

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

имени М.В. ЛОМОНОСОВА

ФАКУЛЬТЕТ ПОЧВОВЕДЕНИЯ

На правах рукописи

Плотникова Оксана Олеговна

**Роль транспортирующей способности водных потоков в изменении
некоторых свойств поверхностных горизонтов эродированных черноземов
типичных (на примере Курской области)**

Специальность 03.02.13 – Почвоведение

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата биологических наук

Научные руководители:

доктор биологических наук

Демидов Валерий Витальевич,

доктор сельскохозяйственных наук

Лебедева Марина Павловна

Москва – 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ	12
1.1. Транспортирующая способность потоков в эрозионных исследованиях..	12
1.1.1. Понятие эрозии почв, водная эрозия, ручейковая эрозия	12
1.1.2. Причины взвешивания частиц, движение частиц наносов	13
1.1.3. Характеристики эродирующих потоков, понятие транспортирующей способности водного потока	16
1.1.4. Расход наносов как результирующая транспортирующей способности потока и поступления наносов.....	18
1.1.5. Изучение транспортирующей способности ручейковых потоков	22
1.2. Микроморфологические исследования черноземов	28
1.3. Микроморфометрические исследования почв	33
ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	38
2.1. Объекты исследования	38
2.2. Методы исследования	44
2.2.1. Определение степени смывности почв.....	44
2.2.2. Определение водопрочности структуры, расчет коэффициента структурности и критерия водопрочности	44
2.2.3. Определение содержания гумуса.....	45
2.2.4. Моделирование мелководных потоков	46
2.2.5. Верификация уравнения транспортирующей способности потока	48
2.2.6. Микроморфологические исследования.....	50
2.2.7. Микроморфометрические исследования	50
2.2.8. Статистическая обработка данных	51
ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ	53
3.1. Анализ микростроения пахотных горизонтов эродированных черноземов типичных Курской области.....	53
3.2. Агрегатный состав и водоустойчивость исследуемых почв и связь этих показателей с содержанием гумуса	65
3.3. Изменение диаметра влекомых агрегатов в зависимости от скорости потока	71

3.4. Верификация уравнения транспортирующей способности потоков малой глубины	74
3.5. Морфометрические параметры агрегатов черноземов типичных и их изменение в результате воздействия модельных мелководных потоков.....	78
ВЫВОДЫ	90
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	91
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	93
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	120

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность и степень разработанности темы

Черноземы являются одними из самых плодородных естественных почв на планете, а водная эрозия – одним из самых масштабных и значимых факторов, снижающих их плодородие. Все это определяет необходимость изучения закономерностей и особенностей изменения плодородного горизонта черноземов под влиянием водной эрозии, а также исследований в области разработки методов прогнозирования интенсивности и объема выноса почвенного материала с территорий, занятых сельскохозяйственными угодьями.

Существующие методы проектирования противоэрозионных мероприятий основываются на расчетах, построенных на анализе многолетних рядов наблюдений в прошлом. Однако в последние десятилетия происходят стремительные, трудно предсказуемые климатические изменения, вызывающие справедливые опасения мирового сообщества (Добровольский, Куст, 2007; IPCC, 2019: Summary for Policymakers, 2019). Следовательно, при проектировании противоэрозионных мероприятий следует основываться на метеорологических и гидрологических расчетах с учетом перестроек климата (Кузнецов с соавт., 2008). Проектирование противоэрозионных мероприятий также может основываться на прогнозах эрозионных моделей, в которых учитываются как изменения климата, так и вызываемые ими трансформации параметров эродирующих водных потоков.

Проблеме транспорта наносов посвящено множество научных работ. Однако до 1980-х гг. в подавляющем большинстве случаев эрозионные и гидрологические исследования проводились применительно к крупным русловым потокам – рекам, каналам, поливным бороздам (Леви, 1948; Великанов, 1955; Караушев, 1960, 1972; Маккавеев, 1963; Карасев, 1975; O'Brien, 1933; Vanoni, 1944; Culling, 1965). В то же время ручейковая эрозия вносит существенный вклад в формирование поверхностного стока,

принимающего в агроландшафтах порой катастрофические масштабы. Эти факты обуславливают необходимость разработки методов оценки транспортирующей способности склоновых потоков малой глубины.

В настоящее время существует немало работ, посвященных изучению процессов отрыва, транспорта и аккумуляции наносов мелководными потоками (Finkner et al., 1989; Nearing et al., 1989; Govers, 1990, 1992; De Roo et al., 1996; Misra, Rose, 1996; Morgan et al., 1998; Li, Abrahams, 1999; Prosser, Rustomji, 2000; Flanagan et al., 2007; Zhang et al., 2008; Li et al., 2011; Ali et al., 2013; Mahmoodabadi et al., 2014; Ларионов, Краснов, 1992, 1997, 2000; Ларионов с соавт., 2014, 2015, 2019; Гендугов с соавт., 2007; Абдулханова, Григорьев, 2009; Григорьев, 2012). Однако лишь малая их часть посвящена лабораторному моделированию ручейковой эрозии, воздействующей на почвы, а не на модельные пески и их смеси (Govers, 1985; Proffitt, Rose, 1991; Nearing et al., 1991, 1997; De Baets et al., 2006; Wu et al., 2016; Zhao et al., 2020; Ларионов с соавт., 2007, 2014, 2015, 2019). Таким образом, потребность в учете транспортных характеристик потоков в эрозионных моделях обуславливает необходимость дальнейших разработок в этой области.

Происхождению, эволюции, свойствам черноземов, в том числе микроморфологическим, посвящено огромное множество книг и статей (Афанасьева, 1966; Русский чернозем..., 1983; Марголина с соавт., 1988; Самойлова с соавт., 1990; Щербаков с соавт., 1996; Щеглов, 1999; Крупеников, 2008; Поляков, Ярилова, 1978; Ярилова с соавт., 1983; Герасимова с соавт., 1992; Турзина, 1990, 2014; Gerasimova et al., 2016). В современной научной литературе широко освещены вопросы изучения агрегатного состава черноземов и их гумусного состояния (Санжарова с соавт., 1988; Когут с соавт., 2012; Масютенко с соавт., 2015; Королев с соавт., 2016; Мамонтов с соавт., 2016; Абросимов с соавт., 2019; Дубовик, Дубовик, 2019). Существуют публикации об изменении этих характеристик черноземов в результате различных экспериментов: внесения сложного компоста (Антоненко с соавт., 2016); дождевания на стоковых площадках (Дубовик, 2010, 2012); обработки

полимерными препаратами (Бганцов с соавт., 1988; Демидов с соавт., 2019). Однако данных о состоянии агрегатов черноземов непосредственно после воздействия на них водной эрозии очень мало (Чижикова с соавт., 2010). И так же немногочисленны данные о состоянии пахотных черноземов после лабораторных эрозионных экспериментов (Ларионов с соавт., 2018), а состояние агрегатов пахотных черноземов после лабораторных эрозионных экспериментов оценивалось впервые (Плотникова с соавт., 2018, 2019). Изложенные соображения послужили основанием для расширения изучения свойств агрегатов черноземов типичных после воздействия модельных мелководных склоновых потоков.

Цель работы

Оценить влияние транспортирующей способности склоновых мелководных потоков и степени смытости черноземов типичных на некоторые свойства их пахотных горизонтов на примере эродированных черноземов типичных Курской области.

Задачи работы

1. Оценить агрегатный состав и водоустойчивость структуры исследуемых почв и связь этих показателей с содержанием гумуса.
2. Проанализировать микростроение пахотных горизонтов эродированных черноземов.
3. Оценить изменение диаметра влекомых агрегатов в зависимости от скорости потока.
4. Провести верификацию уравнения транспортирующей способности потоков малой глубины.
5. Оценить морфометрические параметры агрегатов черноземов типичных и их изменение в результате воздействия модельных мелководных потоков.

Объект исследования – пахотные горизонты черноземов типичных мощных несмытого, слабо- и среднесмытого (Курская область).

Предмет исследования – изменение свойств почвы в результате природных и модельных эрозионных процессов.

Научная новизна

Впервые для чернозема типичного верифицировано уравнение транспортирующей способности водных потоков малой глубины. При изучении эрозионных процессов впервые применены микроморфометрические исследования, позволившие получить сведения о морфометрических параметрах почвенных агрегатов и их изменении в результате размыва модельным мелководным склоновым потоком. Кроме того, использование микроморфологического анализа позволило расширить знания о свойствах пахотных горизонтов черноземов типичных разной степени смытости.

Теоретическая и практическая значимость работы

Проведенная верификация уравнения транспортирующей способности водных потоков малой глубины позволяет в дальнейшем использовать это уравнение для расчетов транспортирующей способности в современных прогнозных моделях водной эрозии. Выводы, полученные в работе, расширяют представления о влиянии мелководных потоков на особенности агрегатов почв разной степени смытости.

Предложенная методика исследования морфометрических параметров агрегатов почв может быть использована в дальнейшем как для изучения результатов эрозионных процессов, так и для изучения влияния способов агротехники на свойства пахотных горизонтов различных окультуренных почв.

Методология диссертационного исследования

Основной метод, применяемый в работе – метод физического эксперимента на большом эрозионном лотке, позволяющий моделировать различные условия протекания эрозионных процессов на склонах, соответствующие природным. Применяемая методика была апробирована нами ранее на примере дерново-подзолистых почв (Демидов, Осанина, 2015). Для черноземов типичных апробированный метод использован впервые.

