykh protsessov (Ul'yanovsk, 13–15 oktyabrya 2005 g.)*. *Doklady i kratkie soobshcheniya*. Ul'yanovsk: UGPU (Publ.), P. 40–44. (in Russ.)
- Zorina E.F. (Ed.). (2006). *Geografiya ovrazhnoi erozii* (Geography of gully erosion). Moscow: Izd-vo MGU (Publ.), 324 p. (in Russ.)