

ДЕГРАДАЦИЯ,
ВОССТАНОВЛЕНИЕ И ОХРАНА ПОЧВ

УДК 631.4

ЭРОДИРУЕМОСТЬ МОДЕЛЬНОЙ ПОЧВЫ
В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ СКОРОСТЕЙ ВОДНОГО ПОТОКА

© 2019 г. Г. А. Ларионов^а, * , А. В. Горобец^а, Н. Г. Добровольская^а,
З. П. Кирюхина^а, С. Ф. Краснов^а, Л. Ф. Литвин^а

^аМГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

*e-mail: larionov425@mail.ru

Поступила в редакцию 04.07.2018 г.

После доработки 30.01.2019 г.

Принята к публикации 21.02.2019 г.

Экспериментально показано, что существуют две области скоростей водных потоков, в которых величины эродированности монофракционной почвы (фракция агрегатов 1–2 мм) резко различаются между собой. В диапазоне низких скоростей эродированность изменяется от 171.53 до $3.17 \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^2$ при увеличении плотности почвы от 1.2 до $1.5 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$, а в области высоких скоростей она составляет $36.88\text{--}0.88 \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^2$. Совместное решение уравнений для двух диапазонов скоростей позволило получить граничные значения скорости потока, выше которой в расчетах нужно учитывать иные значения эродированности. Граничные значения скорости для данной модельной почвы находятся в пределах $1.6\text{--}1.7 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Причина этих явлений кроется в том, что при малых скоростях происходит удаление водой агрегатов, потерявших связь с основной массой почвы в результате ее пептизации водой, а при высоких скоростях преимущественно за счет гидродинамических сил потока воды.

Ключевые слова: интенсивность смыва, граничная скорость потока, монофракционная почва, межагрегатные связи, расклинивающее действие пленочной влаги, выщелоченный чернозем (Luvic Chernozem (Pachic))

DOI: 10.1134/S0032180X19090041

ВВЕДЕНИЕ

Обычно исследования интенсивности смыва и эродированности почв проводятся при скоростях водного потока не выше $1\text{--}1.5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Именно такие скорости характерны для склоновых и овражных потоков [1]. В диапазоне до $1.5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ прослеживается прямая зависимость интенсивности смыва от куба скорости потока, за исключением малых скоростей, когда лишь часть пульсационных значений скорости способна срывать частицы почвы [10]. При этом наблюдается резкое уменьшение интенсивности размыва при скоростях, когда только отдельные пульсации скорости потока способны захватывать отдельные частицы почвы [4].

Известно, что силы сцепления в почве намного (на 3 порядка) превосходят гидравлические силы мелководных потоков, тем не менее, смыв почвы происходит [15, 16]. Это связано с тем, что вода, как вещество дипольного строения, способна проникать в дисперсную систему почвы и приводит к ее пептизации. При наличии воды на поверхности почвы капиллярные силы, которые стягивают частицы, исчезают, как только почва достигает полной водонасыщенности. Затем явления, протекающие согласно теории Де-

рягина–Ландау–Фервея–Овербека на молекулярном уровне, приводят к ослаблению и нарушению связей между отдельными частицами почвы [2].

Таким образом, поток воды может срывать частицы верхнего слоя, когда силы сцепления между его агрегатами и частицами нижележащего исчезнут, а сила тяжести будет уменьшена за счет гидростатического взвешивания. Но по мере увеличения скорости потока растет и воздействие гидродинамических сил на почву. Поэтому при значительных скоростях потока можно ожидать появления новой граничной скорости, то есть скорости, превышение которой заметно изменяет процесс смыва.

О необходимости исследования размыва почвы в более широком диапазоне скоростей свидетельствуют и результаты многолетних исследований на Кошоктонской эрозионной опытной станции США, согласно которым вклад дождей редкой обеспеченности в суммарный многолетний смыв с полевых водосборов достигает 60–70% [14].

Цель работы – оценка динамики интенсивности смыва и эродированности, а также нахождение граничной скорости при размыве монофракци-

онных образцов чернозема различной плотности, определяемых в широком диапазоне скоростей потока ($0.5\text{--}6.7 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$).