Дополнительным является микроморфологический метод, позволивший оценить как изменение свойств пахотных горизонтов черноземов типичных в ненарушенном сложении, так и влияние модельных эрозионных процессов на переносимые мелководным потоком агрегаты пахотных горизонтов исследуемых почв.

Также в работе использованы следующие методы исследования пахотных горизонтов черноземов типичных: морфологический, физический, химический, статистический.

Положения, выносимые на защиту

1. Вспашка и эрозионные процессы ухудшают качество структуры почвы, что выражается в увеличении доли глыбистых агрегатов, уменьшении коэффициента структурности и критерия водопрочности по сравнению с нераспаханным аналогом. При этом с увеличением степени смытости пахотных черноземов типичных коэффициент структурности пахотного горизонта уменьшается, а водопрочность увеличивается, что связано с усилением цементирующей роли карбоната кальция. Эрозионные процессы оказывают негативное влияние на гумусное состояние пахотных черноземов типичных Курской области, что выражается в уменьшении содержания гумуса в почве с увеличением степени ее смытости.

2. Для черноземов типичных пахотных разной степени смытости верифицировано уравнение транспортирующей способности водных потоков малой глубины. В дальнейшем уравнение может быть верифицировано для других типов почв и применяться для расчетов в моделях водной эрозии почв.

3. Изменение микроморфометрических показателей агрегатов эродированных пахотных черноземов типичных в эрозионных экспериментах обусловлено как степенью смытости исходной почвы, так и скоростью размывающих модельных мелководных потоков. При этом в изученном диапазоне скоростей потока (0,3–0,58 м/с) влияние степени смытости исходной почвы проявляется сильнее, чем влияние мелководных потоков.

Степень достоверности

Исследования проведены на современном оборудовании с использованием методов, широко применяющихся в области почвоведения. Полученные экспериментальные данные с учетом особенностей экспериментов и выборок обработаны статистическими методами с помощью программ STATISTICA и RStudio. Выводы достоверны при принятой доверительной вероятности $P = 0,95$.

Апробация результатов

Результаты работы изложены на 10 конференциях: VII съезд Общества почвоведов им. В.В. Докучаева и Всероссийская с международным участием научная конференция (Белгород, 2016 г.), «Почвоведение: горизонты будущего – 2017» (Москва, 2017 г.), XX Докучаевские молодежные чтения «Почва и устойчивое развитие государства» (Санкт-Петербург, 2017 г.), XXIV Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2017» (Москва, 2017 г.), Всероссийская с международным участием научная конференция «Черноземы Центральной России: генезис, эволюция и проблемы рационального использования» (Воронеж, 2017 г.), Вторая всероссийская открытая конференция «Почвенные и земельные ресурсы: состояние, оценка, использование» (Москва, 2017 г.), Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2018» (Москва, 2018 г.), Юбилейный семинар «Маккавеевские чтения» (Москва, 2018 г.), Четвертая Открытая конференция молодых ученых «Почвоведение: горизонты будущего. 2020» (Москва, 2020 г.), Международная научно-практическая конференция «Инновационно-технологические основы развития адаптивно-ландшафтного земледелия», посвященная 50-летию со дня основания ВНИИ земледелия и защиты почв от эрозии (Курск, 2020 г.).

Также результаты работы докладывались и обсуждались на заседаниях кафедры эрозии и охраны почв факультета почвоведения МГУ (2016-2020 гг.).

Работа выполнена на базе кафедры эрозии и охраны почв факультета почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова и лаборатории минералогии и

микроморфологии почв ФГБНУ ФИЦ "Почвенный институт имени В.В. Докучаева".

Личный вклад автора заключается в анализе научной литературы по теме исследования, участии в полевых и лабораторных работах, проведении статистической обработки полученных экспериментальных и аналитических данных, обобщении и интерпретации полученных результатов, представлении результатов исследования на научных конференциях, подготовке научных статей по результатам исследования и настоящей рукописи.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 13 научных работ, из них 4 статьи в рецензируемых журналах из списков Scopus, Web of Science, RSCI Web of science и дополнительного списка рецензируемых научных изданий для защиты в диссертационном совете МГУ из Перечня рекомендованных Минобрнауки России, 1 свидетельство о государственной регистрации базы данных и 8 статей в сборниках и тезисов докладов.

Объем и структура диссертации

Материалы работы изложены на 134 страницах, содержат 5 таблиц, 16 рисунков, 3 приложения на 15 страницах. Текст работы состоит из введения, обзора литературы (глава 1), описания объектов и методов исследования (глава 2), представления результатов исследования и их обсуждения (глава 3), выводов и заключения. Список литературы включает 262 источника, в том числе 100 – на иностранных языках.

Благодарности

Автор выражает глубокую благодарность научным руководителям – Демидову Валерию Витальевичу и Лебедевой Марине Павловне – за неоценимую помощь, чуткое руководство и поддержку на всех этапах работы.

Отдельную благодарность автор выражает Скворцовой Елене Борисовне за научные консультации в области морфометрического анализа почвы и Фастовцу Илье Александровичу за консультации и помощь в области статистического анализа данных.

Автор выражает благодарность коллективам кафедры эрозии и охраны почв факультета почвоведения МГУ и лаборатории минералогии и микроморфологии почв ФИЦ «Почвенный институт им. В.В. Докучаева», в особенности Макарову О.А., Абдулхановой Д.Р., Полубневу А.А. и Лебедеву М.А. за помощь в самых разных аспектах работы.

Семье, коллегам и близким, в частности Плотникову В.А., Крыхтиной Е.И., Мелиховой Е.А., Романис Т.В., Котельниковой А.Д., Ильясову Д.В., Чепцову В.С., Достоваловой Е.В. автор глубоко признателен за вдохновение, веру и поддержку на всем протяжении работы.

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

1.1. Транспортирующая способность потоков в эрозионных исследованиях

1.1.1. Понятие эрозии почв, водная эрозия, ручейковая эрозия

Слово «эрозия» происходит от латинского *erosio* «разъедание». Эрозия почвы – «совокупность взаимосвязанных процессов отрыва, переноса и отложения почвы (иногда материнской и подстилающей пород) поверхностным стоком временных водных потоков и ветром» (Кузнецов, Глазунов, 2004). Водная эрозия определяется как «совокупность взаимосвязанных процессов набухания, отрыва, переноса и отложения почвы (иногда материнской и подстилающей пород) поверхностным стоком временных водных потоков дождевых, талых, поливных и сбросных вод» (Каштанов с соавт., 2013). Водные потоки постоянного характера в это понятие не входят.

Водная эрозия почвы происходит под действием поверхностного стока, формирующегося на склонах. Основные виды поверхностного стока: дождевой, талый и сток поливной воды. Им соответствуют три вида эрозии почв: 1) дождевая эрозия (при сильных дождях – ливневая); 2) эрозия при снеготаянии; 3) ирригационная эрозия. Эти виды эрозии различаются «как по источнику водного стока, так и по механизму процесса и наносимому ими ущербу».

Эрозия почвы при снеготаянии возникает при стоке талых вод и может продолжаться от нескольких дней до месяца. Ирригационная эрозия почвы проявляется при орошении, делится на подвиды в зависимости от способа орошения: эрозия при поливе напуском по бороздам, по полосам, по чекам, при дождевании» (Каштанов с соавт., 2013).

Эрозия почвы также делится на поверхностную (смыв) и линейную (размыв). Граница перехода поверхностной эрозии в линейную условна: считается, что если следы эрозии на поле исчезают в результате обычной обработки почвы, то это поверхностная эрозия, если нет – линейная. Как дождевая, так и ирригационная, и вызванная стоком талых вод эрозия может

приводить и к смыву, и к размыву почвы в зависимости от местоположения ее на склоне.

Поверхностная эрозия, в свою очередь, делится на плоскостную и струйчатую (ручейковую), причем смыв почвы осуществляется преимущественно ручейковыми мелководными потоками (Кузнецов, Глазунов, 2004). Количественно процесс эрозии почв характеризуется «интенсивностью смыва, выражаемой в т/га в год, либо мощностью утраченного слоя почвы в мм/год. В этих же единицах измеряют и скорость почвообразования. О степени опасности эрозии можно судить, сопоставив интенсивность смыва почвы со скоростью почвообразовательного процесса. Если интенсивность эрозии меньше скорости почвообразования, то можно предположить, что она не представляет опасности для данной почвы. Такую эрозию принято считать нормальной. Если интенсивность потерь почвы больше скорости почвообразования, ее считают ускоренной» (Кузнецов, Глазунов, 2004).

1.1.2. Причины взвешивания частиц, движение частиц наносов

К причинам взвешивания частиц относят пульсационные скорости турбулентных потоков (Великанов, 1944; Михайлова, 1966), несимметричное обтекание потоком частиц у дна (Гончаров, 1938; Vagnold, 1966; Россинский, 1968). Существует мнение, что «отрыв частиц совершается теми струями потока, скорость которых превышает некоторую пороговую величину» (Ларионов, Краснов, 2000). А в том случае, когда речь идет о боковой эрозии в русле, показано влияние силы тяжести, усиливающей отрыв частиц (Ларионов с соавт., 2015).

По характеру движения наносы «принято делить на взвешенные и влекомые (донные). Взвешенные наносы транспортируются в толще потока вплоть до поверхностных его слоев. Донными, или влекомыми, являются наносы, отдельные частицы которых волочатся или перекатываются по дну, поднимаясь над ним на величину, соразмерную диаметру частиц. Между этими

двумя основными формами движения выделяется переходная форма — сальтация, или скачкообразное перемещение частиц» (Чалов, 2016).

