УДК 631.485

ДЕЙСТВИЕ МЕЛКОВОДНЫХ ПОТОКОВ НА ПОВЕРХНОСТНЫЕ ГОРИЗОНТЫ ЧЕРНОЗЕМА ТИПИЧНОГО РАЗЛИЧНОЙ СТЕПЕНИ СМЫТОСТИ

© 2018 г. О. О. Плотникова[1,2], В. В. Демидов[2], М. П. Лебедева[1,2]

[1]Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Россия, 119017, Москва, Пыжевский пер., 7, стр. 2

[2]МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия, 119991, Москва, Ленинские горы,1

e-mail: mrs.plotnikova@mail.ru

Ручейковая эрозия вносит существенный вклад в процессы деградации пахотных почв, поэтому целью работы было продолжение разработки гидравлических и статистических методов для оценки транспорта мелководными потоками почвенного материала. Для этого на примере черноземов типичных среднемощных легкосуглинистых на лёссовидных суглинках глубокопахотных несмытого, слабосмытого и среднесмытого проведена верификация уравнения транспортирующей способности водных потоков малой глубины. Образцы для исследования были отобраны в Курской области. Сопоставление полученных экспериментально и рассчитанных по уравнению значений мутности показало удовлетворительное соответствие. Средняя относительная ошибка расчетов составила по модулю 18.0%, а коэффициент корреляции – 0.89. В модельном эксперименте на большом эрозионном лотке было установлено, что средневзвешенный диаметр влекомых потоком агрегатов увеличивается с возрастанием скорости потока, а диаметр отложившихся в русле агрегатов уменьшается. Данная закономерность выявлена как при воздушно-сухом, так и при капиллярно-увлажненном исходном состоянии образцов. Установлено, что водный поток при низкой скорости (0.3915 м/с) выносит прежде всего многопорядковые и наиболее плотные прогумусированные агрегаты (в том числе копролиты), в то время как в русле откладываются обломки менее гумусированных агрегатов и отдельные минеральные зерна. Выяснено, что такие особенности характерны для обоих вариантов исходного состояния образцов. При этом отмечено, что размеры фракций вынесенных потоком агрегатов при обоих исходных состояниях образцов совпадают, то же характерно и для отложившихся в русле агрегатов.

Ключевые слова: ручейковая эрозия, мелководные потоки, транспортирующая способность, микроморфология эродированных черноземов

DOI: 10.19047/0136-1694-2018-91-85-109

ВВЕДЕНИЕ

В результате действия процесса ручейковой эрозии происходит изменение и относительное ухудшение физических, химических и морфологических свойств почв, особенно пахотных, так как они более уязвимы и подвержены эрозии, чем целинные.

Оценивая процессы эрозии, необходимо учитывать не только скорости потоков (среднюю, размывающую или донную), но и транспортирующую способность потока. Под транспортирующей способностью потока понимается наибольший возможный при данном гидравлическом режиме потока расход наносов (Кузнецов, Глазунов, 2004).

Проблеме транспорта наносов посвящено много работ, большинство из них проводилось применительно к русловым потокам, в то время как перемещение наносов является одним из важных компонентов ручейковой эрозии почв. Однако известно, что основной смыв почвенного материала происходит в результате формирования склоновых потоков глубиной 10–15 мм.

В связи с этим возникает необходимость разработки методов для оценки транспорта почвенного материала мелководными потоками, а также поиска и исследования взаимосвязи между свойствами поверхностных горизонтов различных типов агрогенных почв и транспортирующей способностью водных потоков малой глубины.

Эрозионно-аккумулятивные процессы наиболее чутко реагируют на изменения условий поверхностного стока воды, вызванные как климатическими осцилляциями или тектоническими движениями, так и деятельностью человека (Эрозионные процессы, 1984). Поскольку центр Русской равнины в последние 300 лет практически не испытывал существенных климатических колебаний, а тектоническая ситуация в пределах Русской платформы была стабильной, то почти все изменения интенсивности эрозионно-аккумулятивных процессов были вызваны антропогенным воздействием (Голосов и др., 1995).

Отрыв частиц и их транспорт осуществляются за счет энергии дождевых капель и (или) мелководных потоков. Разбрызгивание почвы дождевыми каплями в естественных и лабораторных условиях хорошо изучено (Ellison, 1944; Free, 1960; Smith,

Wischmeier, 1962). Размыву почвы склоновыми водными потоками также посвящено много работ, однако до сих пор не предложено уравнения, удовлетворительно описывающего процесс отрыва и переноса частиц почвы.

Транспорт наносов изучался преимущественно в приложении к русловым потокам. Существует ряд методов и формул для оценки транспортирующей способности: зависимости Г.С. Чекулаева (1955), К.В. Разумихиной (1966); формулы В.К. Дебольского, В.М. Коткова (1977), Г.В. Железнякова (1988).

В особых случаях, когда соблюдается баланс между транспортирующей способностью потока, поступлением наносов на изучаемый участок и фактическим расходом наносов, что морфологически проявляется в неизменности типа русловых процессов, для расчета транспорта наносов допустимо применять формулы расчета транспортирующей способности потока.

Применяемая в гидрологии теория транспорта наносов основана на динамической теории турбулентности, называемой иногда полуэмпирической теорией, поскольку основной параметр – коэффициент турбулентной вязкости – оценивается в этой теории на основе опытных данных или эмпирических формул (Караушев, 1977).

Существуют разработки по одновременному применению гидравлических и статистических методов для оценки транспорта наносов (Карасев, 1975; Haimann, 2014; Ghoshal, Pal, 2014; Pal, Ghoshal, 2014; Pu et al., 2014; Tsai et al., 2014).

В речных потоках расход наносов, как правило, меньше или равен транспортирующей способности. Однако вопрос расчета транспортирующей способности речных потоков и водных потоков в каналах и поливных бороздах к настоящему времени достаточно изучен. Нас интересуют, во-первых, особенности эрозионных процессов, происходящих в небольших руслах потоков малой глубины, формирующихся на склонах, а во-вторых, возможность количественно оценить на системном уровне водный поток–почва способность таких потоков переносить либо аккумулировать определенную массу почвенного материала черноземов как наиболее агрономически ценных почв.

Многие авторы исследовали микроморфологические свойства верхних горизонтов различных типов целинных, антропогенно-преобразованных и эродированных черноземов. Выявлено,

что сложение целинных чернозема мощного и чернозема обыкновенного – однородное, рыхлое, преобладают межагрегатные поры, поры-ходы и камеры, преимущественно биологического генезиса. Структура сформирована почвенной фауной, отдельные части имеют характерную вытянутость, кольцеообразные сжатия и уплотнения (Медведев, 1968), выделяются агрегаты преимущественно 2-го (иногда 3-го) порядка. Органическое вещество типа mull равномерно распределено, преобладает гуминовый гумус (Быстрицкая, Герасимова, 1988).

