

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

Географический факультет

Научно-исследовательская лаборатория эрозии почв
и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева

ЭРОЗИЯ ПОЧВ И РУСЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

Выпуск 21

Под редакцией профессора Р.С. Чалова

Географический факультет МГУ
Москва

2019

УДК 6.31.4: 55.3
ББК 26
Э74

Э74 Эрозия почв и русловые процессы. Тр. науч.-исслед. лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева. Вып. 21. Под ред. профессора Р.С. Чалова. М.: Географический факультет МГУ имени М. В. Ломоносова. 2019. 297 с., илл.

Сборник статей – очередной выпуск трудов научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева МГУ имени М.В. Ломоносова. В статьях сборника излагаются результаты фундаментальных и прикладных, натурных, теоретических и экспериментальных исследований, выполненных лабораторией в последние два года по планам НИР лаборатории (Госзадание), грантам РНФ и РФФИ, госконтрактам и хозяйственным договорам. Рассматриваются механизмы эрозии склоновыми потоками, эрозии почв и овражной эрозии в условиях изменения землепользования, техногенных воздействий и антропогенных загрязнений, русловые процессы на малых, средних и больших реках, их трансформация при естественных и антропогенных изменениях факторов, прогнозирование и методы управления процессами. Представляет интерес для специалистов, научных сотрудников, преподавателей, аспирантов и студентов, занимающихся изучением эрозионных и русловых процессов, гидрологов, почвоведов, геоморфологов, работников водных путей.

Сборник подготовлен по плану НИР (ГЗ) научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева МГУ имени М. В. Ломоносова.

Печатается по решению НТС НИЛаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева за счет средств лаборатории

Рецензенты:

доктор географических наук, профессор С.И. Болысов
доктор географических наук, профессор Н.Н. Назаров

Печатается по постановлению Учёного совета географического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

УДК 6.31.4: 55.3
ББК 26

ISBN © Географический факультет МГУ, 2019

© Научно-исследовательская лаборатория эрозии почв
и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева, 2019
© Коллектив авторов, 2019

Научное издание

Эрозия почв и русловые процессы, вып. 21

Подписано в печать 2019. Заказ №

Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 17. Тираж 200 экз.

ООО "Компания ПринтКоВ". 105064, г. Москва, ул. Земляной Вал, д. 7

Сурмач Г.П. Рельефообразование, формирование лесостепи, современная эрозия и противозерозионные мероприятия. Волгоград. 1992.

Федеральная служба государственной статистики. 1996-2012 гг. (<http://www.gks.ru>).

Чижикова Н.А., Голосов В.Н., Литвин Л.Ф. Анализ трендов изменения климатических факторов развития эрозионных процессов в пределах Русской равнины // Пространственно-временные закономерности развития современных процессов природно-антропогенной эрозии на Русской равнине. Казань: Изд-во АН РТ. 2019.

Швебс Г.И. Теоретические основы эрозиоведения. Киев-Одесса: Вища школа. 1981.

Ясинский С.В. Формирование гидрологического режима водосборов малых равнинных рек. Автореф. дис. ... докт. геогр. наук. М.: ИГ РАН. 2012.

Булигин С.Ю. Формування екологічно сталих агроландшафтів: Харків: Вид-во ХДАУ. 2001.

Ioffe G., Nevedova T. Marginal Farmland in Russia Eurasian Geography and Economics. 2004. Vol. 45. Iss. 1.

Meyfroidt P., Schierhorn F., Prishceпов A.V., Muller D., Kuemmerle T. Drivers, Constraints and Trade-Offs Associated Cropland in Russia, Ukraine and Kazakhstan // Environmental Chnge. No 20. Vol. 37. 2016.

Wischmeier W.H., Smith D.D. Predicting rainfall erosion losses // Agric. Handbook. Washington. 1978. No 537.

**Г.А. Ларионов, О.Г. Бушуева, А.В. Горобец, Н.Г. Добровольская,
З.П. Кирюхина, С.Ф. Краснов, Л.Ф. Литвин**

КИНЕТИЧЕСКАЯ КОМПОНЕНТА СКЛОНОВЫХ ПОТОКОВ И ЭРОДИРУЕМОСТЬ ПОЧВ В ИХ РУСЛАХ*

Введение

Эродируемость (смываемость) почвы, то есть степень податливости почвы размыву водным потоком и/или ударному действию дождевых капель, один из основных факторов водной эрозии. Для количественной оценки этого параметра, используемого как в статистических, так и в физически обоснованных моделях смыва почв, предложено более десятка различных подходов и способов [Лисецкий и др., 2012]. В свою очередь, в большинстве этих предложений в качестве одного из определяющих параметров, помимо свойств самой почвы, предлагаются кинетические характеристики склоно-

* Выполнено по плану НИР Научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Макавеева (ГЗ).