А.В. Караушев (1977) писал, что сальтацию можно считать основным видом перемещения влекомых наносов. J.S. Bridge и D.F. Dominic (1984) считали, что сальтация доминирует, а качение и скольжение частиц происходят в меньших масштабах, главным образом между скачками. Впервые сальтацию отметил G.K. Gilbert (1914), однако не сделал попыток объяснить ее механизм. В дальнейшем вероятность срыва и перемещения донных частиц (в том числе сальтацией) в теории и на практике изучали Н.А. Einstein (1942) и М.А. Великанов (1955), Н.А. Михайлова (1966), V. Tsuchiya (1969), И.Ф. Карасев (1975), К.И. Россинский (Россинский, 1968; Россинский, Любомирова, 1972). Попытка экспериментально показать особенности скачкообразного движения частиц была предпринята Р. Danel с соавторами (1953). R.A. Wagnold (1979) связывал сальтирующее движение с касательным напряжением потока. Изучение и моделирование сальтации донных наносов и связи этого процесса с характеристиками потока продолжают до сих пор (Wiberg, Smith, 1985; Niño, García, 1994; Li, Abrahams, 1997; Lee et al., 2006). Обычно такие модели основываются на уравнении Лагранжа, определяющем движение частиц, и используют различные предположения относительно граничных условий для интегрирования траекторий сальтации частиц.

Существует несколько основных теорий движения взвешенных наносов. Полуэмпирическая диффузионная теория, являющаяся частью динамической теории турбулентности, серьезно развивалась В.М. Маккавеевым (Маккавеев, Коновалов, 1940; Маккавеев, 1963). Согласно А.В. Караушеву (1977), в этой теории «рассматриваются пространственные нестационарные модели переноса количеств движения, примесей (растворенных и взвешенных веществ), тепла и даются общие дифференциальные уравнения движения, диффузии и теплопроводности. Значительное внимание в теории уделяется граничным условиям и структуре коэффициентов турбулентного переноса (турбулентной вязкости, турбулентной диффузии и теплопроводности). Особо следует

отметить, что в теории детально рассматривается влияние русловой шероховатости на поток и ее параметры учитываются как в формулах коэффициентов переноса, так и в выражениях, определяющих граничные условия». Рассматривая общее уравнение турбулентной диффузии для равномерного установившегося потока, можно сказать, что приращение средней концентрации наносов во времени по оси x , направленной в сторону осредненного течения, зависит от гидравлической крупности наносов и коэффициента турбулентной диффузии. «Гидравлическая крупность частицы – скорость ее равномерного падения в спокойной воде» (Караушев, 1977). Коэффициент турбулентной диффузии, в свою очередь, зависит от коэффициента турбулентного обмена, определяющего перенос количеств движения, и плотности жидкости, составляющей основной объем потока. «В Советском Союзе применительно к гидрологическим объектам указанная теория развивалась, помимо В.М. Маккавеева, М.А. Великановым [20], а в последующие годы И.И. Леви [85], А.В. Караушевым [53, 54, 58, 64], Г.С. Башкировым [8], И.Ф. Карасевым [52] и другими. Из зарубежных работ имеют известность исследования М.О. Брайена [212], В. Ванони [230] и др.» (Караушев, 1977). В последующие годы диффузионная теория также развивалась и использовалась W.E.H. Culling (1965), C. Tsai с соавт. (2014).

Поскольку диффузионная теория имела свои недостатки, М.А. Великанов (1944) попытался разработать новую – гравитационную – теорию движения взвешенных наносов с целью учета работы потока по взвешиванию частиц. Также он предполагал учитывать взаимное влияние взвешенных наносов и их воздействие на структуру потока, чего не было в диффузионной теории. Однако это не было достигнуто.

Существуют и другие теории: «Теория Г.И. Баренблатта – А.Н. Колмогорова основывается на представлениях о локально-изотропной турбулентности и модели переноса наносов в турбулентном потоке. Одним из важных ее выводов является доказательство уменьшения пульсаций с увеличением концентрации взвеси в потоке.

Теория взвесенесущего турбулентного потока Ф.И. Франкля представляет собой систему дифференциальных уравнений, которая включает в себя уравнения неразрывности, количества движения и энергии осредненного и пульсационного движения. В ней отсутствуют компоненты турбулентных напряжений, а скоростное поле потока принимается не зависящим от присутствия твердых частиц в потоке. В результате эта теоретическая модель близка к диффузионной теории» (Чалов, 2016).

1.1.3. Характеристики эродирующих потоков, понятие транспортирующей способности водного потока

Весеннее снеготаяние и интенсивные летние дожди приводят к формированию в водораздельной части склона луж и ручейков с малыми скоростями движения воды. Перемещаясь ниже по склону, они сливаются в крупные струи. По мере удаления от водораздела их глубина и скорость увеличиваются (Кузнецов, Глазунов, 2004).

Основными характеристиками склоновых водных потоков являются живое сечение потока (ω , м²), гидравлический радиус (R , м), расход воды (Q , м³/с), скорость потока (V , м/с). С расходом воды в потоке и его скоростью неразрывно связано понятие транспортирующей способности потока.

Разные исследователи дают различные определения понятия «транспортирующая способность потока». Например, по К.В. Разумихиной (1966) транспортирующая способность потока есть его способность переносить некоторое определённое количество наносов, имеющих определённый гранулометрический состав.

Н.А. Михайлова (1966) подчеркивала отличие транспортирующей способности от расхода наносов: «Под транспортирующей способностью потока понимают количество наносов определённого состава, которое поток может нести при данных гидравлических и морфометрических характеристиках в единицу времени. Твёрдым же расходом называется то количество наносов, которое поток действительно переносит в единицу времени».

По М.Э. Факторовичу, транспортирующая способность состоит из двух частей: 1) размывающая способность потока – количество грунта, которое поток может разрушить и снять с единицы площади в единицу времени; 2) собственно транспортирующая способность потока – предельное количество наносов, которое поток может перемещать в единицу времени через единицу площади живого сечения потока (Факторович, 1970).

Н.Б. Барышников и И.В. Попов (1988) определяли транспортирующую способность как «наибольшее количество наносов, которое поток может транспортировать при заданных гидравлических характеристиках», а расход наносов как «количество наносов, которое он переносит в данных конкретных условиях».

Н.И. Алексеевский и Р.С. Чалов уточняли, что транспортирующая способность «численно равна расходу наносов, который поток в состоянии переносить при заданных гидравлических условиях» (Алексеевский, Чалов, 1997).

Кроме того, Г.В. Бастраковым и Г.А. Ларионовым (1996) предложено определение транспортирующей способности потока как такого его насыщения наносами, при котором имеет место динамическое равновесие между оседанием частиц и их срывом, т.е. количество срываемых частиц в единицу времени равно количеству оседающих на дно потока.

Суммируя определения транспортирующей способности и расхода наносов, Г.А. Ларионов с соавторами (Ларионов с соавт., 2005) утверждают, что расход наносов не всегда равен транспортирующей способности потока. В конечном счете, различия этих понятий сводятся к тому, что транспортирующая способность потока – это предельное количество наносов, которое поток способен транспортировать, а расход наносов – количество наносов, переносимое потоком в действительности (Кондратьев, 2008).

1.1.4. Расход наносов как результирующая транспортирующей способности потока и поступления наносов

Расход донных наносов связывается или с силой влечения (Einstein, 1942; Егиазаров, 1949; Гончаров, 1954), или с расходом воды (Jeffreys, 1929; Meyer-Peter, Müller, 1948; Никитин, 1951), или со средней скоростью потока (Гончаров, 1938; Леви, 1948). Известны многие другие формулы расхода наносов, например, авторов: В.М. Маккавеева (Маккавеев, Коновалов, 1940), М.А. Великанова (1949), А.В. Караушева (1951, 1960), В.Н. Гончарова (1954, 1962), А.Н. Гостунского (1954), J. Herbertson (1968), И.Ф. Карасева (1975), К.В. Гришанина (1979), К.И. Россинского и В.К. Дебольского (1980), Г.В. Железнякова (1988), Н.С. Знаменской (1992), И.Ф. Карасева (1995) и других. В обширном обзоре, сделанном А.В. Shvidchenko (2000), приводится наиболее полный перечень формул расчета расхода наносов.

В случаях, когда наблюдается равновесие между транспортирующей способностью потока, поступлением наносов на участок и фактическим расходом наносов для расчёта транспорта наносов допустимо применять формулы расчёта транспортирующей способности потока. В этих случаях тип русловых процессов не изменяется.

Дисбаланс между транспортирующей способностью и поступлением наносов на системном уровне «река–водосбор» может приводить к изменению продольного профиля реки, а на уровне «поток–русло» – к ответной реакции реки, которая будет выражаться в изменении формы русла и русловых процессов. При равенстве расхода наносов и транспортирующей способности количество взмываемых и осаждающихся частиц на единицу поверхности дна в единицу времени совпадает. Если расход наносов больше транспортирующей способности, то поток не в состоянии переносить весь объём наносов, и часть из них переходит в состав речных отложений, то есть происходит заиление русла. Противоположные процессы возникают при расходе наносов, меньшем транспортирующей способности. Для восстановления их равенства частицы,

находящиеся в составе речных отложений переходят под действие потока во взвешенное состояние. Изменение соотношения между расходом наносов и транспортирующей способностью задействует механизмы, регулирующие перенос твердых частиц и колебания характеристик стока наносов во времени. Соотношение между расходом наносов и транспортирующей способностью зависит не только от величины транспортирующей способности. На него оказывает влияние и фактический сток наносов. Колебания стока наносов (при сохранении величины транспортирующей способности) приводят к возникновению направленного обмена материалом в системе «поток – русло». Изменение фактического стока наносов зависит от физико-географических условий формирования стока на водосборах и в долинах рек, а транспортирующая способность – от гидравлических и морфометрических характеристик руслового потока. Как следствие, возникает сложная зависимость стока наносов от определяющих факторов (Алексеевский, Чалов, 1997). В этих случаях формулы транспортирующей способности для расчетов расхода наносов неприменимы.