Микростроение пахотных черноземов изучено достаточно подробно на примере карбонатных черноземов Предкавказья (Поляков и др., 1970, 1972), южных черноземов европейской части СССР (Поляков, 1979), обыкновенных черноземов Украины (Поляков, 1981), оподзоленных, выщелоченных и типичных черноземов Заволжско-Предуральской лесостепи. Для всех изученных черноземов выявлены как общие, так и специфические микропризнаки, обусловленные экологическими условиями функционирования, историей развития и характером антропогенной нагрузки. Так, твердая фаза всех перечисленных почв преимущественно состоит из микроучастков, сложенных агрегатами, неагрегированным и губчатым материалом. Для карбонатных пахотных черноземов характерно преобладание в пахотном горизонте микроагрегатов размером 0.1–0.25 мм преимущественно удлиненной формы, среди агрегатов <0.1 мм преобладают угловатые. Глина имеет чешуйчато-волокнистую, местами с тенденцией к струйчатой, оптическую ориентировку. Встречаются округлые стяжения ориентированной глины и гумуса, плотные с краев и рыхлые внутри, до 0.15 мм в диаметре. Редкие рыхлые округлые сегрегации гидроокислов железа с пленками микрозернистого кальцита. В южных пахотных черноземах преобладают сложные округлые агрегаты до 0.2 мм в диаметре, более крупные имеют угловатые очертания. Преобладает буроокрашенный гумус, тесно связанный с глинистым веществом, которое распределено равномерно. Поры ветвящиеся, замкнутые и открытые. Изучение микростроения пахотных горизонтов обыкновенных черноземов показало, что в нем преобладают округлые микроагрегаты размером 0.1–0.25 мм, поры ветвящиеся, закрытого типа. В микросложении оподзоленного и выщелоченного распаханных черноземов значительная роль принадлежит неагрегиро-

ванному материалу, тогда как в гумусовом слое типичного чернозема неагрегированный материал отсутствует. В микростроении черноземов типичных Курской области (Санжарова и др., 1988) отмечена следующая закономерность: при вовлечении в сельскохозяйственное использование соотношение агрегатов, неагрегированного и губчатого материала смещается в сторону преобладания губчатого и неагрегированного материала. При этом в основной почвенной массе резко уменьшается количество растительных остатков, распределение гумуса становится менее равномерным, появляются микрозоны с преобладанием коллоидно-дисперсных форм гумуса.

Вопрос о возрастании противоэрозионной устойчивости черноземов (на примере черноземов типичных разной степени смытости) в ходе их обработки полимерным препаратом изучался в том числе и микроморфологическим методом (Бганцов и др., 1988). Сравнение характера микростроения агрегатов смытого и несмытого чернозема показало, что в смытых вариантах хорошо диагностируются отдельные пылеватые зерна, реже встречаются агрегаты глинистых частиц, в целом меньше тонкодисперсного материала, значительно больше межчастичных пор неправильной формы; контакты между частицами не столь прочные (широкие); значительно реже наблюдаются копрогенные образования. В ходе этих исследований показано, что для естественных и искусственных агрегатов черноземов типичных несмытого и среднесмытого после обработки полимерным препаратом увеличились сумма и средневзвешенный диаметр водопрочных агрегатов по сравнению с необработанными агрегатами этих же почв, а в связи с этим повысилась и их противоэрозионная устойчивость.

При исследовании почвенного материала пахотных эродированных черноземных почв различной степени смытости по сравнению с целинными (Булыгин и др., 1998) методом прямого микроскопирования в отраженном свете показано, что с увеличением степени смытости нарастает содержание неагрегированных элементарных почвенных частиц.

Микроморфологический анализ агрегатов почвенного материала черноземов, сносимого при эрозии со стоковых площадок (Чижикова и др., 2010), показал, что они имеют в основном округлую и овальную формы с размерами от 0.2 до 1.6 мм в диаметре.

Агрегаты представляют собой экскременты почвенной мезофауны. Более мелкие комковатые глинисто-гумусовые агрегаты (0.05–0.1 мм) представлены разрушенными копролитами. В смытых копролитах частицы мелкопылеватой размерности имеют в основном кварц-полевошпатовый состав. Они равномерно распределены в плазме, которая представлена в основном изотропными черновато-бурыми глинисто-гумусовыми хлопьями и сгустками. Практически все копролиты имеют внутрипедную тонкую пористость. Несмотря на существенные различия содержания минералов фракций менее 1 мкм, в верхних горизонтах генетически различных черноземов (типичного, выщелоченного, оподзоленного) в илистом веществе сносимого материала наблюдаются высокие значения содержания смектитовой фазы. Таким образом, особенности микростроения материала, сносимого со стоковых площадок, позволили авторам заключить, что смываются наиболее легкие агрегаты – копролиты, обогащенные глинисто-органическим веществом.

Однако в литературе пока не обнаружено данных о свойствах агрегатов черноземов, сносимых модельными водными потоками, в связи с чем считаем, что назрела необходимость таких исследований.

Цель исследования – охарактеризовать физические и микроморфологические свойства материала поверхностных горизонтов пахотных почв после воздействия моделируемых эрозионных процессов и верифицировать уравнение транспортирующей способности водных потоков малой глубины.

В задачи исследований входило: а) в модельном эксперименте на большом эрозионном лотке оценить влияние скорости водного потока на средний диаметр вынесенных потоком и отложившихся в русле агрегатов почвы при разном ее исходном состоянии (воздушно-сухом и капиллярно-увлажненном); б) провести верификацию уравнения транспортирующей способности потоков малой глубины (3); в) охарактеризовать микропризнаки сносимого и откладывающегося материала во фракциях, преобладающих в агрегатном составе (при разных скоростях водного потока).

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

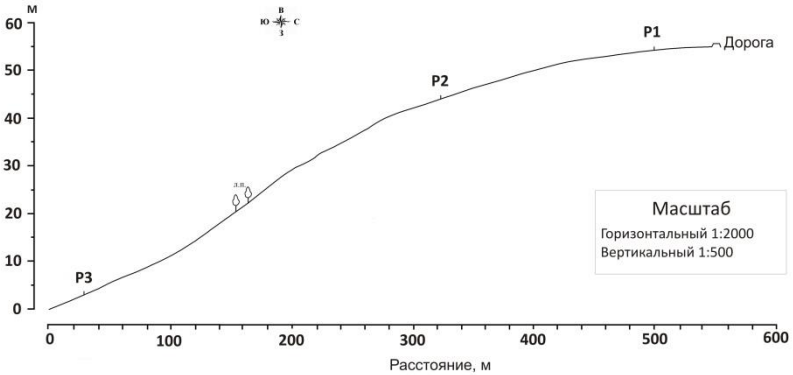
В Курской области свыше 70% пахотных угодий относятся к черноземным почвам, большая часть этих территорий

предназначена для интенсивного использования. В целом по области пашня подвержена эрозии на площади 0.5 млн га, а на площади 0.9 млн га существует потенциальная опасность эрозии. Более половины площади природных суходольных лугов и пастбищ эродировано. Кроме того, 12.5 тыс. га ценных земель нарушено оврагами. Среднемноголетняя интенсивность эрозии почв на пашне колеблется от 0.5 до 9.7 т/га, а на отдельных элементах склона она составляет 20–30 т/га. В среднем за год смывается с полей около 8 млн т почвы и выносится из оврагов почти 2 млн т почвогрунтов. Из общего количества наносов 20% поступает в реки, ухудшая их состояние (Свиридов и др., 2010).

По данным ОНО “ОПХ ГНУ ВНИИЗиЗПЭ”, интенсивность прироста оврагов в длину в среднем составляет 0.5–0.7 м/год. Максимальный среднегодовой прирост равен 1.5–10 м. Отдельные овраги за год увеличивают свои размеры в длину до 50–70 м. Прогнозные расчеты показывают дальнейший рост оврагов в области, а это сопровождается ежегодным выбыванием из интенсивного использования ценных сельхозугодий. Причем, в отличие от залежи эти процессы практически необратимы, а капитальная реконструкция оврагов требует очень больших капитальных вложений (Доклад о состоянии…, 2009).