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

В качестве объекта исследования использовали образцы пахотного горизонта легкоглинистого выщелоченного чернозема (Luvic Chernozem (Pachic)), отобранные в Воловском районе Тульской области. Основные физико-химические свойства и гранулометрический состав пахотного горизонта чернозема приведены в работе [8]. При проведении экспериментов использовали фракцию агрегатов 1–2 мм, полученную из воздушно-сухой почвы с помощью сухого просеивания. Из этой фракции почвы отбирали навески различной массы, чтобы получить заданные величины плотности от 1.2 до $1.5 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$ с шагом $0.1 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$. Навески насыщали дистиллированной водой до влажности, равной 24% от веса воздушно-сухой почвы, и выдерживали в закрытых алюминиевых бюксах в течение 18–20 ч. Выбор данной влажности обусловлен наименьшей интенсивностью размыва монофракционных образцов пахотного горизонта чернозема [6].

Затем навеску делили на четыре части, которые поочередно переносили в металлическую кассету (размер $1.7 \times 1.7 \times 6 \text{ см}$) с подвижным вкладышем. Каждую порцию навески разравнивали и уплотняли до заданной плотности с помощью ручного пресса. Методика подготовки образцов почвы заданной плотности подробно изложена в работах [7–9].

Для получения высоких скоростей потока использовали струю воды из насадки сечением $2 \times 2 \text{ см}$, которая имела наклон в сторону поверхности образца почвы около 2° . Такой угол наклона насадки был выбран, чтобы размыв образца осуществлялся только за счет касательных сил. Почву извлекали из кассеты подъемным винтом. Опыты проводили до полного размыва образца. В некоторых вариантах опыта с плотностью $1.5 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$ при малых скоростях потока ($0.65, 0.79$ и $1.06 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$) размыв проводили в течение 1 ч, затем опыт прекращали, остатки образца почвы извлекали из кассеты, высушивали до постоянного веса и взвешивали. Количество смытой почвы определяли как разность между исходным весом образца и остатком. Температуру воды во время проведения опытов поддерживали на уровне $18\text{--}20^\circ\text{C}$, поскольку ранее было показано влияние температуры потока на интенсивность смыва почвы [6]. Скорость струи воды изменяли в диапазоне от 0.5 до $6.7 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$.

Интенсивность смыва (q , $\text{г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$) рассчитывали, исходя из массы смытой почвы, времени размыва и площади размываемой поверхности.

Для оценки эродируемости почвы использовали показатель в виде частного от деления интенсивности смыва на удельную мощность потока.

В соответствии с гидрофизической моделью эрозии [10] эродируемость почвы (k , $\text{м}^{-2} \cdot \text{с}^2$) равна:

$$k = \frac{q}{P},$$

где q – интенсивность смыва, $\text{г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$; P – удельная мощность потока, $\text{г} \cdot \text{с}^{-3}$. Удельная мощность потока равна произведению касательного напряжения на скорость потока [15].

Графически эродируемость можно определить как коэффициент угла наклона на графиках зависимости интенсивности смыва от удельной мощности потока. Методической основой анализа результатов экспериментов являлось получение таких зависимостей для каждой серии экспериментов – совокупности опытов при единой плотности во всем диапазоне скоростей потока. Эксперименты проводили для каждой плотности почвы в диапазоне скоростей потока от 0.5 до $6.7 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ в 4–8-кратной повторности – всего около 300 образцов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ графиков зависимости интенсивности смыва почвы от удельной мощности потока для всех серий опытов показал, что существуют прямые связи между этими параметрами с высокой достоверностью. Однако значения угловых коэффициентов (эродируемости) значительно отличаются для области скоростей ниже граничной и выше ее (рис. 1). Например, для низких и высоких скоростей потока при плотности почвы, равной $1.4 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$, уравнения, соответственно, имеют вид:

$$q = 5.73P + 4.67, \quad (1)$$

$$q = 1.86P + 23.71, \quad (2)$$

где P – удельная мощность потока.

Совместное решение данных уравнений позволяет рассчитать величину скорости, при которой эродируемость существенно изменяется. В данном случае она равна $1.70 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Эту скорость целесообразно называть граничной, поскольку в литературе критической скоростью называют “размывающую” скорость, оцениваемую для почв первыми десятками сантиметров в секунду [3]. Аналогично рассчитывали граничные скорости для других плотностей почвы (табл. 1).