вых потоков – неразрывающаяся скорость [Мирцхулава, 1970; Кузнецов, 1981], критическое касательное напряжение [Foster, 1982], мощность горизонтальной струи воды [Бастраков, 1980]. Нами для оценки эродируемости применен показатель эродируемости в виде частного от деления интенсивности смыва на куб скорости потока, который для водных потоков численно равен половине удельной мощности потока [Nearing et al., 1991]. Теоретически правомерность использования этого параметра была показана в рамках гидрофизической модели эрозии [Ларионов, Краснов, 2000] и подтверждена экспериментально опытами по размыву почв в гидравлическом лотке [Ларионов, Бушуева и др., 2010].

Известно, что силы сцепления в почве намного больше, чем силы гидравлического воздействия мелководных потоков [Nearing et al., 1991; Nearing, Parker et al., 1991] и, тем не менее, смыв почвы в их руслах достаточно активен. Разрешить этот парадокс может предположение, что межагрегатные связи в почве разрушаются благодаря воздействию на них самой размывающей текущей водой. Так, при положительном влиянии предварительного увлажнения почвы на ее противэрозионную стойкость, что неоднократно подтверждалось экспериментально, однако, чрезмерная насыщенность почвы водой по данным А.М. Бурыкина [1960] сказывается отрицательно. Именно такое чрезмерное насыщение и происходит в руслах потоков на склонах.

Исследование вероятного разрушения межагрегатных связей под воздействием насыщения верхних слоев почвы водой проводилось нами в гидравлическом лотке. Насыщение поверхностных слоев почвы водой достигалось в эксперименте чередованием пауз, во время которых неподвижный слой воды глубиной 1 см поддерживался над образцом почвы, и активных фаз с пуском воды в лоток. При этом во время активных фаз эксперимента весь верхний слой почвенных агрегатов одновременно смывался с поверхности образца почвы сразу после пуска воды [Ларионов, Бушуева и др., 2016]. Было показано, что поток может срывать частицы верхнего слоя почвы, когда силы сцепления между его агрегатами и частицами нижележащего слоя исчезнут, а сила тяжести будет уменьшена за счет гидростатического взвешивания. При этом следует помнить, что почва при наличии свободной воды на ее поверхности диспергируется, по крайней мере, в ее верхнем моноагрегатном слое. Остальные слои, находясь под действием силы тяжести верхних слоев почвы, диспергируются не полностью.

По мере увеличения скорости потока растет и воздействие гидродинамических сил на почву, поэтому при больших скоростях потока можно ожидать изменения соотношений этих сил и сил воздействия на межагрегатные связи самой воды. По-видимому, изменение этого соотношения должно сказаться на изменении эродируемости почв в различных областях скоростного поля. Возможно и появление новой граничной скорости (или диапазона скоростей), по достижении или превышении которой эродируемость почвы кардинально меняется.

Исследования эродированности почв, как правило, проводятся при скоростях водных потоков до 1,5 м/с и не охватывают всего природного диапазона скоростей в руслах временных водотоков. Скорости до 1,5 м/с фиксируются в природных условиях как во время снеготаяния на пахотных наиболее крутых склонах, так и во время прохождения ливневых осадков максимальной интенсивности. Однако в руслах равнинных оврагов наблюдались и более высокие значения. Так, во время схода селя в овраге Бабий Яр (Киевское Приднепровье) скорости потока превышали 5 м/с [География ..., 2006].

Цель данного исследования заключалась в оценке эродированности почв монофракционной почвы различной плотности при её размыве водными потоками с широким интервалом скоростей (от 0,5 до 6,7 м/с).

Объекты и методы исследований

В качестве объекта исследований использовались образцы пахотного горизонта легкого глинистого выщелоченного чернозема, отобранные в Волковском районе Тульской области. Основные физико-химические свойства почвы приведены в работе [Ларионов, Бушуева и др., 2018]. При проведении экспериментов использовалась фракция агрегатов 1-2 мм, полученная из воздушно-сухой почвы с помощью сухого просеивания. Из этой фракции отбирали навески, чтобы получить образцы с плотностью от 1,2 до 1,5 г/см³ с шагом 0,1 г/см³. Навески насыщали водой до влажности равной 24% от веса воздушно-сухой почвы и выдерживали в течение 18-20 часов. Методика подготовки образцов почвы заданной плотности ранее подробно изложена в работах [Ларионов, Бушуева и др., 2016, 2018; Ларионов, Добровольская и др., 2017].