По данным Доклада о состоянии окружающей среды за 2011 г., площадь земель области, расположенных на эрозионно-опасных склонах, за несколько лет (2001–2011 гг.) выросла на 3.2%, а ежегодный прирост оврагов составляет около 200 га.

Для изучения особенностей процесса ручейковой эрозии, происходящей на черноземных почвах, заложен почвенно-эрозионный профиль на территории Опытного поля ВНИИЗиЗПЭ в Медвенском районе Курской области. Длина профиля 575 м (рис. 1). Определение степени смытости и выделение границ чернозема типичного различной степени смытости проводилось путем заложения и описания почвенных разрезов и прикопок в различных элементах рельефа (Классификация…, 1977). Для проведения экспериментов отбирали образцы поверхностных горизонтов черноземов типичных среднемощных легкосуглинистых на лёссовидных суглинках глубокопахотных несмытого, слабосмытого и среднесмытого.



Крутизна, град.	3.4	3.3	3.8	4.7	5.1	5.0	5.1	4.5	4.1	3.6	2.8	2.2	1.7	1.1	0.5
Название почвы	$Ч_2^{т}$							$Ч_2^{т}$				$Ч_2^{т}$			

Рис. 1. Схема почвенно-геоморфологического профиля (чернозем типичный, Курская область).

МЕТОДЫ

Способ определения водопрочности макроструктуры разработан на основе методов Г.И. Павлова и А.Ф. Тюлина и в настоящее время является одним из распространенных в почвенной практике. Состоит из двух частей: фракционирования почвы на ситах в воздушно-сухом состоянии (сухое просеивание) и в воде (мокрое просеивание). В первом случае фиксируется количество агрегатов того или иного размера в почве, во втором – определяется количество водопрочных агрегатов, т.е. дается качественная оценка структуры по водопрочности (Вадюнина, Корчагина, 1986).

Эксперименты на большом эрозионном лотке. Большой эрозионный лоток представляет собой устройство для проведения модельных экспериментов в лабораторных условиях с целью изучения и прогнозирования различных процессов водной эрозии почв. В наших экспериментах на ложе лотка создавали искусственное русло (длина 5 м, ширина 0.1 м), в которое с помощью электрического насоса с разной интенсивностью подавали воду. С помощью дозатора и ленточного транспортера (скорость движения транспортера может изменяться от 25 до 250 мм/с) в поток подавалась почва. Дно лотка выложено наждачной бумагой (диаметр зерен d = 0.5 мм) для создания искусственной шероховатости. Высота выступов

шероховатости $0.7d = 0.35$ мм. Кроме того, имеется устройство для изменения угла наклона русла. Угол наклона измеряется при помощи нивелира или мерной иглы (рис. 2а).

Прежде чем начинать работу на лотке, проводили следующие подготовительные мероприятия:

– готовили две навески по 1 кг исследуемой почвы, одну из которых ставили на сутки насыщаться водой до капиллярно-увлажненного состояния;

– устанавливали деление дозатора (*2*) на определенную величину открытия его выходного отверстия;

– устанавливали транспортер (*3*) на заданную скорость движения;

– после установившейся подачи воды в русло (*1*) объемным способом измеряли расход, а мерной иглой измеряли угол наклона водной поверхности и глубину потока;

– имея результаты измерения расхода воды (Q, л/с) и величину поперечного сечения водного потока (ω, см^2), вычисляли среднюю скорость потока $V = Q \cdot 1\,000/\omega$ (см/с).

Работу на лотке (рис. 2а) проводили следующим образом: воздушно-сухую навеску почвы подавали в русло потока (*1*) при помощи дозатора (*2*) и транспортера (*3*). Капиллярно-увлажненная почва смывалась в поток со специального лоточка струей воды при небольшом ее расходе. В обоих случаях продолжительность эксперимента контролировали секундомером. Когда весь образец воздушно-сухой или капиллярно-увлажненной почвы поступал в поток, подача воды в русло прекращалась. Выносимые потоком агрегаты поступали в набор сит, установленных в баке-отстойнике (*4*) на выходе из искусственного русла потока. Сита вынимали и осуществляли мокрое просеивание по методу Саввинова. Агрегаты, отложившиеся в русле, смывали струей воды, они поступали на набор сит для дальнейшего определения агрегатного состава (мокрое просеивание).

Бюксы с почвенными агрегатами различных размеров (фракций) высушивали до воздушно-сухого состояния. Затем проводили расчет средневзвешенного диаметра вынесенных и отложившихся агрегатов (при этом массу агрегатов <0.25 мм рассчитывали по разности). По итогам серии опытов составляли таблицу и строили гра-

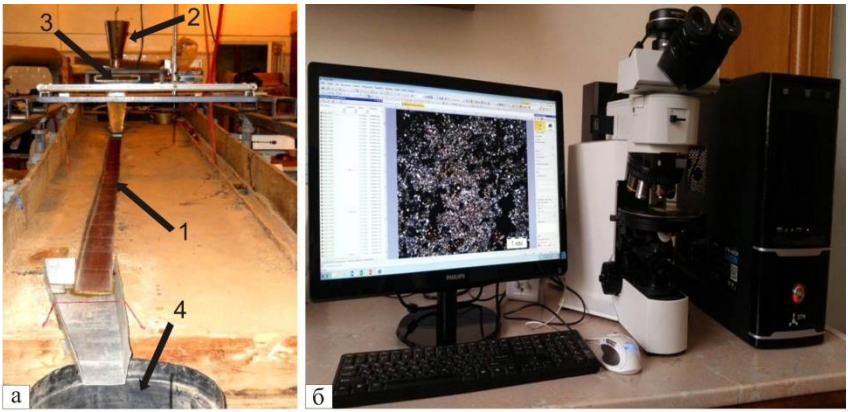


Рис. 2. Большой эрозионный лоток (а); минералогический микроскоп (б).

фики зависимости средневзвешенного диаметра вынесенных и отложившихся агрегатов от скорости течения воды в потоке.

Морфологические исследования почвенных агрегатов фракций, преобладающих после размыва на большом эрозионном лотке, на микроуровне проводили с использованием оптического минералогического микроскопа Olympus BX51 с цифровой фотокамерой Olympus DP26 (рис. 2б).

1. Экспериментально на большом эрозионном лотке измерены глубина потока h (м), уклон лотка (град), расход воды в эксперименте Q (л/с), время эксперимента T (с) и масса вынесенной потоком почвы M (г). Все полученные данные были переведены в единицы измерения системы СИ. На основании имеющихся данных рассчитаны живое сечение потока ω (м^2), средняя скорость потока V (м/с), скорость подачи почвы в поток (г/с), количество воды за эксперимент V_w (м^3) и средний диаметр агрегатов $d_{ср}$ (мм), вынесенных потоком.

Далее рассчитывали:

1.1. Мутность теоретическую $M_1 = m_1/V_w$, где M_1 – мутность, кг/м^3; m_1 – масса почвы, поданной в поток, кг; V_w – объем воды, поданной в поток за время эксперимента, м^3.

1.2. Мутность экспериментальную $M_2 = m_2/V_w$, где M_2 – мутность, кг/м^3; m_2 – масса почвы, вынесенной потоком, кг; V_w – объем воды, поданной в поток за время эксперимента, м^3.

1.3. Относительную ошибку расчета мутности (%), $\Delta = (M_2 - M_1)/100$.