Величина эродируемости в дограничном диапазоне скоростей представлена угловым коэффициентом уравнения – число, стоящее перед P в уравнении (1), характеризует дограничную область скоростей, в уравнении (2) – после нее. Также имеются два свободных члена в уравнении

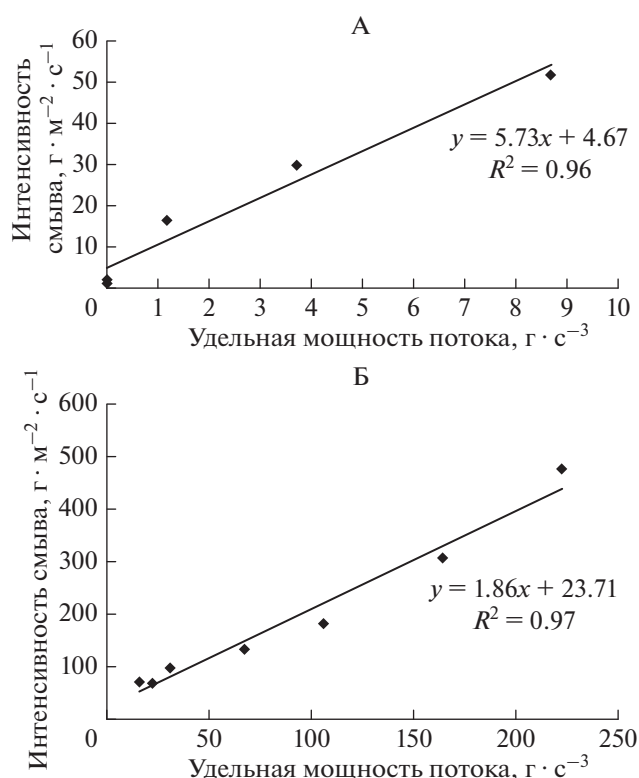


Рис. 1. Зависимость интенсивности смыва почвы с плотностью $1.4 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$ от удельной мощности потока в диапазоне скоростей ниже (А) и выше граничной (Б).

ях смыва. Свободный член в уравнении (1) относится к дограничной области скоростей и его следует использовать при скорости меньше граничной величины. Свободный член в уравнении смыва (2) относится к области скоростей, которые больше граничной скорости потока.

Обращает на себя внимание, что величины граничной скорости несколько возрастают от 1.58 до $1.72 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ при увеличении плотности почвы (табл. 1). При размыве фракции почвы с размером агрегатов $< 1 \text{ мм}$ граничная скорость несколько меньше и составляет $1.03 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, чем для

фракции агрегатов $1\text{--}2 \text{ мм}$ аналогичной плотности ($1.4 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$).

Эродируемость почвы в дограничном диапазоне скоростей уменьшается от 171.53 до $3.17 \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^2$ при увеличении плотности почвы от 1.2 до $1.5 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$. Уменьшение эродируемости характерно для области скоростей потока, которые выше граничной. В этом диапазоне скоростей она изменяется от 36.88 до $0.88 \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^2$. При этом в случае размыва фракции почвы с размером агрегатов $< 1 \text{ мм}$ в дограничной области свободный член уравнения также мал, как и для почвы с крупными агрегатами ($1\text{--}2 \text{ мм}$) — 3.48 и 4.67 соответственно. Конечно, на границе двух диапазонов скоростей, изменение интенсивности смыва происходит не мгновенно, но она резко уменьшается при увеличении скорости в этом интервале — $1.6\text{--}1.7 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ (фракция агрегатов $1\text{--}2 \text{ мм}$).

Возможно, что причиной существования двух областей динамики интенсивности смыва является следующее. Как известно почва состоит преимущественно из агрегатов, которые в свою очередь состоят из элементарных глинистых частиц, связанных между собой силами сцепления, а также амфифильными молекулами гумусовых кислот [12, 13]. Амфифильность гумусовых кислот обусловлена их способностью связывать элементарные почвенные частицы как гидрофобными, так и гидрофильными частями. Но так как гидрофобные части молекул не растворяются в воде, то такие агрегаты проявляют более высокую устойчивость к разрушению водой. Поэтому межагрегатные связи слабее внутриагрегатных. Кроме того, межагрегатные связи устанавливаются при окончательном формировании образца, когда его средняя плотность доводится до заданной величины. При наличии воды на поверхности образца, она проникает в нижележащий слой и нарушает в первую очередь межагрегатные связи.