Исследования проводились на гидравлическом лотке и на специально сконструированной ударно-струйной установке, позволявшей изменять скорости потока во всем необходимом диапазоне. Для получения на установке высоких скоростей потока использовали струю воды из насадки сечением 2×2 см, которая имела наклон около 2° в сторону образца, чтобы размыв осуществлялся только за счет касательных сил. Предварительно увлажненный образец почвы помещался в металлическую кассету квадратного сечения (1,7×1,7 см). Почву экструдировали из кассеты подъемным винтом. Во время проведения опытов температуру воды в системе поддерживали постоянной на уровне 18–21°C, поскольку ранее было установлено существенное влияние температуры на скорость смыва почвы [Ларионов, Бушуева и др., 2014]. Скорость струи воды изменялась в диапазоне от 0,5 до 6,7 м/с; ее величина определялась по расходу с помощью водомерного счетчика.

Интенсивность смыва рассчитывалась, исходя из массы смытой почвы, времени размыва и площади размываемой поверхности образца. Для оценки эродированности использовался показатель в виде частного от деления интенсивности смыва на куб скорости потока, то есть показателя, кото-

рый для водных потоков численно равен половине удельной мощности потока [Nearing et al., 1991]. Отсюда, в соответствии с гидрофизической моделью эрозии [Ларионов, Краснов, 2000], эродируемость можно записать как:

$$k = \frac{q}{V^3}$$

где k – эродируемость почвы, $\text{м}^{-2} \cdot \text{с}^2$; q – интенсивность смыва, $\text{г}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$; V – скорость потока, $\text{м}/\text{с}$.

Графически эродируемость выражается угловым коэффициентом на графиках зависимости интенсивности смыва от куба скорости потока. Методической основой анализа результатов экспериментов было получение данных зависимостей для каждой серии опытов при заданной плотности почвы во всем диапазоне скоростей потока. Серия опытов включала в себя эксперименты с образцами фиксированной (единой) плотности почвы в интервале скоростей потока от 0,5 до 6,7 $\text{м}/\text{с}$ в 4–8-кратной повторности (всего было испытано порядка 300 образцов).

Результаты и обсуждение

Анализ полученных зависимостей интенсивности смыва почвы от куба скорости потока для всех серий опытов показал существование статистически достоверных положительных связей между этими параметрами.

Эксперименты по размыву черноземной почвы (образцы нарушенного сложения из фракции агрегатов 0,5–2 мм , плотностью 1,2 $\text{г}/\text{см}^3$) в гидравлическом лотке со скоростями потока в диапазоне от 0,5 до 1,6 $\text{м}/\text{с}$ подтверждают эти предположения. Установлено, что в интервале скоростей от 0,77 до 0,81 $\text{м}/\text{с}$ наступает момент резкого нарастания скорости смыва благодаря тому, что все большее число мгновенных скоростей превышает силу сопротивления частиц срыву [Ларионов, Бушуева и др., 2010]. При скорости, превышающей 0,81 $\text{м}/\text{с}$, прямая линия тренда продолжается до скорости порядка 1,55 $\text{м}/\text{с}$ (рис. 1).

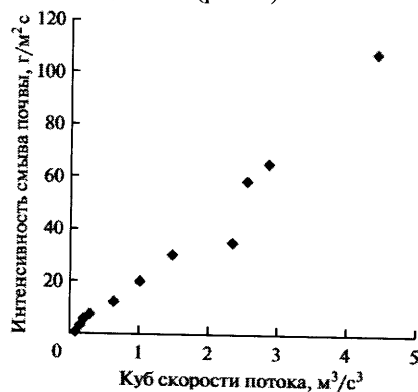


Рис. 1. Зависимость интенсивности смыва образцов почвы от куба средней скорости потока

В дальнейшем в экспериментах на гидравлическом лотке с аналогичными образцами было установлено, что интенсивность смыва при высо-

ких скоростях оказалась несколько большей, чем для области скоростей в несколько десятков сантиметров в секунду, а, соответственно, эродируемость почвы оказалась значительно ниже, чем в области прямолинейной зависимости (рис. 2). Все графики демонстрируют сходные результаты – на зависимости интенсивности смыва от куба скорости отчетливо выделяются две области скоростей, отличающиеся скоростью изменения интенсивности смыва; и разделяющий их перегиб – предположительно, находится в области скоростей около 1,4-1,5 м/с [Ларионов, Литвин др., 2015].