1.4. Коэффициент поверхностного сцепления, входящий в формулу расчета критической скорости потока, отдельно для влекомых и отложившихся в русле агрегатов (Гендугов, Глазунов, 2009):

$$f = \frac{4}{3} r^2 g(\rho_i - \rho_в), \quad (1)$$

где f – коэффициент поверхностного сцепления, Н/м; r – радиус влекомых или отложившихся в русле агрегатов, м; g – ускорение свободного падения, м/с^2; ρ_i – плотность твердой фазы почвы, кг/м^3; $\rho_в$ – плотность воды, кг/м^3.

1.5. Критическую скорость потока, входящую в формулу расчета транспортирующей способности, отдельно для влекомых и отложившихся в потоке агрегатов (Гендугов, Глазунов, 2009):

$$V_{кр} = \sqrt{\frac{\frac{2}{3}\left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1\right) g\bar{d} + \frac{f}{\bar{d}\rho_0}}{K_d}}, \quad (2)$$

где $V_{кр}$ – критическая скорость потока, м/с; g – ускорение свободного падения, м/с^2; ρ – удельный вес твердой фазы частицы, кг/м^3; ρ_0 – плотность воды, кг/м^3; $\bar{d}$ – средний взвешенный диаметр выпадающих из потока частиц почвы, м; f – коэффициент поверхностного сцепления, м^2/с^2; K_d – коэффициент подъемной силы (с-вихря).

2. Расчет транспортирующей способности потока проводили по формуле В.М. Гендугова и др. (2007):

$$\beta = \frac{C}{(gH)^{1/\gamma}} (V^2 - V_k^2)^{1/\gamma}, \quad (3)$$

где β – транспортирующая способность потока, кг/м^3; g – ускорение свободного падения, м/с^2; H – глубина потока, м; V – средняя скорость потока, м/с; V_k – критическая скорость потока, м/с; C – эмпирический коэффициент, кг/м^3; $1/\gamma$ – эмпирический показатель степени.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ изменения диаметра влекомых и отложившихся агрегатов в зависимости от скорости потока. Модельные эксперименты на большом эрозионном лотке с насыпными образцами несмытого воздушно-сухого чернозема типичного проводили в диапазоне скоростей потока от 0.33 до 0.56 м/с. При этом значения диаметров влекомых потоком агрегатов воздушно-сухой почвы увеличивались от 0.42 до 0.51 мм, а отложившихся в русле – уменьшались от 0.65 до 0.42 мм (рис. 3а).

В экспериментах с несмытым капиллярно-увлажненным черноземом типичным в диапазоне скоростей от 0.34 до 0.56 м/с диаметры влекомых потоком агрегатов увеличивались от 1.02 мм до 1.21 мм, диаметры отложившихся в русле уменьшались от 1.18 до 1.01 мм соответственно границам диапазона средних скоростей потока (рис. 3б). Причем в середине диапазона скоростей средневзвешенный диаметр влекомых агрегатов резко увеличивался до 0.78 мм, а диаметр отложившихся агрегатов резко падал до 0.24 мм.

Анализ результатов экспериментов с несмытым капиллярно-увлажненным черноземом типичным показывает, что видна закономерность в изменении диаметров влекомых и отложившихся агрегатов с возрастанием средней скорости потока, в то время как для несмытой капиллярно-увлажненной почвы эта зависимость выражена гораздо слабее (рис. 3а, 3б). Возможно, это объясняется тем, что данная почва, являясь несмытой и будучи сформированной на участке пологого склона с уклоном не более 1.1°, ранее не подвергалась размыву и смыву, а следовательно, в капиллярно-увлажненном состоянии является значительно более устойчивой к этим процессам, чем в воздушно-сухом.

Модельные эксперименты с образцами слабосмытого чернозема типичного проводили в диапазоне средних скоростей потока от 0.33 до 0.57 м/с. При этом средневзвешенные диаметры влекомых агрегатов варьировали от 0.33 до 0.35 мм при исследовании воздушно-сухих образцов и от 0.35 до 0.40 мм – при исследовании капиллярно-увлажненных. Диаметры отложившихся агрегатов для воздушно-сухой почвы изменялись в диапазоне от 0.53 до 0.21 мм, а капиллярно-увлажненной – от 1.31 до 0.66 мм.

Результаты анализа изменения диаметра влекомых и отложившихся агрегатов слабосмытой воздушно-сухой и капиллярно-увлажненной почвы показывают наличие тех же закономерностей, что прослеживаются в экспериментах с образцами несмытой почвы. Здесь также наблюдается общее увеличение диаметра влекомых агрегатов с возрастанием средней скорости потока и уменьшение диаметра отложившихся агрегатов как в воздушно-сухом, так и в капиллярно-увлажненном состоянии (рис. 3) с резким скачком в середине диапазона скоростей.

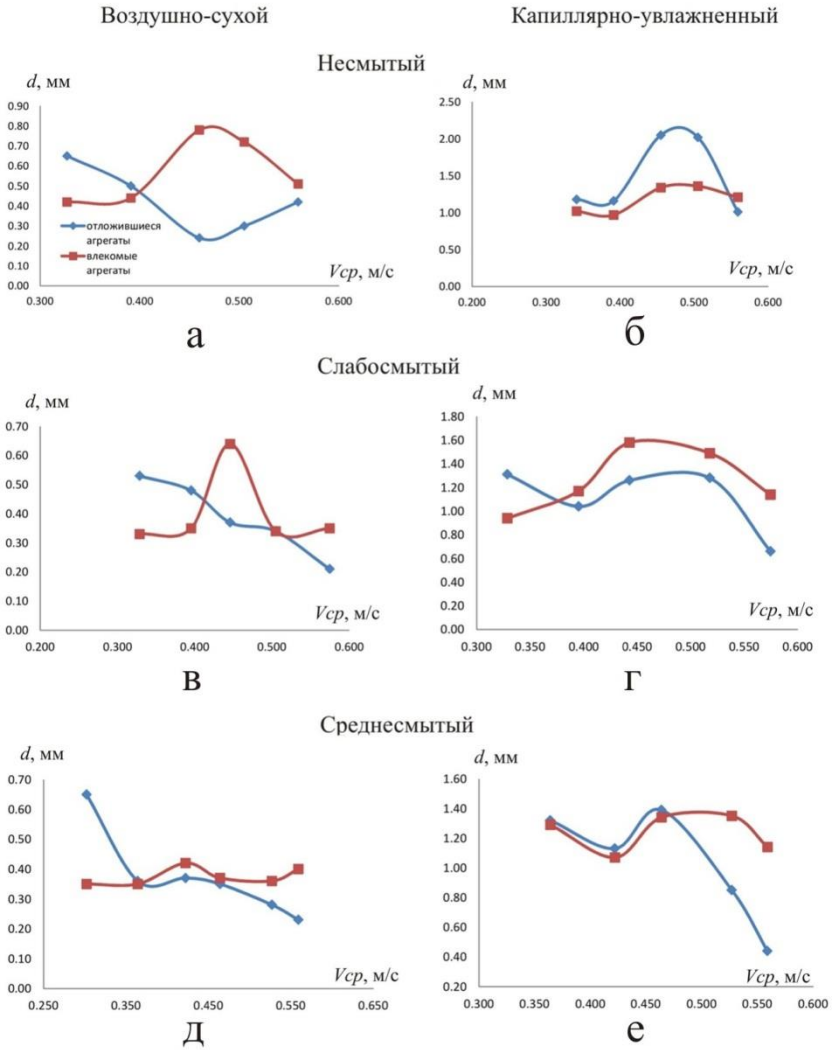


Рис. 3. Изменение средневзвешенного диаметра влекомых и отложившихся агрегатов черноземов типичных различной степени смытости в зависимости от средней скорости потока.