Применяемая в гидрологии теория транспорта наносов основана на динамической теории турбулентности (Караушев, 1960; Маккавеев, 1963), называемой полуэмпирической, поскольку основной параметр – коэффициент турбулентной вязкости – оценивается в этой теории на основе опытных данных или эмпирических формул. А.В. Караушевым (1963) были сформулированы основные аспекты комплекса проблем речных наносов, которые нашли решение в работах сотрудников лаборатории наносов ГГИ (Караушев, 1977; Сток наносов..., 1977).

Существуют разработки по одновременному применению гидравлических и статистических методов для оценки транспорта наносов (Карасев, 1975). В работе Ш.Р. Позднякова и В.В. Романовского (1988) излагается вероятностно-динамический подход к анализу механизма взмыва и перемещения частиц наносов. Такой подход даёт возможность учесть как динамическое воздействие осреднённого течения, так и случайный характер

воздействия турбулентных пульсаций движения жидкости, характеризующих транспорт наносов (Романовский, Дебольский, 1988).

Г.А. Ларионов с соавторами, анализируя различные уравнения, пригодные для использования в моделировании водной эрозии, пришел к выводу, что «большинство из них имеют одни и те же аргументы», но «нет ни одного уравнения, которое бы удовлетворительно описывало весь спектр расхода наносов потока и гидравлических характеристик потока» (Ларионов с соавт., 2000). З.Д. Копалиани и А.А. Костюченко (2004) предложили разделить известные методы и формулы расчета расхода донных наносов (около 200) на группы по определяющему аргументу. Среди таких аргументов названы расход воды, скорость потока, мощность потока, уклон водной поверхности, касательное напряжение и других характеристики потока и наносов. Н.Б. Барышников (2007) разделил уравнения на 4 группы, однако анализ этих уравнений показал, что «большинство формул и методов расчета расходов донных наносов не учитывают эффект взаимодействия руслового и пойменного потоков», а это приводит к большим погрешностям расчетов. В дальнейшем он пришел к выводу, что в формулы расчетов необходимо также вводить поправочные коэффициенты для учета глубины и шероховатости пойм (Барышников с соавт., 2009).

Часто уравнения отрыва частиц почв и грунтов включают параметры, зависящие от свойств размываемого материала: касательное напряжение (Foster, Meyer, 1972), удельная мощность потока (Hairsine, Rose, 1992), размывающая скорость (Fortier, Scobey, 1926; Мирцхулава, 1970), гидравлическая крупность наносов (Караушев, 1977), коэффициент эродируемости. При этом механизм влияния наносов на эродирующую способность потока пока недостаточно изучен. Так, G.R. Foster и L.D. Meyer (1972) показали, что интенсивность размыва почвы в лотке снижается при подаче наносов, а М.А. Merten с соавторами (2001) выявили тот факт, что на интенсивность отрыва частиц влияют как донные, так и взвешенные наносы. По мнению авторов, это происходит по двум причинам: донные наносы

защищают поверхность ложа потока от размыва, а взвешенные наносы снижают турбулентность потока и касательное напряжение, воздействующее на русло (Merten et al., 2001). Исследования Г.А. Ларионова с соавторами (2004) показали, что донные наносы с плотностью меньшей, чем плотность размываемого грунта, уменьшают темпы смыва и наоборот.

Говоря о транспортирующей способности, чаще всего имеют в виду крупные русловые потоки – реки, каналы, борозды. В советское время эта тема широко изучалась в нашей стране. В речных потоках расход наносов, как правило, меньше или равен транспортирующей способности. Вопрос расчета транспортирующей способности речных потоков и водных потоков в каналах и поливных бороздах к настоящему времени уже достаточно изучен (Замарин, 1951; Гончаров, 1954; Гостунский, 1954; Чекулаев, 1955; Караушев, 1960; Лелявский, 1961; Разумихина, 1966; Леви, 1968; Архангельский, 1974; Дебольский, Котков, 1977; Железняков, 1988). Нас же интересуют особенности эрозионных процессов, происходящих в небольших руслах потоков малой глубины, формирующихся на склонах, а также возможность количественно оценить на системном уровне «водный поток – почва» их способность переносить либо аккумулировать определённую массу почвенного материала.

На склонах отрыв частиц и их транспорт осуществляются преимущественно за счет разбрызгивания дождевыми каплями и (или) мелководным поверхностным потоком (Nearing et al., 1991). Если разбрызгивание почвы дождевыми каплями в естественных и лабораторных условиях изучено достаточно полно (Ellison, 1944; Free, 1960; Smith, Wischmeier, 1962; Poesen, Savat, 1981; Al-Durrah, Bradford, 1982; Nearing, Bradford, 1985; Bradford et al., 1987; Gantzer et al., 1987), то отрыв связных грунтов мелководным прозрачным потоком в лабораторных условиях получил меньшее внимание.

Обзор существующих формул показывает, что нет формулы, которая обеспечивала бы достаточную точность вычислений расходов наносов. Причинами этого являются как сложность переноса данных с лабораторных

лотков на полевые условия, так и отсутствие надёжных натуральных данных по измерению расходов наносов. Абсолютные значения расхода наносов, транспортирующей способности, поступления наносов трудно измеримы и не находят практического применения.

1.1.5. Изучение транспортирующей способности ручейковых потоков

Необходимость изучения механизмов отрыва, переноса и отложения почвенного материала мелководными потоками на склонах в последнее время приобретает всё бóльшую актуальность. Это связано с тем, что деградация земель, весомый вклад в которую вносит ручейковая эрозия, угрожает всемирной продовольственной безопасности (Каштанов с соавт., 2013). К настоящему моменту уже существует ряд математических зависимостей, позволяющих проводить расчеты транспортирующей способности мелководных склоновых потоков.

Одной из наиболее известных и часто применяемых формул транспортирующей способности является формула, предложенная в 1963 г. M.S. Yalin. Она описывает транспорт донных наносов для устойчивого и равномерного турбулентного течения и наносов, состоящих из зерен одинакового размера и формы (Yalin, 1963). Впоследствии многие исследователи применяли эту формулу как на примере русловых потоков (Fogle, Varfield, 1992), так и мелководных. В 1972 г. G.R. Foster и L.D. Meyer предложили описывающую отрыв частиц потоком зависимость, в которой скорость отрыва является функцией отношения расхода наносов к транспортирующей способности потока (Foster, Meyer, 1972). Спустя 17 лет, в 1989 г., вышла статья G.R. Nearing с соавторами (Nearing et al., 1989), освещающая структуру модели эрозии WEPP (Water Erosion Prediction Project). Модель позволяет оценивать поверхностную, ручейковую и ирригационную эрозию (Flanagan et al., 2001). Формула транспортирующей способности мелководных потоков в ней является модификацией уравнения M.S. Yalin

(1963). В результате транспортирующая способность (T_c) рассчитывается как функция касательного напряжения (τ_f) сдвига частицы:

$$T_c = k_t \tau_f^{3/2}, \quad (1)$$

где k_t – транспортный коэффициент, зависящий от размера и плотности частиц.

В целом для оценки транспортирующей способности за рубежом было предложено немало формул, достаточно удовлетворительно ее описывающих (Beasley, 1977; Finkner et al., 1989; Nearing et al., 1989; Govers, 1990, 1992; Prosser, Rustomji, 2000; Flanagan et al., 2007; Zhang et al., 2008; Ali et al., 2013; Mahmoodabadi et al., 2014).

Однако еще в 1992 г. G. Govers высказал сомнение в применимости большинства этих формул, разработанных для каналов и рек, для оценки транспортирующей способности мелководных потоков из-за различий в гидравлических условиях между каналами (реками) и ручейковыми потоками. G. Govers проанализировал множество формул, используя эмпирический материал, полученный при моделировании ручейковой эрозии в лабораторных условиях. Уклоны русла колебались от 0,017 до 0,21, средний размер хорошо сортированных кварцевых зерен в этих экспериментах составлял 0,58-1100 мкм, удельный расход воды колебался от среднего до высокого ($2 \cdot 10^{-4}$ – $150 \cdot 10^{-4}$ м³/с). В результате анализа G. Govers обнаружил, что ни одна из существовавших к 1992 г. формул не дает удовлетворительных результатов по всему спектру имеющихся данных. Также он отметил, что простые эмпирические уравнения, основанные на напряжении сдвига, удельной и эффективной мощности потока, как и основанная на касательном напряжении сдвига формула H.S. Low (1989), могут быть использованы для прогнозирования транспортирующей способности склоновых потоков хотя бы в некоторых случаях (Govers, 1992).

В последующие годы создавались различные уравнения транспортирующей способности на основании удельного расхода потока и уклона русла (Prosser, Rustomji, 2000; Zhang et al. 2009; Mahmoodabadi et al.,

2014). По результатам экспериментов на лотке с неразмываемым руслом A.D. Abrahams с соавторами (2001) предложили формулу, где транспортирующая способность рассматривается как функция не только касательного напряжения, но и гидравлической крупности наносов, а также шероховатости русла. Разными авторами на основании лабораторных экспериментов установлена зависимость транспортирующей способности ручьев от мощности потока (De Roo et al., 1996; Misra, Rose, 1996; Morgan et al., 1998; Li, Abrahams, 1999; Li et al., 2011).