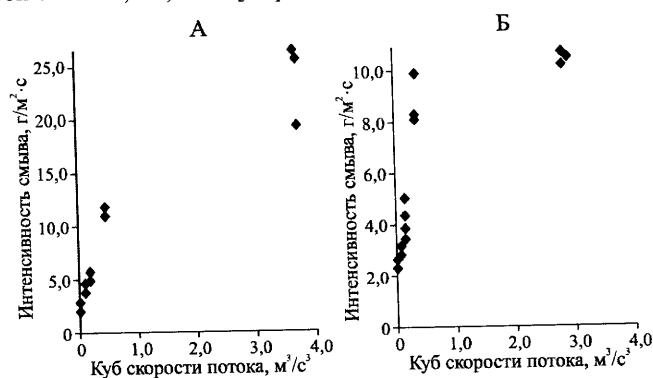


Рис. 2. Зависимость интенсивности смыва модельных образцов почвы различной плотности от куба скорости потока: А – плотность 1,4 г/см³; Б – плотность 1,5 г/см³.

Общая тенденция в соотношениях интенсивность смыва – куб скорости потока прослеживается также в опытах с использованием ударно-струйчатой установки при широком диапазоне плотности образцов. Значения угловых коэффициентов (т.е. эродируемости) на графиках значительно отличаются для области скоростей ниже граничной и выше ее (рис. 3, А, Б). Так, например, при плотности почвы равной 1,4 г/см³ для низких скоростей и высоких скоростей потока уравнения имеют, соответственно, вид:

$$q = 5,73 v^3 + 4,67, \quad (1)$$

$$q = 1,86 v^3 + 23,71. \quad (2)$$

Величина эродируемости в формулах представлена угловым коэффициентом уравнения. В уравнении (1) угловой коэффициент характеризует эродируемость в дограничной области скоростей, а в уравнении (2) – при более высоких скоростях. Совместное решение уравнений (1) и (2) позволяет рассчитать величину граничной скорости, при которой эродируемость существенно изменится. В данном случае такая скорость равна 1,70 м/с. (Эту скорость целесообразно называть граничной, поскольку в литературе критической скоростью называют «размывающую» скорость, оцениваемую

для почв первыми десятками сантиметров в секунду [Кузнецов, 1981]). Аналогично рассчитывались граничные скорости для других плотностей почвы (табл. 1).

Помимо кинетической компоненты в механизмах размыва почвы микрорусловыми потоками на склонах существенное влияние на эродируемость почвы оказывают физические свойства почв – плотность и агрегатный состав модельных образцов. Накоплен значительный опыт экспериментальной оценки этих факторов, в особенности по показателям агрегированности почв [Кузнецов, 1981]. Положительное влияние роста плотности почв на противозрозионную устойчивость почв с нарушенным сложением и насыпных грунтов установлено экспериментально [Дадаев, 1956; Мирцхулава, 1957; Кузнецов, 1981; Ларионов, Литвин и др., 2015].

Обращает на себя внимание, что величина граничной скорости несколько возрастает от 1,58 до 1,72 м/с при увеличении плотности почвы от 1,2 до 1,5 г/см³ (табл. 1). Эродируемость почв в дограничном диапазоне скоростей уменьшается от 171,53 до 3,17 м²·с² при увеличении плотности от 1,2 до 1,5 г/см³. Уменьшение эродируемости при увеличении плотности характерно и для потоков со скоростями выше граничной. В данном случае эродируемость изменяется от 36,88 до 0,88 м²·с² (табл. 1).

Таблица 1. Эродируемость модельной почвы различной плотности в широком интервале скоростей потока

Плотность почвы, г/см ³	Граничная скорость, м/с	Эродируемость до граничной скорости, м ² ·с ²	Эродируемость после граничной скорости, м ² ·с ²
фракция 1–2 мм			
1,2	1,58	171,53	36,88
1,3	1,68	49,24	3,48
1,4	1,70	5,73	1,86
1,5	1,72	3,17	0,88
фракция <1 мм			
1,4	1,03	27,05	1,58