Анализ изменения диаметра влекомых и отложившихся агрегатов среднесмытого чернозема типичного в воздушно-сухом состоянии показывает, что общая закономерность, выявленная для несмытой и слабосмытой почвы, от степени смытости не зависит. Диапазон средних скоростей потока, установленных для этой почвы, существенно не менялся по сравнению с ранее исследованными почвами: от 0.30 до 0.56 м/с для воздушно-сухого образца и от 0.36 до 0.56 м/с – для капиллярно-увлажненного. При этом диаметры влекомых агрегатов (воздушно-сухое состояние исходного образца) с увеличением скорости потока возрастали от 0.35 до 0.40 мм, а отложившихся, напротив, уменьшались от 0.65 до 0.23 мм.

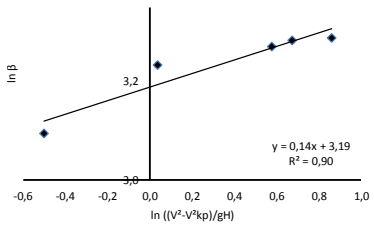
На рис. 3, показывающем изменение диаметров влекомых и отложившихся агрегатов при исследовании среднесмытого чернозема типичного в воздушно-сухом состоянии, видно, что при этой степени смытости почвы закономерность, выявленная ранее для несмытого и слабосмытого чернозема типичного, в целом аналогична зависимостям, обнаруженным при исследовании воздушно-сухих образцов несмытой и слабосмытой почвы, однако выражена не так явно.

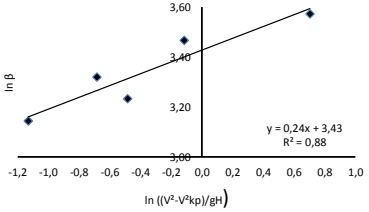
Верификация уравнения транспортирующей способности потоков малой глубины (на примере черноземов типичных). По результатам модельных экспериментов с насыпными образцами исследуемых почв на “большом” эрозионном лотке были рассчитаны значения критических скоростей потока для отложившихся агрегатов ($V_{кр.\ отл}$, м/с) и мутности потока (B, кг/м^3), после чего построены графики зависимости $\ln B$ от $\ln((V^2 – V^2_{кр.\ отл})/gH)$ для верификации уравнения (3). По уравнению линейного тренда вида $y = kx + b$ для каждого графика (рис. 4) находили эмпирический коэффициент C, как показатель тангенса угла наклона линии тренда, и эмпирический показатель степени $1/\gamma$, как натуральный антилогарифм от свободного члена в уравнении линии тренда (табл. 1).

Коэффициенты корреляции R при линейной аппроксимации зависимостей $\ln B$ от $\ln((V^2 – V^2_{кр.\ отл})/gH)$ оказались достаточно высоки (от 0.86 для среднесмытой воздушно-сухой и капиллярно-увлажненной почвы до 0.95 для слабосмытой воздушно-сухой почвы), что говорит об удовлетворительной достоверности выполненной аппроксимации.

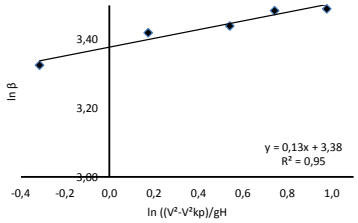
Воздушно-сухой Капиллярно-увлажненный

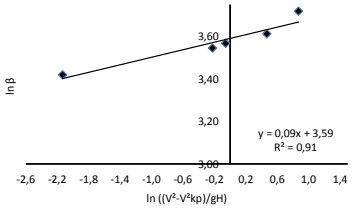
Несмытый



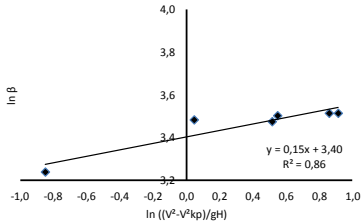


Слабосмытый





Среднесмытый



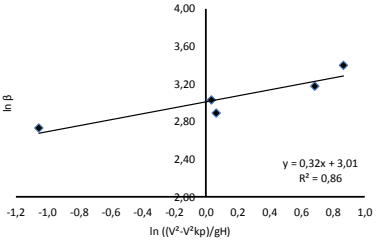


Рис. 4. Зависимость ln$B$ от ln(($V^2 - V^2_{кр}$)/gH) на примере черноземов типичных различной степени смытости.

Таблица 1. Показатели, определенные в модельном эксперименте, относительная ошибка отклонения расчетных значений транспортирующей способности от экспериментальных значений мутности и коэффициенты корреляции

Почва	C, кг/м^3	1/γ	|P|, %	R
Несмытая				
Воздушно-сухая	24.24	0.14	8.8	0.90
Капиллярно-увлажненная	30.81	0.24	24.0	0.88
Слабосмытая				
Воздушно-сухая	29.32	0.13	6.3	0.95
Капиллярно-увлажненная	36.28	0.09	13.8	0.91
Среднесмытая				
Воздушно-сухая	30.04	0.15	18.0	0.86
Капиллярно-увлажненная	20.37	0.32	37.2	0.86
Среднее			18.0	0.89

Примечание. C – эмпирический коэффициент, 1/γ – эмпирический показатель степени, |P| – относительная ошибка по модулю, R – коэффициент корреляции.

Далее, имея значения C и 1/γ, рассчитывали транспортирующую способность потока β (кг/м^3) по формуле (3) и затем находили относительную ошибку расчета |P| (%), сравнивая полученные значения β и имеющиеся данные по экспериментально определенной мутности потока B (кг/м^3). Относительная ошибка этих расчетов варьируется от 6.3 до 37.2%, среднее ее значение – 18.0%, что говорит об успешной верификации уравнения (3).

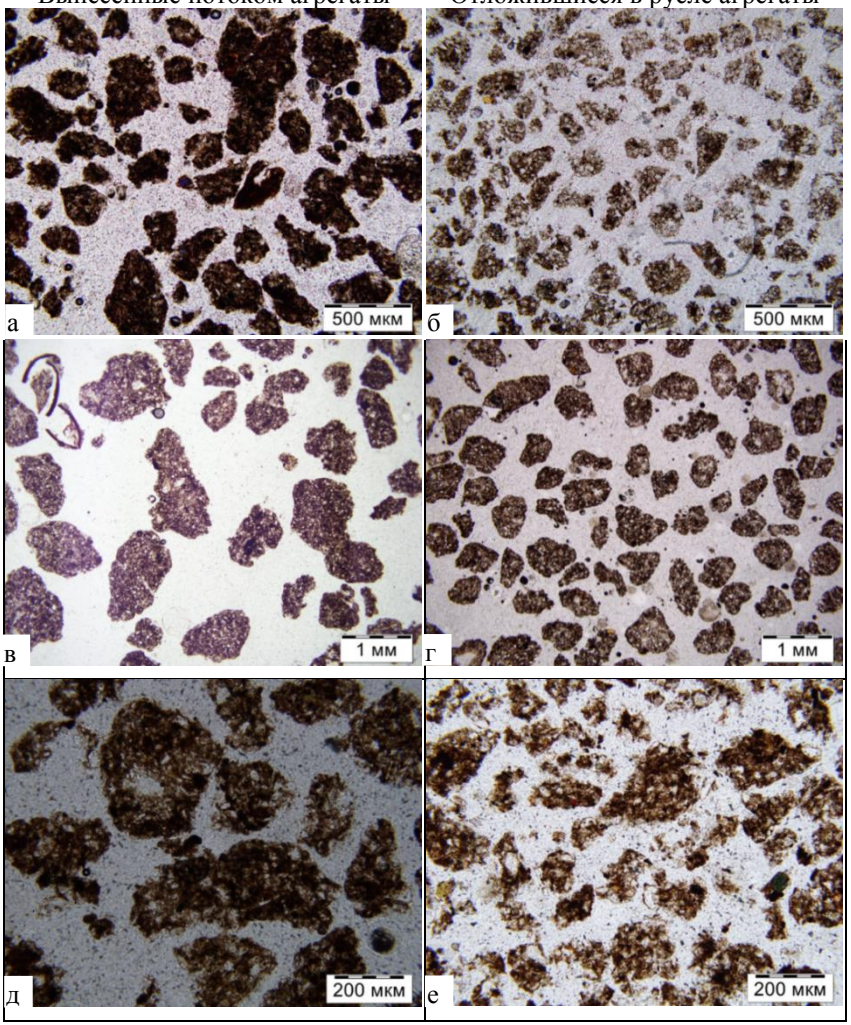
Таким образом, на примере черноземов типичных разной степени смытости в ходе наших исследований показано, что для расчета транспортирующей способности потоков малой глубины, действующих на эти почвы, можно использовать уравнение, разработанное на кафедре эрозии и охраны почв факультета почвоведения МГУ В.М. Гендуговым и др. (2007) и верифицированное ранее только для песка и впоследствии нами для дерново-подзолистых