Сотрудниками НИЛ эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева Географического факультета МГУ предложена гидрофизическая модель эрозии почв, которая основывается на «трех постулатах: 1) эрозия – работа водного потока, в физическом смысле, по отрыву и последующему транспорту сорванных частиц почвы, совершаемая за счет его кинетической энергии; 2) отрыв частиц совершается теми струями потока, скорость которых превышает некоторую пороговую величину; 3) в точке, где сорванная частица касается дна потока, отрыв другой частицы невозможен. Согласно первому постулату интенсивность отрыва частиц пропорциональна кубу скорости потока, если он не содержит наносов. Из второго постулата следует, что в области скоростей, близких к пороговой величине, интенсивность отрыва частиц зависит от доли пульсационных значений скорости, превышающих пороговую. Первый постулат гидрофизического подхода к описанию эрозии, согласно которому эрозия есть работа водного потока, приложим и к транспорту наносов. Второй постулат также справедлив в отношении транспорта наносов. Действительно, захват частицы возможен лишь в том случае, если скорость течения в непосредственной близости к частице превысит пороговую величину. Однако третий постулат неприменим к транспорту наносов. Его следует заменить на другой, согласно которому при отсутствии наносов и насыщении потока наносами до величины, соответствующей его полной транспортирующей

способности, количество наносов, оседающих на дно, равно количеству наносов, захватываемых со дна.

Из последнего постулата следует, что транспортирующая способность потока пропорциональна интенсивности захвата частиц наносов и обратно пропорциональна интенсивности их оседания. Захват частиц рыхлого материала и отрыв частиц связного грунта имеют одну и ту же гидрофизическую природу» (Ларионов с соавт., 2000).

Тогда для описания захвата частиц рыхлого материала и транспортирующей способности потока можно использовать уравнения отрыва частиц связного грунта. Отсюда формула транспортирующей способности потока может быть записана в виде (Ларионов, Краснов, 1992):

$$q_n = k_T \gamma u^3 \left[1 + 10^{-a \left(1 - \frac{u}{u_0} \right)} \right]^{-1} \left[1 + 10^{b \left(1 - \frac{u^2}{u_0^2} \right)} \right]^{-1}, \quad (2)$$

где « q_n – удельный (на единицу ширины потока) расход наносов; u – скорость потока; γ – объемный вес воды; u_0 – пороговая скорость; k_T – коэффициент транспорта, зависящий от затрат энергии потока на захват частиц наносов и придание им скорости, близкой к скорости потока, а также от скорости оседания; a и b – коэффициенты, зависящие от диапазона разброса пульсационных значений скорости и сил сопротивления частиц захвату потоком соответственно» (Ларионов, Краснов, 1992).

Общее уравнение для всех форм движения – влечения, сальтации и во взвешенном состоянии:

$$q_n = \gamma u^3 \left\{ k_{T1} \left[1 + 10^{-a \left(1 - \frac{u}{u_{01}} \right)} \right]^{-1} \left[1 + 10^{b_1 \left(1 - \frac{u^2}{u_{01}^2} \right)} \right]^{-1} \left[1 + 10^{-a \left(1 - \frac{u}{u_{02}} \right)} \right]^{-1} \right\} + k_{T2} \left[1 + 10^{-a \left(1 - \frac{u}{u_{02}} \right)} \right]^{-1} \left[1 + 10^{b_2 \left(1 - \frac{u^2}{u_{02}^2} \right)} \right]^{-1} \left[1 + 10^{-a \left(1 - \frac{u}{u_{03}} \right)} \right]^{-1} + k_{T3} \left[1 + 10^{a \left(1 - \frac{u}{u_{03}} \right)} \right]^{-1} \left[1 + 10^{b_3 \left(1 - \frac{u^2}{u_{03}^2} \right)} \right]^{-1}, \quad (3)$$

где « k_{T1} , k_{T2} , k_{T3} – коэффициенты транспорта наносов путем влечения, сальтации и взвешивания, соответственно; u_{01} , u_{02} , u_{03} – пороговые значения скорости для влечения, сальтации и взвешивания соответственно; b_1 , b_2 , b_3 – коэффициенты

распределения для силы сопротивления отрыву частиц при движении влечением, сальтацией и взвешиванием, соответственно» (Ларионов, Краснов, 1992).

В 2006 г. на географическом факультете МГУ им. М.В. Ломоносова на основе физической концепции транспорта наносов (Ларионов, Краснов, 1997, 2000) разработано уравнение транспортирующей способности для мелководных склоновых потоков (Ларионов с соавт., 2006). Проведя аппроксимацию уравнения в широком диапазоне скоростей и расходов воды, авторы пришли к выводу: «транспортирующая способность потока пропорциональна кубу его скорости, однако коэффициенты транспорта для каждой формы движения наносов свои и их величины не зависят от крупности наносов» (Ларионов с соавт., 2006).

На кафедре эрозии и охраны почв факультета Почвоведения МГУ также разработаны две модели транспорта наносов склоновыми мелководными потоками. Первая модель предложена В.М. Гендуговым с соавторами (2007) и разработана с применением гидравлического подхода, учитывающего особенности движения суспензии на склоне (в том числе малую объемную концентрацию твердой фазы в суспензии). В рамках гидравлического подхода рассматриваются потоки, чья продольная длина во много раз превышает их характерную глубину, причем рассматриваются только средние по глубине параметры потока. Строится односкоростная модель движения суспензии, учитывающая подъемную силу смерчеподобных c -вихрей. Авторами определена «структурная формула для транспортирующей способности потока» (Гендугов с соавт., 2007):

$$\beta = C \cdot \left(\frac{u^2}{gH} - \frac{4}{3} \cdot \frac{d}{H} \cdot \frac{(\rho_s/\rho) - 1}{K_d} \right)^{\frac{1}{\gamma}}, \quad (4)$$

где β – транспортирующая способность потока, кг/м³; g – ускорение свободного падения (9,81 м/с²); H – глубина потока, м; d – диаметр частиц, м; ρ_s – плотность твердой фазы, кг/м³; ρ – плотность воды, кг/м³; K_d – коэффициент

подъемной силы с-вихря; u – скорость потока, м/с; C – эмпирический коэффициент, кг/м³; $1/\gamma$ – эмпирический показатель степени.

Как видно из формулы (3), минимальная скорость транспорта частиц определяется их диаметром и не зависит от глубины потока:

$$u = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot \frac{d \cdot g \cdot (\rho_{\text{ч}}/\rho) - 1}{K_d}}, \quad (5)$$

Вторая модель предложена Д.Р. Абдулхановой и В.Я. Григорьевым (2009) и представляет собой физически обоснованное и упрощенное уравнение транспорта песчаных наносов потоками малой глубины при больших скоростях их движения на крутых склонах:

$$q_{\text{тр}} = \frac{B_1 \rho q_c^{0,86} J^{1,72}}{k_k^{3,3} d^{0,98}}, \quad (6)$$

где B_1 – эмпирический коэффициент, равный $10,3 \cdot 10^{-3}$; ρ – плотность воды, кг/м³; q_c – удельный расход воды, кг/м²·с; J – уклон дна потока; k_k – эмпирический корректирующий коэффициент; d – средневзвешенный размер транспортируемых частиц, м. В этой модели используются достаточно надежно определяемые гидравлические характеристики потока и свойства наносов. Сопоставление $q_{\text{тр}}$, рассчитанной по уравнению (6) с экспериментально установленными ее значениями при физическом моделировании транспорта песчаных наносов при тех же величинах исходных данных показало очень высокое их соответствие (относительная ошибка составляла от –4 до +12,7 %) (Абдулханова, Григорьев, 2009).

В модификации модели предельного транспорта наносов (Абдулханова, Григорьев, 2009), предложенной В.Я. Григорьевым (2012), была установлена модификация обобщённого уравнения расхода наносов с более полным учетом факторов:

$$q_{\text{тр}} = A \left(\frac{v}{\sqrt{g}} \right)^{0,33} \rho_n \rho d^{0,5} v_{\text{крс}} \left(v_{\partial} / v_{\partial \text{крс}} \right)^{4,3} / \rho_{\text{ч}}, \quad (7)$$

где A – эмпирический коэффициент, равный 0,1; ρ_n , $\rho_{\text{ч}}$ – плотность частиц соответственно песка и транспортируемого материала, кг/м³; $v_{\text{крс}}$, $v_{\partial \text{крс}}$ – средняя

и донная критические скорости потока, соответственно равные $v_{крс}=k_k v_{кр}$ и $v_{дкрс}=k_k v_{дкр}$, м/с; $v_{кр}$ и $v_{дкр}$ – критическая и донная критическая скорости начального транспорта твердых частиц, м/с; k_k – параметр, учитывающий средний размер транспортируемых частиц, соотношение критической и донной критической скоростей потока, глубину потока и наибольшую высоту подъема частиц. Предложенная модель предельного транспорта песчаных наносов для использования в моделировании ручейковой эрозии требует наличия дополнительного блока, включающего надежные методы определения плотности и размера транспортируемых и непрерывно разрушаемых потоком почвенных частиц (Григорьев, 2012).