Влияние агрегатного состава на эрозию почв представляется менее определенным. При размыве образцов с размером почвенных агрегатов <1 мм и плотностью 1,4 г/см³ рассчитанная граничная скорость оказалась заметно меньшей, чем для образцов фракции агрегатов 1–2 мм аналогичной плотности – 1,03 и 1,7 м/с (табл. 1). Изменялась и эродируемость почвы. При этом в случае размыва образцов фракции <1 мм в дограничной области скоростей эродируемость составляла 27,05 м²·с², что в 4,7 раза больше, чем для фракции агрегатов 1–2 мм – 5,73 м²·с². В тоже время в области высоких скоростей эродируемость для этих случаев приблизительно равна 1,58 и 1,86 м²·с², соответственно (табл. 1). Конечно, диапазон агрегатных состояний в этих экспериментах весьма узок, и для повышения надежности оценки влияния этого фактора на эродируемость необходимы дополнительные исследования.

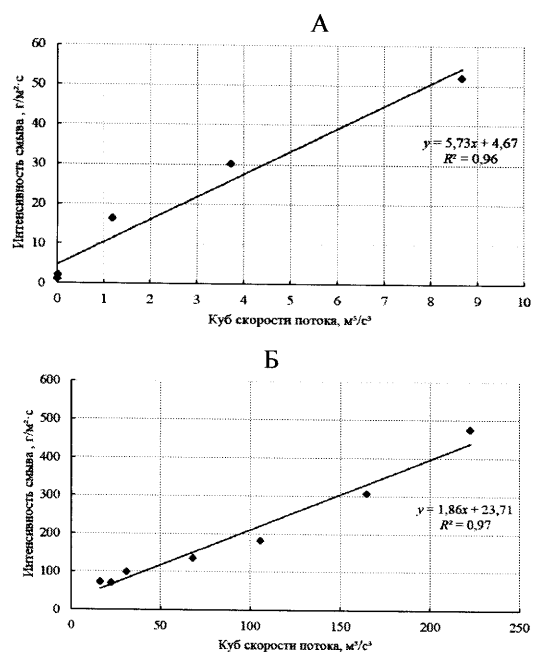


Рис. 3. Зависимость интенсивности смыва модельных образцов почвы с плотностью $1,4 \text{ г/см}^3$ от куба скорости потока. А – в области скоростей ниже граничной; Б – в области скоростей выше граничной.

Возможно, что причиной существования двух скоростных областей динамики эродируемости монофракционной почвы является следующее. Как известно, почва состоит преимущественно из агрегатов, которые слагаются элементарными глинистыми частицами, связанными между собой силами сцепления, включая амфифильные молекулы гумусовых кислот [Шеин, Милановский, 2003; Шеин, 2005]. Амфифильность гумусовых кислот обусловлена их способностью связывать элементарные почвенные частицы как гидрофобными, так и гидрофильными частями. Но так как гидрофобные части молекул гумусовых кислот не растворяются в воде, такие агрегаты проявляют более высокую устойчивость к разрушению водой. Поэтому межагрегатные связи слабее внутриагрегатных. При подаче воды на поверхность размываемого образца почвы, она проникает в нижележащие слои и нарушает, в первую очередь, межагрегатные связи, которые в условиях эксперимента возникают лишь при окончательном формировании образца, когда его средняя плотность доводится до заданной величины.

В этом случае поток захватывает практически свободно лежащие на поверхности почвы агрегаты из ее верхнего слоя. Об этом свидетельствуют наши исследования [Ларионов, Бушуева и др., 2016], так как после паузы, в

продолжение которой почва оставалась под слоем воды, водный поток срывает порой целую группу агрегатов поверхностного слоя, которая переносится потоком, сохраняя связи между собой. Это можно объяснить тем, что между соседними агрегатами в горизонтальной плоскости межагрегатный компонент может сохраняться, так как расклинивающей силе водных пленок противостоит изначальное сжатие агрегатов при формировании образцов.

Следующий, пригруженный сверху, нижний слой агрегатов не насыщается водой до предела, то есть до состояния, чтобы межагрегатное взаимодействие отсутствовало. Поэтому для насыщения пленочной влаги между почвенными агрегатами требуется некоторый промежуток времени после срыва потоком их верхнего слоя, так как диффузия воды происходит медленно. Только в том случае, когда сила сцепления практически примет нулевое значение, а подъемная сила воды уменьшит силу земного притяжения, поток воды может захватить вышедшие на поверхность агрегаты нижнего слоя почвы.