В этом случае поток захватывает практически свободно лежащие на поверхности почвы частицы из ее верхнего слоя. Об этом свидетельствуют

Таблица 1. Изменение эродируемости модельной почвы различной плотности в широком диапазоне скоростей потока

Плотность почвы, $\text{г} \cdot \text{см}^{-3}$	Граничная скорость, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$	Эродируемость, $\text{м}^{-2} \cdot \text{с}^2$		Свободный член в уравнениях	
		до граничной скорости	после граничной скорости	до граничной скорости	после граничной скорости
Фракция $1\text{--}2 \text{ мм}$					
1.2	1.58	171.53	36.88	-23.21	510.12
1.3	1.68	49.24	3.48	2.34	221.31
1.4	1.70	5.73	1.86	4.67	23.71
1.5	1.72	3.17	0.88	2.57	14.18
Фракция $< 1 \text{ мм}$					
1.4	1.03	27.05	1.58	3.48	31.84

наши исследования [7] так как после паузы, в продолжение которой почва оставалась под слоем воды, водный поток срывает порой целую группу агрегатов поверхностного слоя, которые переносятся 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 образца.

Следующий, пригруженный сверху, нижний слой частиц не насыщается до предела, то есть до состояния, чтобы межагрегатное взаимодействие отсутствовало. Поэтому для насыщения пленочной влаги между агрегатами требуется некоторый временной промежуток после срыва потоком верхнего слоя частиц почвы, 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 частицы нижнего слоя.

Такой процесс продолжается до тех пор, пока скорость потока не увеличится настолько, что межагрегатное взаимодействие уже не может противостоять силе потока. 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 частицами почвы и эродируемость стабилизируется, по крайней мере, до скорости потока равной $6\text{--}7 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$.

Для выяснения зависимости влияния размера агрегатов на интенсивность смыва почвы были проведены опыты с фракцией $< 1 \text{ мм}$ при плотности $1.4 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$. Оказалось, что эродируемость данной фракции почвы была существенно выше, чем фракции $1\text{--}2 \text{ мм}$ в дограничной области — 27.05 и $5.73 \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^2$, и несколько ниже — после граничной скорости — 1.58 и $1.86 \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^2$ соответственно. Таким образом, показано, что монофракционная почва с более крупным агрегатным составом лучше противостоит размыванию при дограничных скоростях потока, чем почва с мелкой структурой. Вероятно, это связано с различной толщиной верхнего слоя агрегатов.

На эродируемость почвы сильно влияет и ее плотность [5]. При обработке экспериментальных данных нам удалось обнаружить очень четкие зависимости:

$$k_1 = 0.12(\rho_{\text{п}} - 1)^{-4.62}, \quad (3)$$

$$k_2 = 0.046(\rho_{\text{п}} - 1)^{-4.00}, \quad (4)$$

где k_1 и k_2 — эродируемость почвы до и после граничной скорости, $\text{м}^{-2} \cdot \text{с}^2$; $\rho_{\text{п}}$ — плотность поч-

вы, $\text{г} \cdot \text{см}^{-3}$. Коэффициенты детерминации для уравнений (3) и (4) составляют более 0.95.

Этот эффект вызван тем, что при увеличении плотности почвенные частицы сближаются друг с другом и, следовательно, увеличивается число точек их взаимных контактов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эксперименты по оценке динамики интенсивности смыва почвы в широком диапазоне скоростей показали, что существует некоторая граничная скорость, после превышения которой существенно изменяется эродируемость. Для условий экспериментов (фракция агрегатов $1\text{--}2 \text{ мм}$) значения граничной скорости изменялись незначительно в диапазоне $1.6\text{--}1.7 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, хотя и несколько увеличивались с ростом плотности почвы. Однако эродируемость при скорости выше граничной величины значительно ниже (в 3 раза и более) эродируемости в дограничной области — смыв в этой области идет по более отлогой кривой.

Описанные выше результаты трудно объяснить, исходя только из механических закономерностей взаимодействия потока и подстилающей шероховатой поверхности агрегированной почвы. Очевидно, что в процессе размыва велика роль расклинивающих водных пленок на поверхности глинистых частиц [11]. При малых дограничных скоростях потока верхний слой агрегатов быстро насыщается водой. Вокруг агрегатов формируется внешняя пленка, которая может приводить к полному исчезновению сил межагрегатного притяжения. В дальнейшем захвату и перемещению агрегатов водным потоком оказывают сопротивление только сила тяжести за вычетом подъемной силы воды.

В области высоких скоростей, превышающих граничную, гидродинамическое воздействие потока на агрегаты почвы столь велико, что поток может преодолевать сцепления между частицами еще до насыщения межагрегатных пленок. В данном случае поток затрачивает относительно большую энергию, чем в области дограничных скоростей. Величина эродируемости при этом уменьшается в 3 раза и более по сравнению с эродируемостью в диапазоне дограничных скоростей.