почв разной степени смытости и намытости (Демидов, Осанина, 2015).

Исследование микропризнаков почвенного материала после размыва на большом эрозионном лотке. После размыва образцов черноземов типичных несмытого и среднесмытого на большом эрозионном лотке были определены фракции, преобладающие в агрегатном составе как выносимых потоком, так и отложившихся в русле агрегатов. Для выносимых потоком агрегатов обеих разновидностей исследуемых черноземов типичных при исходном воздушно-сухом состоянии образцов это оказалась фракция размером от 0.25 до 0.50 мм, а при исходном капиллярно-увлажненном – от 1.00 до 2.00 мм. В составе отложившихся агрегатов обеих разновидностей исследуемых черноземов типичных при исходном воздушно-сухом состоянии образцов преобладали агрегаты размером <0.25 мм, а при исходном капиллярно-увлажненном – от 0.50 до 1.00 мм. Такие размерности преобладающих фракций были установлены для обоих вариантов чернозема типичного: несмытого и среднесмытого. Размыв производили при следующих характеристиках потока: $V = 0.3915$ м/с, $H = 0.012$ м.

В вынесенных потоком агрегатах преобладают агрегаты высокого порядка, хорошо прогумусированные, часто встречаются копролиты (рис. 5а, 5в, 5д, 5е). При этом как в шлифах чернозема несмытого, так и среднесмытого ясно видно, что при исходном капиллярно-увлажненном состоянии как вынесенные потоком, так и отложившиеся в русле агрегаты имеют более четкую и ровную внешнюю границу, чем при исходном воздушно-сухом состоянии (рис. 5в, 5г, 5ж, 5з). Это обусловливается, по нашему мнению, тем, что при капиллярном увлажнении образца происходит медленное вытеснение воздуха из внутриагрегатных капилляров и постепенное заполнение их водой, в результате чего при попадании агрегатов в поток не происходит их мгновенного разрушения под действием воздуха, резко выталкиваемого из капилляров. Кроме того, длительное увлажнение приводит к постепенному набуханию глинистых минералов в составе твердой фазы почвы и последующему закреплению структуры агрегатов.

Вынесенные потоком агрегаты | Отложившиеся в русле агрегаты



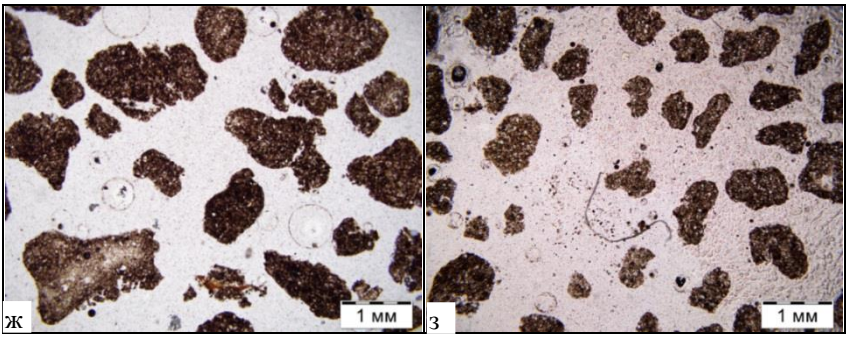


Рис. 5. Характер агрегатов из чернозема типичного несмытого и среднесмытого (N||): а, б, д, е – воздушно-сухое исходное состояние образцов; в, г, ж, з – капиллярно-увлажненное исходное состояние образцов.

В отложившихся фракциях преобладают более мелкие и менее прогумусированные агрегаты, а также часто встречаются агрегаты первого порядка, обломки агрегатов более высокого порядка и отдельные минеральные зерна (рис. 5б, 5г, 5е, 5з). Растительные остатки представлены единичными слаборазложившимися корешками и редко встречающимися углефицированными тканями.

ВЫВОДЫ

1. В модельном эксперименте на большом эрозионном лотке установлено, что средневзвешенный диаметр влекомых агрегатов увеличивается с возрастанием скорости потока, а диаметр отложившихся – уменьшается как при воздушно-сухом, так и при капиллярно-увлажненном исходном состоянии образца.

2. Проведена верификация уравнения применительно к чернозему типичному разной степени смытости. Сопоставление полученных экспериментально и рассчитанных по уравнению значений мутности показало удовлетворительное соответствие. Средняя относительная ошибка по модулю составила 18.0%, а коэффициент корреляции – 0.89. Таким образом, на примере черноземов типичных разной степени

смытости в ходе наших исследований показано, что для расчета транспортирующей способности потоков малой глубины, действующих на эти почвы, можно использовать уравнение, разработанное на кафедре эрозии и охраны почв факультета почвоведения МГУ В.М. Гендуговым, М.С. Кузнецовым, Д.Р. Абдулхановой и Г.А. Ларионовым (2007).

3. Установлено, что водный поток при скорости 0.3915 м/с выносит, прежде всего, многопорядковые и наиболее плотные прогумусированные агрегаты (в том числе копролиты), в то время как в русле откладываются обломки менее гумусированных агрегатов и отдельные минеральные зерна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бганцов В.Н., Мосолова А.И., Санжарова С.И., Челобянц С.А.* Микроморфологические исследования влияния полимерных препаратов на структурное состояние типичного чернозема // Микроморфология антропогенно измененных почв. М.: Наука, 1988. С. 36–46.

2. *Булыгин С.Ю., Бреус Н.М., Семиноженко Т.А.* К методике определения степени эродированности почв на склонах // Почвоведение. 1998. № 6. С. 714–718.

3. *Быстрицкая Т.Л., Герасимова М.И.* О годовом цикле современного черноземного процесса // Почвоведение. 1988. № 6. С. 5–16.

4. *Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А.* Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат, 1986. 416 с.

5. *Гендугов В.М., Глазунов Г.П.* О единстве механизмов водной и ветровой эрозии почвы // Почвоведение. 2009. № 5. С. 598–605.