Из изложенного выше материала можно сделать следующее заключение. До 2000-х гг. изучение транспорта наносов проводилось в основном применительно к речным системам или потокам в каналах, разрабатывались основные концепции и модели процессов, слагающих транспорт наносов. Одновременно с этим приблизительно с 1980-х гг. начались активные попытки применения к мелководным потокам зависимостей, полученных для крупных потоков. В настоящее время основные работы в России и мире ведутся в направлении верификации разработанных ранее моделей и формул. Если первоначально их проверяли в лабораторных условиях на модельных песках и смесях, то в последние десятилетия большое внимание исследователей привлекает верификация формул и проверка моделей применительно уже к натурным объектам – почвам, как в виде насыпных образцов, так и в полевых условиях (Polyakov, Nearing, 2003; Laflen et al., 2004; De Baets et al., 2006; Wirtz et al., 2012; Wu et al., 2016; Zhao et al., 2020; Керженцев с соавт., 2006; Ларионов с соавт., 2010, 2017, 2019).

1.2. Микроморфологические исследования черноземов

В микроморфологическом отношении черноземы можно назвать одними из самых глубоко изученных почв. Многие отечественные ученые исследовали микроморфологические свойства различных типов целинных, антропогенно-

преобразованных и эродированных черноземов (Поляков, Ярилова, 1978; Ярилова с соавт., 1983; Герасимова с соавт., 1992; Турсина, 1990, 2014; Gerasimova et al., 2016). Выявлено, что сложение гумусовых горизонтов целинных черноземов однородное, рыхлое, преобладают межагрегатные поры, поры-ходы и камеры, преимущественно биологического генезиса. Структура сформирована почвенной фауной, выделяются агрегаты преимущественно второго (иногда третьего) порядка (Медведев, 1968). Гумус типа мулль (mull), имеющий окраску от светло-бурой до темно-бурой (почти черной), состоящий из высокодисперсных органических веществ, образующих гомогенную массу с минеральной частью почвы (Толковый словарь по почвоведению, 1975), равномерно распределен. Преобладает гуминовый гумус (Быстрицкая, Герасимова, 1988).

Микростроение пахотных черноземов изучено достаточно подробно на примере карбонатных черноземов Предкавказья (Поляков с соавт., 1970, 1972), южных черноземов европейской части СССР (Поляков, 1979), типичных и обыкновенных черноземов Украины (Медведев, 1979; Поляков, 1981), оподзоленных, выщелоченных и типичных черноземов Заволжско-Предуральской лесостепи. Для всех изученных черноземов выявлены как общие, так и специфические микропризнаки, обусловленные особенностями генезиса почв, экологическими условиями их функционирования и характером антропогенной нагрузки.

Для карбонатных пахотных черноземов характерно преобладание в пахотном горизонте микроагрегатов размером 0,1–0,25 мм преимущественно удлиненной формы. Глина имеет чешуйчато-волокнистую, местами с тенденцией к струйчатой, оптическую ориентировку, что является признаком припахивания материала горизонта В. Отмечены редкие рыхлые округлые сегрегации гидроокислов железа с пленками микрозернистого кальцита (Поляков с соавт., 1970, 1972).

При сравнении агрегатов залежи и обрабатываемых черноземов типичного и обыкновенного В.В. Медведевым (1979) было показано, что они

резко различны. У агрегатов обрабатываемых черноземов отсутствует окантовка гуматной пленкой, резко возрастает трещиноватость. Коэффициент оформленности, рассчитанный В.В. Медведевым по типу коэффициента оформленности галек, для агрегатов обрабатываемых почв существенно ниже, чем для залежных вариантов (0,12 и 0,50 соответственно). При обработке поры заполняются микроагрегатами (агрегатами размером $< 0,25$ мм) и тонкодисперсным материалом. Из-за самоуплотнения обрабатываемого слоя видимая пористость в вертикальной ориентации меньше, чем в горизонтальной. Таким образом, длительная механическая обработка черноземной почвы приводит к морфологической деградации макроагрегатов ($> 0,25$ мм), снижает стабильность порового пространства в почве (Медведев, 1979).

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 (Поляков, 1979). В микростроении оподзоленного и выщелоченного распаханых черноземов значительная роль принадлежит неагрегированному материалу, тогда как в гумусовом слое типичного пахотного чернозема неагрегированный материал отсутствует (Поляков, 1981).

В микростроении черноземов типичных Курской области (Санжарова с соавт., 1988) отмечена следующая закономерность: при вовлечении в сельскохозяйственное использование отмечена неоднородность микростроения – соотношение зон с хорошо выраженными агрегатами, массивной и губчатой микроструктуры смещается в сторону преобладания губчатого и массивного материала. При этом в основной почвенной массе резко уменьшается количество растительных остатков, распределение гумуса становится менее равномерным, появляются микрзоны с преобладанием коллоидно-дисперсных форм гумуса.

В.Н. Бганцов с соавторами (1988) с помощью микроморфологического метода показали изменение противозерозионной устойчивости чернозема

типичного среднесмытого в результате обработки почвы полимерным препаратом. Сравнение характера микростроения естественных и искусственных агрегатов среднесмытого чернозема, обработанных полимерными препаратами, показало, что микросложение естественных агрегатов – однородное компактное тонкопористое, в крайнем выражении приобретающее губчатый характер, помимо исходных межскелетных пор отмечается формирование новых пустот за счет образования перемычек из полимерного материала. Микростроение искусственных агрегатов существенно отличается: внутриагрегатная масса имеет ноздреватое сложение с большим количеством пустот, видимая пористость больше, чем в естественных агрегатах. Величина порового пространства возрастает за счет относительно крупных пор неправильной формы, образованных в результате неплотной беспорядочной упаковки скелетного материала. Также показано, что водопрочность, средневзвешенный диаметр естественных агрегатов, обработанных полимерами, существенно возросли по сравнению с контролем. Сравнительное исследование микростроения агрегатов несмытого и среднесмытого черноземов типичных до и после обработки полимерным препаратом показало, что микросложение агрегатов стало более компактным, менее пористым, поверхность агрегатов сглаживается за счет маскирующего действия полимерного препарата, в околопоровом пространстве часто встречаются агрегаты глинистых частиц. В среднесмытом варианте хорошо диагностируются отдельные пылеватые зерна, реже встречаются агрегаты глинистых частиц, значительно больше внутриагрегатных пор неправильной формы; контакты между частицами не столь прочные (широкие). Таким образом, полимер не только способствует скреплению агрегатов, но и является цементирующим агентом для скелетных зерен на их поверхности. Положительное действие полимера достигается в первую очередь не за счет структурообразования в прямом значении слова, а скорее благодаря повышению водопрочности естественной структуры.

Микроморфологический анализ агрегатов почвенного материала разных типов черноземов (типичного, выщелоченного, оподзоленного), сносимого при эрозии со стоковых площадок (Чижикова с соавт., 2010), показал, что они «имеют в основном округлую и овальную формы с размерами от 0,2 до 1,6 мм в диаметре». Такие агрегаты представляют собой «экскременты почвенной мезофауны». Более мелкие комковатые глинисто-гумусовые агрегаты (0,05–0,1 мм) представлены разрушенными копролитами. Тонкодисперсное вещество представлено в основном изотропными черновато-бурыми глинисто-гумусовыми хлопьями и сгустками. Практически все копролиты «имеют внутрипедную тонкую пористость». Авторы заключили, что «смываются наиболее легкие агрегаты – копролиты, обогащенные глинисто-органическим веществом» (Чижикова с соавт., 2010).

Таким образом, исходное микростроение разных типов черноземов имеет свои специфические элементы строения, что необходимо учитывать при изучении влияния различных агротехнических приемов и степени смывости почв. Твердая фаза пахотных горизонтов разных типов черноземов в отсутствие переуплотнения и избыточного увлажнения преимущественно состоит из микроучастков, сложенных округло-угловато-блоковыми и округлыми копрогенными агрегатами, но соотношение между ними разное в зависимости от типа чернозема. Также по-разному проявляется влияние распашки на гумусное состояние черноземов, что выражается в изменении его состава и распределения в твердой фазе почвы. Это связано прежде всего с генетическими особенностями черноземов, рассматриваемых авторами в широких географических пределах. В целом можно сказать, что микростроение пахотных горизонтов черноземов разных типов хорошо изучено. Вместе с тем в литературе недостаточно данных об особенностях микростроения эродированных пахотных черноземов в сравнении с незэродированными.

1.3. Микроморфометрические исследования почв

Микроморфометрические исследования (морфометрические исследования на основе микроморфологического метода) в почвоведении имеют длительную историю развития. На начальном этапе морфометрия элементов микростроения почв как направление микроморфологии была исключительно «ручным» методом, а потому крайне трудоемким и имеющим ограниченное распространение (Польский, 1955; Феофарова, 1956). Позже Вальтер Кубиена пришел к выводу о необходимости иметь количественную микроморфологию и ориентировать ее на решение прикладных задач (Ступс, 2009). Так в 1967 г. была опубликована книга «Die Mikromorphometrische Bodenanalyse» (Kubiëna, 1967), послужившая стимулом развития количественной микроморфологии. Однако часть разработанной им методологии оказалась мало востребованной из-за быстрого внедрения автоматизированных систем анализа изображений в конце 1960-х гг. (Ступс, 2009). Для микроморфометрического анализа стали использовать фотометры, различные отечественные и зарубежные анализаторы (Скворцова, 1999).

В книге «Руководство к микроморфологическим исследованиям в почвоведении» (Парфенова, Ярилова, 1977), переведенной на английский и японский языки, отдельная глава посвящена микроморфометрии почв. В ней перечислены существовавшие на момент написания книги методы определения количественных показателей, которые условно можно поделить на группы по объекту измерения: поры (Поляков, 1975), агрегаты (Токай, 1975), тонкодисперсная масса (Miedema, Slager, 1972) и минеральные зерна.