Такой процесс продолжается до тех пор, пока скорость потока не увеличится настолько, что межагрегатное взаимодействие уже не может противостоять его силе. При этом процесс смыва переходит в следующую стадию, когда эродируемость уменьшается более чем в 3-4 раза. На этой стадии поток уже постоянно преодолевает силу сцепления между агрегатами, и эродируемость стабилизируется, по крайней мере, до скорости потока равной 6-7 м/с.

Заключение

Экспериментально установлено, что при размыве монофракционной почвы (фракция агрегатов 1-2 мм) нарушенного сложения с различной плотностью потоками со скоростями выше 1,6-1,7 м/с эродируемость существенно (в 3-4 раза) снижается по сравнению с эродируемостью в руслах менее быстрых потоков. Вероятно, изменение интенсивности размыва происходит не мгновенно, а в некотором узком диапазоне скоростей потока, который находится в интервале – 1,6-1,7 м/с. Основной причиной является изменение соотношений диспергирующего воздействия на почву стекающей жидкости и мобилизирующих наносы гидродинамических сил самого потока.

Эксперименты с размывом почвы на ударно-струйной установке продемонстрировали четкую зависимость эродируемости и интенсивности размыва почв нарушенного сложения от ее плотности в диапазоне 1,2-1,5 г/см³.

ЛИТЕРАТУРА

- Бастраков Г.В.* Эрозионная устойчивость рельефа и противозеро-
зная защита земель. Брянск: Изд-во БГПИ. 1994.
Бурыкин А.М. Влажность почвы и эрозия (на примере влажных суб-
тропиков СССР) // Почвоведение. 1960. № 3.
География овражной эрозии. М.: Изд-во МГУ. 2006.
Дадаев Г. Устойчивость уплотненных грунтов против размыва // Социалистическое сельское хозяйство Азербайджана. 1956. № 6.

Кузнецов М.С. О влиянии связности почвенных зерен друг с другом на противозерозионную стойкость светло-каштановых почв Ергеней // Научные докл. высшей школы. Сер. биол. науки. 1967. № 4.

Кузнецов М.С. Противозерозионная стойкость почв. М.: Изд-во МГУ. 1981.

Ларионов Г.А., Бушуева О.Г., Добровольская Н.Г., Кирюхина З.П., Краснов С.Ф., Литвин Л.Ф., Муракаев Р.Р. Определение гидрофизических параметров почвы в модели эрозии // Почвоведение. 2010. № 4.

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 образцов чернозема (модельный опыт) // Почвоведение. 2014. № 7.

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 связей между почвенными частицами в процессе водной эрозии // Почвоведение. 2016. № 5.

Ларионов Г.А., Бушуева О.Г., Горобец А.В., Добровольская Н.Г., Кирюхина З.П., Краснов С.Ф., Литвин Л.Ф., Максимова И.А., Судницын И.И. Экспериментальное исследование факторов, влияющих на эродируемость почв // Почвоведение. 2018. № 3.

Ларионов Г.А., Добровольская Н.Г., Кирюхина З.П., Краснов С.Ф., Литвин Л.Ф., Горобец А.В., Судницын И.И. Влияние плотности почвы, сопротивления разрыву и инфильтрации воды на скорость разрушения межагрегатных связей // Почвоведение. 2017. № 3.

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

Ларионов Г.А., Литвин Л.Ф., Добровольская Н.Г., Кирюхина З.П., Краснов С.Ф., Горобец А.В., Бушуева О.Г. Теоретические и экспериментальные исследования поверхностной эрозии // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 19. М.: Географ. ф-т МГУ. 2015.

Лисецкий Ф.Н., Светличный А.А., Черный С.Г. Современные проблемы эрозиоведения. Белгород: Константа. 2012.

Мицхулава Ц.Е. К вопросу устойчивости связных грунтов размыву // Труды ГрузНИИГиМ. 1957. Вып.18-19.

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

Шеин Е.В. Курс физики почв. М.: Изд-во МГУ. 2005.

Шеин Е.В., Милановский Е.Ю. Роль и значение органического вещества в образовании и устойчивости почвенных агрегатов // Почвоведение. 2003. № 1.

Foster G.R. Modeling the erosion process // Hydrologic Modeling of Small Watersheds. No. 5. 1982.

Nearing M.A., Bradford J.M., Parker S.C. Soil detachment by shallow flow at low slopes // Soil Sci. Soc. Am. J. 1991. Vol. 55. No. 2.

Nearing M.A., Parker S.C., Bradford J.M., Elliot W.J. Tensile strength of thirty-three saturated repacked soils // Soil Sci. Soc. Am. J. 1991. Vol. 55. No. 6.