6. *Гендугов В.М., Кузнецов М.С., Абдулханова Д.Р., Ларионов Г.А.* Модель транспорта наносов склоновыми потоками // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2007. № 1. С. 35–40.

7. *Голосов В.Н., Добровольская Н.Г., Иванова Н.Н.* Антропогенное влияние на верхние звенья гидросети в земледельческом центре России // Эрозия почв и русловые процессы. 1995. Вып. 10. С. 16–29.

8. Государственный доклад “О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2011 году” [Электронный ресурс]. Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. http://www.mnr.gov.ru/upload/iblock/a76/gosdoklad2011.pdf. 356 с.

9. *Дебольский В.К., Котков В.М.* Особенности динамики дефицитных форм в поступательных потоках // Метеорология и гидрология. 1977. № 10. С. 67-71.
10. *Демидов В.В., Осанина О.О.* Закономерности процессов переноса и отложения почвенного материала водными потоками малой глубины // Живые и биокосные системы. 2015. № 12. http://www.jbks.ru/archive/issue-12/article-1
11. Доклад о состоянии и охране окружающей среды на территории Курской области в 2008 году. Департамент экологической безопасности и природопользования Курской области. Курск: ООО “Мечта”, 2009. 176 с.
12. *Железняков Г.В.* Гидрологические и гидравлические аспекты проблемы взаимодействия потоков основного русла и поймы // Тр. V Всес. гидрол. съезда. Т. 10. Кн. 2. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. С. 203–209.
13. *Карасев И.Ф.* Русловые процессы при переброске стока. Л.: Гидрометеоиздат, 1975. 288 с.
14. *Караушев А.В.* Теория и методы расчета речных наносов. Л.: Гидрометеоизда, 1977. 272 с.
15. Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 224 с.
16. *Кузнецов М.С., Глазунов Г.П.* Эрозия и охрана почв. М., 2004. 352 с.
17. *Медведев В.В.* Состав и строение макро- и микроагрегатов некоторых почв Украины // Почва, плодородие, урожай. Минск, 1968. С. 323–327.
18. *Поляков А.Н.* Микроморфологическое и морфометрическое исследование южных черноземов европейской части СССР // Биологические науки. 1979. № 3 (183). С. 76–85.
19. *Поляков А.Н.* Микроморфология черноземов Заволжско-Предуральской лесостепи // Биологические науки. 1981. № 5 (209). С. 90–97.
20. *Поляков А.Н., Ярилова Е. А., Кизяков Ю. Е.* Микроморфологическое исследование и морфометрия карбонатных черноземов Предкавказья // Почвоведение. 1972. № 11. С. 91–100.
21. *Поляков А.Н., Ярилова Е. А., Кизяков Ю. Е.* Микроморфология и морфометрия карбонатных черноземов Предкавказья // Тез. докл. IV Всесоюзного делегатского съезда почвоведов. Кн. 3. Алма-Ата, 1970. С. 233–234.
22. *Разумихина К.В.* Вопросы применимости методов расчета транспорта наносов к речным потокам // Тр. ГГИ. Вып. 132. 1966. С. 18-45.
23. *Санжарова С.И., Бганцев В.Н., Скворцова Е.Б.* Структурное состояние чернозема типичного разной длительности сельскохозяйственного использования // Микроморфология антропогенно измененных почв. М.: Наука, 1988. С. 64–74.
24. *Свиридов В.И., Петренко Н.Н., Свиридова О.В.* Оптимизация структуры сельскохозяйственного производства в зонах преобладания основных типов почв Курской области // Модели автоматизированного

проектирования адаптивно-ландшафтных систем земледелия. Курск, 2010. С. 266–269.
25. *Чекулаев Г.С.* О показателях устойчивости русел каналов оросительных систем // Вопросы гидротехники. Вып. 1. Ташкент: АН УзССР, 1955. С. 61–75.
26. *Чижикова Н.П., Лебедева (Верба) М.П., Лебедев М.А.* Минералогический состав и микростроение почв аккумулятивно-денудационного ландшафта северной части лесостепи и сносимого при эрозии материала // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2010. Вып. 65. С. 36–47.
27. Эрозионные процессы / Под ред. Маккавеева Н.И., Чалова Р.С. М.: Мысль, 1984. 255 с.
28. *Free G.R.* Erosion Characteristics of Rainfall // Agricultural Engineering. 1960. V. 41. № 7. P. 447– 449.
29. *Haimann M., Liedermann M., Lalk P., Habersack H.* An integrated suspended sediment transport monitoring and analysis concept // Int. J. Sediment Res. 2014. V. 29. № 2. P. 135–148.
30. *Ghoshal K., Pal D.* Grain-size distribution in suspension over a sand-gravel bed in open channel flow // Int. J. Sediment Res. 2014. . V. 29. № 2. pp. 184–194.
31. *Pal D., Ghoshal K.* Mathematical model on grain-size distribution in suspension over sand-gravel bed // J. Hydrology. 2014. V. 511. P. 640–647.
32. *Pu J.H., Hussain K., Shao S.-d., Huang Y.-f.* Shallow sediment transport flow computation using time-varying sediment adaptation length // Int. J. Sediment Res. 2014. V. 29. № 2. P. 171–183.
33. *Tsai C.W., Man C., Oh J.* Stochastic particle based models for suspended particle movement in surface flows // Int. J. Sediment Res. 2014. V. 29. № 2. P. 195–207.

THE IMPACT OF SHALLOW STREAMS ON THE SURFACE HORIZONS OF TYPICAL CHERNOZEM WITH DIFFERENT EROSION DEGREE

O. O. Plotnikova[1,2], V. V. Demidov[2], M. P. Lebedeva[1]

[1]*V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, Russia, 119017, Moscow, Pyzhevskii per. 7-2*

[2]*Lomonosov Moscow State University, Russia, 119991, Moscow, Leninskie Gory, 1*

e-mail: mrs.plotnikova@mail.ru

The rill erosion affects significantly on the processes of arable soils degradation. Therefore the aim of the work was to continue the development of hydraulic and statistical methods for assessing the transportation of soil material by shallow streams. For this purposes, we conducted the verification of shallow water

flows transporting capacity equation. As an object we used typical chernozems with medium depth light clay loamy on loess like clay loams deeply tilled non-eroded, weakly eroded and medium eroded. Samples for the purposes of the study were collected in the Kursk region. The comparison of the experimental and calculated by the equation turbidity values showed a satisfactory correspondence. The average relative error of calculations contained in modulo 18.0%, and the correlation coefficient was 0.89. The model experiment on a large erosion flume, revealed that the weighted average diameter of the aggregates moved by the flow is increased as the flow velocity is also increased. However, the diameter of aggregates deposited in the bed is decreased. This regularity was revealed as with air-dry initial state of the samples and with capillary-moistened initial state. It was found that the water flow with the low speed (0.3915 m/s) first of all washes out the multi-ordered and the densiest humified aggregates (including coprolites), whereas the pieces of less humified aggregates and separate mineral grains are accumulated on the bed. We revealed that this is quite specific for both types of the initial states of the samples. It was noted that the fractions sizes of the aggregates washed out by the flow at both initial states of the samples are congruent; the same is true for aggregates deposited in the channel.