В 1990 г. в США был проведен первый симпозиум по использованию анализа изображения в почвоведении, по результатам которого был опубликован специальный выпуск журнала *Geoderma* (Mermut, Norton, 1992). В последующие годы получены морфометрические данные для отдельных элементов микростроения почв. Чаще всего оценивают поровое пространство: архетипы порового пространства (Skvortsova, Rozhkov, 2011); интенсивность

педогенеза по степени развития порового пространства (Bryk, 2016); параметры биогенных пор и ориентированной глины для прогнозирования изменения структуры почв (Sauzet et al., 2017); макропористость при различных агротехниках (Kraemer, Morras, 2018) и мелиорации (Luna et al., 2018); связь пористости и когезии в почве (Mota et al., 2018); свойства порового пространства в циклах смачивания-сушки (Ferrari, Pagliai, 1980) и замораживания-оттаивания (Скворцова с соавт., 2018). Кроме того, существует интерес к изучению морфометрическим методом мелиорированных почв (Ciarkowska, Hanus-Fajerska, 2007), генетическим исследованиям, основанным на оценке морфометрии скелетных зерен (Bovi et al., 2016) и фитолитов (Vrydaghs et al., 2016).

Несмотря на обширное количество работ по морфометрической оценке отдельных микроморфологических характеристик, проведение комплексного количественного анализа элементов микростроения в шлифах до настоящего времени остается трудо- и времязатратным и является актуальным развивающимся направлением современной микроморфологии (Stoops, 2018).

При анализе снимков природных объектов необходимо комбинировать несколько различных программ в одном исследовании для достижения достоверных результатов. Это связано с неравномерным распределением света на поверхности объектов, градиентами их цвета (изменение тона и/или насыщенности) и математическими алгоритмами обработки полученных изображений (Marcelino et al., 2007). Все эти особенности в равной мере относятся к снимкам как природных объектов целиком, так и в разрезе (на срезе, шлифе). В зависимости от целей конкретного исследования авторы используют как свободно распространяемое программное обеспечение для цифрового анализа изображений: ImageJ (Wang et al., 2017), так и более узко специализированное, как STan и Image-Pro Plus (Gorbov et al., 2016; Zhao et al., 2019); сравнительно малая часть работ использует для анализа растровых одноканальных изображений геоинформационные системы, что делает анализ более трудозатратным (Asmussen et al., 2015). Сегментация (процесс выделения

на изображении интересующих объектов) и последующая математическая обработка – обязательные этапы морфометрического анализа снимков. Специалисты в области анализа цифровых изображений ежегодно разрабатывают новые алгоритмы и модели сегментации (Angulo et al., 2020; Takashimizu, Iiyoshi, 2016). Методы сегментации успешно реализуются в области картографии почв (Королук, 2012; Симакова, 2014), точного земледелия (Pusd-Chulde et al., 2020), генетического почвоведения (Чжуан с соавт., 2019), физики почв (Ivanov et al., 2019) и механики грунтов (Rodríguez et al., 2013).

Количественное изучение минералогического состава черноземов морфометрическим методом по почвенным шлифам пока не получило развития. При микроморфометрическом анализе черноземов Канады было выявлено, что с глубиной уменьшается порозность; содержание скелетных зерен выше, а содержание тонкодисперсного вещества ниже в слабо текстурно-дифференцированных почвах (Mermut, Arnaud, 1983). А.Н. Поляков в своей диссертации, посвященной микроморфологии черноземов Европейской части СССР, активно использовал микроморфометрический метод. Им был осуществлен подсчет в шлифах агрегатов разного порядка, а также гумонов – мелких гумусовых сгустков (Парфенова, Ярилова, 1977). В результате А.Н. Поляков пришел к выводу, что особенности черноземов Восточноевропейской фации, связанные с нарастанием континентальности климата в восточном направлении, проявляются в увеличении доли простых агрегатов в гумусово-аккумулятивном горизонте, замедлении скорости разложения растительных остатков, увеличении содержания гумонов (Поляков, 1984).

Параметры порового пространства черноземов к настоящему моменту уже достаточно хорошо изучены отечественными и зарубежными авторами. Подробное изучение порового пространства пахотного чернозема типичного было проведено Е.Б. Скворцовой и Д.Р. Морозовым в 1995 году. На оптико-электронном анализаторе изображения Magiscan-2 было проведено измерение

пористости в шлифах и установлено, что пахотный горизонт характеризуется рыхлым сложением, изометричностью пор, обилием обособленных или слабосплывшихся агрегатов разного порядка, слабой трещиноватостью (Скворцова, Морозов, 1995).

При изучении порового пространства черноземов Приднепровья под разными растительными сообществами было выявлено, что почвенные поры в свежей липово-ясеновой дубраве более вытянутые, их форма сложнее, а контуры изрезаннее по сравнению с порами почвы на территории дубовых насаждений. Таким образом, использование микроморфометрического метода позволило выявить признаки «прогрессивного проявления процессов черноземообразования под искусственными насаждениями» (Белова с соавт., 2006).

Российскими учеными Е.Б. Скворцовой и С.И. Санжаровой (2007) при сопоставлении распределений пор «в верхних 10 см профиля типичных черноземов и дерново-подзолистых почв было показано, что целинные почвы сильно отличаются друг от друга по форме и ориентации пор». В черноземе было выявлено преобладание вытянутых изрезанных пор упаковки, а в дерново-подзолистой почве отмечена существенная доля горизонтально вытянутых макропор. Вместе с тем почвы, исходно имевшие разную структуру, после вспашки «приобретают однотипную комковатую структуру и однотипное ажурное строение макропор» (Скворцова, Санжарова, 2007).

При микроморфометрическом изучении в шлифах порового пространства черноземов Украины В.В. Медведевым было показано, что неоднородность присуща почве уже в исходном целинном состоянии из-за анизотропности ее вещественного состава, свойств и режимов. Вследствие различных скоростей движения влаги и растворов в зависимости от вектора и в порах различного размера, конфигурации и протяженности возникают разнонаправленные движения тонкодисперсной массы. Рост корней, деятельность микрофауны, а также неупорядоченные объемные изменения тела почвы в процессе увлажнения/высушивания, замерзания/оттаивания, уплотнения/разуплотнения

содействуют развитию неоднородности. В распахиваемых почвах, главным образом за счет рельефа местности и анизотропности структуры и порового пространства почвы, неоднородность способна поддерживаться и усиливаться во времени (Медведев, 2013).

Из изложенного выше ясно, что морфометрические исследования в почвоведении в настоящее время получили широкое распространение. Применение цифровых методов для анализа снимков шлифов почвенных агрегатов перспективно в рамках изучения влияния факторов почвообразования на структурное состояние почвы (San José Martínez et al., 2015), связи между цветом почвы и ее свойствами (Savin et al., 2016), влияния эрозионных процессов на состояние агрегатов почвы (Плотникова с соавт., 2019). Получаемые этим способом комплексные количественные данные могут быть использованы для оценки интенсивности и направления педогенеза в результате воздействия абиотических и биотических факторов. Однако в литературе пока не обнаружено морфометрических данных о почвенных агрегатах, сносимых модельными водными потоками.

ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Объекты исследования

Объектами исследования являются пахотные горизонты черноземов типичных разной степени смытости. Отбор образцов для анализов и экспериментов производился на территории ОПХ ВНИИЗиЗПЭ¹. Для этого с использованием топографической основы были заложены два почвенно-геоморфологических профиля на склоне южной экспозиции. Длина первого профиля составляла 575 м, второго – 523 м (рисунок 1). Коды разрезов первого профиля (2017 г.): P1-17, P2-17, P3-17; коды разрезов второго профиля (2018 г.): P1-18, P2-18, P3-18. Крутизна склона варьирует от 0,5 до 5,1°. В заложенных профилях были морфологически описаны несмытый (P1), слабосмытый (P2) и среднесмытый (P3) среднесуглинистые черноземы типичные (Классификация и диагностика почв СССР, 1977) – *Haplic Chernozem (Loamic, Aric)* (World Reference Base..., 2014). В 2017 году во время отбора образцов на несмытом черноземе произрастала озимая пшеница, на слабо- и среднесмытом – ячмень; в 2018 году на всех трех разновидностях чернозема типичного произрастал подсолнечник. Глубина вскипания почвы от соляной кислоты уменьшалась с увеличением степени смытости: в профилях несмытого чернозема она составляла в среднем 90 см, в профилях слабосмытого чернозема – 62 см, в профилях среднесмытого чернозема – 29 см. Координаты и подробные описания почвенных разрезов, заложенных для проведения исследований, приведены в Приложении 1.

Образцы и описание почвенного разреза чернозема типичного, заложенного на территории Центрально-Черноземного природного биосферного заповедника имени профессора В.В. Алехина² (участок «Косимая степь»), предоставлены О.Б. Роговой и Е.Ю. Милановским (Приложение 1).

¹ В настоящее время Опытное хозяйство ВНИИЗиЗПЭ структурного подразделения ФГБНУ «Курский Федеральный Аграрный Центр».

² Далее – ЦЧЗ.