Некоторые теоретические соображения и экспериментальные данные позволяют предположить, что размеры почвенных агрегатов могут влиять на эрозионную эффективность расклинивающего действия водных пленок. Сравнение эродируемости фракции почвы с размером агрегатов $< 1 \text{ мм}$ с фракцией $1\text{--}2 \text{ мм}$ показало, что они различаются только при дограничных скоростях потока — 27.05 и $5.73 \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^2$. В то время как при более высоких скоростях потока, превышающих граничную, эти различия для данных фракций

почвы нивелируются — 1.58 и $1.86 \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^2$ соответственно. Поскольку в полевых условиях скорости склоновых потоков редко превышают $1.5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, то почвы с более крупными агрегатами будут лучше противостоять эрозии.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена по плану НИР (ГЗ) Научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева (разработка методики и аппаратуры) и при поддержке РФФИ (проект № 16-05-00474, выполненные опыты и анализ результатов).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. География овражной эрозии / Под ред. Зориной Е.Ф. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2006. 324 с.
2. Дерягин Б.В., Чураев Н.В., Муллер В.М. Поверхностные силы. М.: Наука, 1985. 398 с.
3. Кузнецов М.С. Противоэрозионная стойкость почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1981. 135 с.
4. 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. С. 488–494.
5. Ларионов Г.А., Бушуева О.Г., Добровольская Н.Г., Кирюхина З.П., Литвин Л.Ф. Эродируемость модельной почвы различной плотности // Почвоведение. 2011. № 8. С. 995–999.
6. 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. С. 890–896. <https://doi.org/10.7868/S0032180X14070107>
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. С. 593–598. <https://doi.org/10.7868/S0032180X16050117>
8. 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. С. 347–356. <https://doi.org/10.7868/S0032180X18030097>
9. 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 меагрегатных связей // Почвоведение. 2017. № 3. С. 354–359. <https://doi.org/10.7868/S0032180X17010099>
10. Ларионов Г.А., Краснов С.Ф. Вероятностная модель размыва почв и связных грунтов // Почвоведение. 2000. № 2. С. 235–242.
11. Осипов В.И. Физико-химическая теория эффективных напряжений в грунтах // Грунтоведение. 2013. № 2. С. 3–34.
12. Шеин Е.В. Курс физики почв. Москва: Изд-во Моск. ун-та, 2005. 432 с.
13. Шеин Е.В., Милановский Е.Ю. Роль и значение органического вещества в образовании и устойчивости почвенных агрегатов // Почвоведение. 2003. № 1. С. 53–61.
14. Edwards W.M., Owens L.B. Large storm effects on total soil erosion // J. Soil Water Conserv. 1991. V. 46. № 1. P. 75–78.
15. Nearing M.A., Bradford J.M., Parker S.C. Soil detachment by shallow flow at low slopes // Soil Sci. Soc. Am. J. 1991. V. 55. № 2. P. 339–344.
16. 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. V. 55. № 6. P. 1546–1551.

Erodibility of a Model Soil upon a Wide Range of Water Flow Velocities

G. A. Larionov^{1,*}, A. V. Gorobets¹, N. G. Dobrovolskaya¹, Z. P. Kiryukhina¹,
S. F. Krasnov¹, and L. F. Litvin¹

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

*e-mail: larionov425@mail.ru

It was experimentally shown that there are two regions of the velocities of water flow, in which the erodibility values of the mono-fractional soil (aggregate fraction 1–2 mm) differ sharply between themselves. In the low-velocity range, erodibility varies from 171.53 to $3.17 \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^2$ with an increase in the soil bulk density from 1.2 to 1.5 г/см^3 ; in the area of high velocities, it varies from 36.88 to $0.88 \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^2$. The joint solution of the equations for the two velocity ranges allowed us to obtain the boundary values of the flow velocity, above which other erodibility values should be taken into account in the calculations. The boundary velocity values for this model soil are within 1.6 – 1.7 м/с . The reason for this phenomenon lies in the fact that, at low flow velocity, water removes aggregates that have lost contact with the bulk of the soil as a result of its peptization by water, whereas at high flow velocities, soil loss is mainly due to hydrodynamic forces of water flow.

Keywords: erosion intensity, boundary flow velocity, monofractional soil, interaggregate bonds, wedging impact of film moisture, leached chernozem (Luvic Chernozem (Pachic))