Keywords: rill erosion, shallow streams, transport capacity, micromorphology of chernozems

REFERENCES

1. Bgantsov V.N., Mosolova A.I., Sanzharova S.I., Chelobyants S.A. Mikromorfologicheskie issledovaniya vliyaniya polimernykh preparatov na strukturnoe sostoyanie tipichnogo chernozema, *Mikromorfologiya antropogenno izmenennykh pochv*. Moscow, Nauka Publ., 1988, pp. 36–46. (in Russian)
2. Bulygin S.Yu., Breus N.M., Seminozhenko T.A. A procedure for Determining the Erosion Degree of Sloping Soils on Slopes, *Pochvovedenie*, 1998, No. 6, pp. 714–718. (in Russian)
3. Bystritskaya T.L., Gerasimova M.I. On the annual cycle of modern chernozemig process, *Pochvovedenie*, 1988, No. 6, pp. 5–16. (in Russian)
4. Vadyunina A.F., Korchagina Z.A. *Methods for studying physical properties of soils*, Moscow, Agropromizdat Publ., 1986, 416 p. (in Russian)
5. Gendugov V.M., Glazunov G.P. On the unity of the mechanisms of water and wind erosion, *Pochvovedenie*, 2009, No. 5, pp. 598–605. (in Russian)
6. Gendugov V.M., Kuznetsov M.S., Abdulkhanova D.R., Larionov G.A. Model of transport capacity of slope flows, *Vestn. Mosk. un-ta*, Ser. 17, Pochvovedenie, 2007, No. 1, pp. 35–40. (in Russian)
7. Golosov V.N., Dobrovol'skaya N.G., Ivanova N.N. Anthropogenic impact on the upper links of the hydroset in the agricultural center of Russia, *Eroziya pochv i ruslovye protsessy*, 1995, V. 10, pp. 16-29. (in Russian)

8. *State report "On the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2011"* [Electronic resource]. Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation. 356 p. http://www.mnr.gov.ru/upload/iblock/a76/gosdoklad2011.pdf. (in Russian)
9. Debol'skii V.K., Kotkov V.M. Features of the dynamics of scarce forms in translational flows, *Meteorologiya i gidrologiya*, 1977, No. 10, pp. 67-71. (in Russian)
10. Demidov V.V., Osanina O.O. Regularities in the processes of transport and deposition of soil material by shallow water flows, *Zhivye i biokosnye sistemy*, 2015, No. 12; URL: http://www.jbks.ru/archive/issue-12/article-1. (in Russian)
11. Report on the state and protection of the environment in the territory of the Kursk region in 2008, *Department of Environmental Safety and Nature Management Kursk region*, Kursk, OOO "Dream" Publ., 2009, 176 p. (in Russian)
12. Zheleznyakov G.V. Hydrological and Hydraulic Aspects of the Problem of the Interaction of Flows of the Main Channel and the Floodplain, *Proceedings of the 5th All-Union Hydrological Congress*, V. 10 (2), Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1988, pp. 203-209. (in Russian)
13. Karasev I.F. *Channel processes during diversion of run-off*, Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1975, 288 p. (in Russian)
14. Karaushev A.V. *Theory and methods of calculating river sediments*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1977. 272 p. (in Russian)
15. *Classification and diagnostics of soils of the USSR*, Moscow, Kolos Publ., 1977. 224 p. (in Russian)
16. Kuznetsov M.S., Glazunov G.P. *Erosion and soil protection*: Uchebnik, Moscow, 2004, 352 p. (in Russian)
17. Medvedev V.V. Composition and structure of macro- and microaggregates of some soils in Ukraine, *Pochva, plodorodie, urozha*i, Minsk, 1968, pp. 323–327. (in Russian)
18. Polyakov A.N. Micromorphological and morphometrical research in the south chernozems in the european part of the USSR, *Biologicheskie nauki*, 1979, No. 3 (183), pp. 76–85. (in Russian)
19. Polyakov A.N. Micromorphology of chernozems of Zavolzhsko-Predur-alskaya wooded steppe, *Biologicheskie nauki*, 1981, No. 5 (209), pp. 90–97. (in Russian)
20. Polyakov A.N., Yarilova E. A., Kizyakov Yu. E. Micromorphological investigations and morphology of Ciscaucasian calcareous chernozems, *Pochvovedenie*, 1972, No. 11, pp. 91–100. (in Russian)
21. Polyakov A.N., Yarilova EA., Kizyakov Yu. E. Micromorphological Investigations and Morphology of Ciscaucasian Calcareous Chernozems, *Abstracts of the IV All-Union Delegate Congress of Soil Scientists, book 3*. Alma-Ata, 1970, pp.233–234. (in Russian)
22. Razumikhina K.V. Questions of the applicability of methods for calculating sediment transport to river flows, *Proceedings of State Hydrological Institute*, 1966, V. 132, pp.18-45. (in Russian)

23. Sanzharova S.I., Bgantsev V.N., Skvortsova E.B. Structural state of chernozem typical of different durations of agricultural use, *Micromorphology of anthropogenically altered soils,* Moscow, Nauka Publ., 1988, pp.64–74. (in Russian)
24. Sviridov V.I., Petrenko N.N., Sviridova O.V. Optimization of the structure of agricultural production in zones of predominance of the main types of soils in the Kursk Region, *Models of computer-aided design of adaptive-landscape systems of agriculture*, Kursk, 2010, pp. 266–269. (in Russian)
25. Chekulaev G.S. About indicators of stability of canal beds of irrigation systems, *Voprosy gidrotekhniki*, 1955, V. 1, pp.61-75. (in Russian)
26. Chizhikova N.P., Lebedeva (Verba) M.P., Lebedev M.A. Mineralogical composition and microstructure of soils in accumulative-denudation landscape of the northern part of the forest-steppe and demolished material during erosion, *Dokuchaev Soil Bulletin,* 2010, V. 65, pp. 36–47. (in Russian)
27. *Erosion processes*, Ed. Makkaveev N.I., Chalov R.S, Moscow, Mysl' Publ., 1984. 255 p. (in Russian)
28. Free G.R. Erosion Characteristics of Rainfall, *Agricultural Engineering*, 1960, V. 41 (7), pp. 447–449.
29. Haimann M., Liedermann M., Lalk P., Habersack H. An integrated suspended sediment transport monitoring and analysis concept, *Int. J. Sediment Res.*, 2014, V. 29 (2), pp. 135–148.
30. Ghoshal K., Pal D. Grain-size distribution in suspension over a sand-gravel bed in open channel flow, *Int. J. Sediment Res.*, V. 29, No. 2, 2014, pp. 184–194.
31. Pal D., Ghoshal K. Mathematical model on grain-size distribution in suspension over sand-gravel bed, *Journal of Hydrology*, V. 511, 2014, pp. 640–647.
32. Pu J.H., Hussain K., Shao S.-d., Huang Y.-f. Shallow sediment transport flow computation using time-varying sediment adaptation length. *Int. J. Sediment Res*. 2014, V. 29, No. 2, pp. 171–183.
33. Tsai C.W., Man C., Oh J. Stochastic particle based models for suspended particle movement in surface flows. *Int. J. Sediment Res*., 2014, V. 29, No. 2, pp. 195–207.

Ссылки для цитирования

Плотникова О.О., Демидов В.В., Лебедева-Верба М.П. Действие мелководных потоков на поверхностные горизонты чернозема типичного различной степени смытости // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2018. Вып. 91. С. 85-109. doi: 10.19047/0136-1694-2018-91-85-109

Plotnikova O.O., Demidov V.V., Lebedeva M.P. The impact of shallow streams on the surface horizons of typical chernozem with different erosion degree, *Dokuchaev Soil Bulletin,* 2018, Vol. 91, pp. 85-109. doi: 10.19047/0136-1694-2018-91-85-109