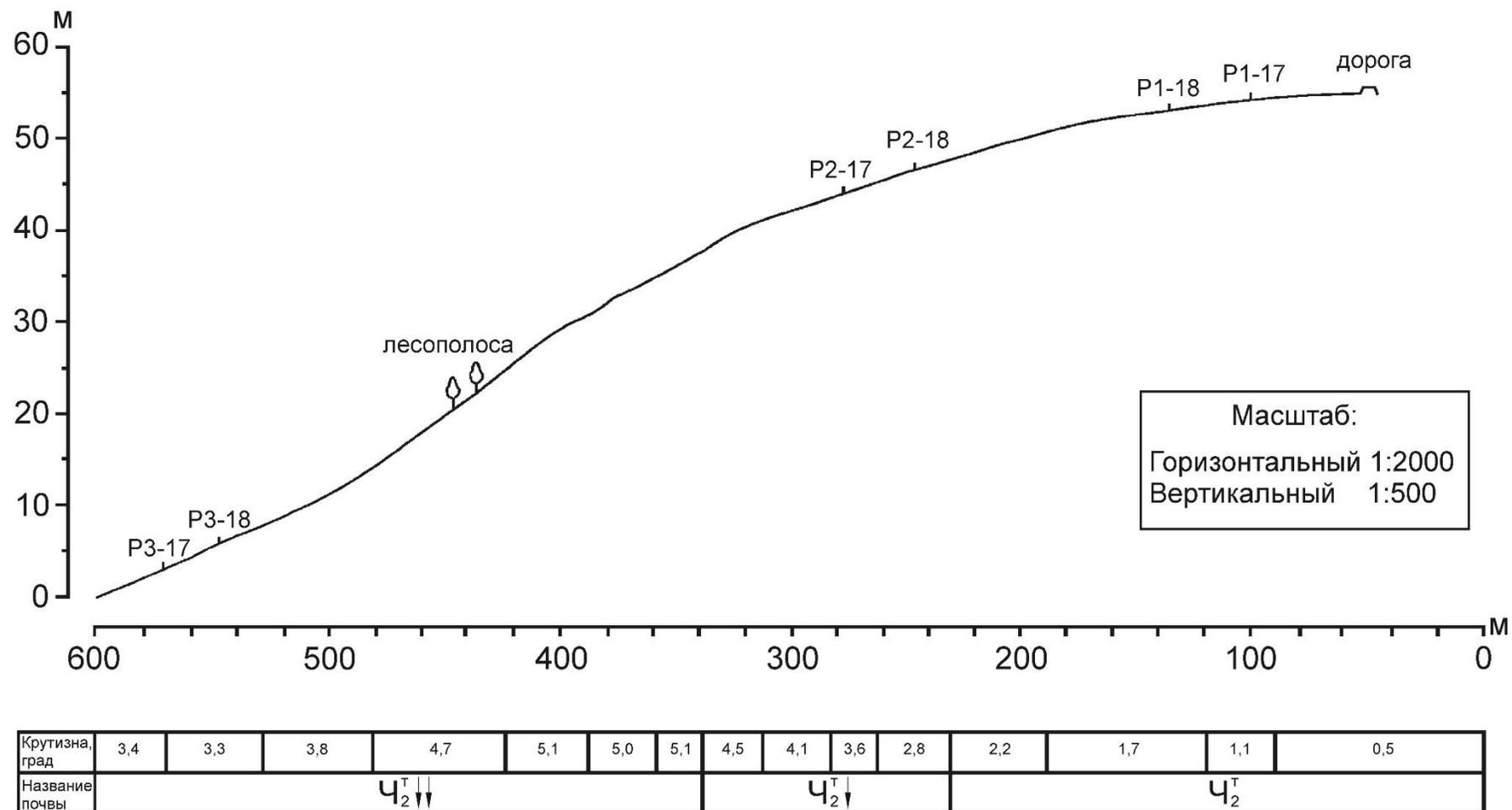


Рисунок 1 – Схема почвенно-эрозионных профилей (чернозем типичный, Курская область)

Природные условия района исследования

Климатические особенности

Климат Курской области умеренно-континентальный. «Средняя температура января от $-7,7$ °С на западе до $-9,4$ °С на севере, июля от $+18,8$ °С на севере до $+19,4$ °С на западе. Осадков выпадает на юго-западе 550–600 мм в год, на востоке и юге 480–500 мм, 70 % их годового количества выпадает в период с апреля по октябрь, летом часто в виде ливней. Весной нередко дуют сухие восточные и юго-восточные ветры. Безморозный период продолжается 150 дней» (География, 2006).

Наступление сухих периодов продолжительностью от 10 до 15 дней наблюдается преимущественно в первые или последние месяцы вегетационного периода. «Бездождные периоды продолжительностью от 15 до 20 дней могут наблюдаться по всей территории области примерно раз в 2–3 года. В среднем по 3–4 раза за десятилетие бывают засухи продолжительностью свыше 20 дней» (Курская область, 1966). Среднемноголетнее годовое количество осадков в жидком виде – 388 мм, в твердом виде – 95 мм, смешанные осадки – 104 мм. Среднее число дней с грозой – 31, средняя продолжительность грозы – 2,3 ч. Высота снежного покрова в зимний период от 6 до 63 см. Запас воды в снеге от 33 до 188 мм (Научно-прикладной справочник..., 1990). «Средняя глубина промерзания почвы в зимний период составляет 60–90 см, наибольшая – около 150 см» (Чуян с соавт., 2019).

Особенности рельефа

«Рельеф Курской области находится в тесной зависимости от геологического строения и развития территории. В целом это пологоволнистая возвышенная равнина, сильно расчлененная речными долинами, балками и оврагами. Высокая степень расчлененности предопределила развитие эрозионного долинно-балочного рельефа.

Максимальные высоты приурочены к восточной части области. Здесь же, у истоков р. Рать возле с. Бруски находится наивысшая точка области 288 м.

Относительные высоты довольно значительны, в некоторых местах превышают 100–120 м.

Характерной геоморфологической особенностью является наличие грядовых поднятий. Это крупные элементы рельефа юго-западного склона Среднерусской возвышенности, абсолютные высоты которых достигают 240–270 м. Межгрядовые понижения заняты хорошо разработанными речными долинами. Глубина их вреза – 100–130 м. Реки текут в широких, хорошо разработанных долинах с крутым правым и пологим террасированным левым склонами. Ширина многих из них исчисляется несколькими километрами» (Подобед, 2013).

Большая расчлененность территории области определяет здесь преобладание долинно-овражно-балочного типа рельефа. Расчлененность территории Курской области долинно-балочной сетью колеблется в пределах 0,9–1,4 км/км² (Дроздов, 1965). Наибольшей расчлененностью и густотой овражной сети характеризуются восточные, северные и южные районы, наименьшей – центральные и западные.

Почвообразующие и подстилающие породы

Территория Курской области «находится в центральной части Воронежской антеклизы Русской плиты древней Восточно-Европейской платформы, неглубоко залегающий (несколько десятков м – несколько км) архейско-раннепротерозойский кристаллический фундамент которой выходит на поверхность в карьерах Курской магнитной аномалии. Осадочный чехол сложен девонскими терригенно-карбонатными отложениями (вскрываются в долине р. Кшень на северо-востоке), юрскими и широко распространенными меловыми, главным образом, карбонатными (писчий мел, известняки, мергели) породами, палеогеновыми и неогеновыми терригенными осадками. Покров рыхлых четвертичных отложений на водоразделах представлен лессами и элювиально-делювиальными образованиями, в долинах рек – аллювиальными наносами. В крайней западной части Курской области развиты ледниковые и водно-ледниковые отложения среднеплейстоценового днепровского

оледенения» (Калуцкова, 2010). Коренные осадочные породы покрыты довольно мощным чехлом лёссовидных суглинков и глин четвертичного периода (до 20 м), которые являются почвообразующими (Геологическая карта четвертичных отложений Курской области, 1998).

Растительность

Территория Курской области лежит в подзоне типичной лесостепной провинции Среднерусской возвышенности, характерной зональной растительностью которой являются чередующиеся между собой дубравные леса и луговые степи. Флора Курской области очень богата: на её территории насчитывается свыше 1300 видов различных растений. Леса в настоящее время сохранились лишь отдельными урочищами, площадь которых колеблется от 0,5 до 7000 га. Средняя лесистость области составляет 9,4 % (Вялых, 1980). Значительную долю в покрытой лесом площади занимают лесные полосы.

Травянистый покров области довольно разнообразен. В дубравах и сосновых лесах распространены сныть обыкновенная (*Aegopodium podagraria* L.), купырь лесной (*Anthriscus sylvestris* L.), купена лекарственная (*Polygonatum officinale* All.), ландыш майский (*Convallaria majalis* L.), фиалка трехцветная (*Viola tricolor* L.) и другие. На лугах распространены тимофеевка луговая (*Phleum pratense* L.), душистый колосок (*Anthoxanthum* L.), трясунка средняя (*Briza media* L., *Sp. Pl.*), лисохвост (*Alopecurus* L.), лядвенец рогатый (*Lotus corniculatus* L.), мятлик (*Poa* L.), пырей (*Elytrigia* Desv.) и овсяница луговая (*Festuca pratensis* Huds.), разнообразные виды клевера (*Trifolium* L.), вики (*Vicia* L.) и другие травы.

Почвы

Курская область характеризуется значительной пестротой типов почв. Черноземы типичные занимают 26,1 % территории области, выщелоченные – 20,8 %, оподзоленные – 19,9 %. В пашне черноземы занимают 74 %. В то же время на 22,7 % территории области распространены серые лесные почвы, 8,2 % – пойменные, 1,7 % – дерново-подзолистые почвы. По

гранулометрическому составу почвы области глинистые, тяжелосуглинистые, легкосуглинистые (Национальный атлас почв..., 2011).

Черноземы содержат до 7–8% гумуса, мощность гумусового горизонта колеблется в черноземах от 45 до 80–100 см (Галицкая с соавт., 1974). «В пахотном слое черноземов типичных и типичных карбонатных неэродированных и эродированных реакция солевой вытяжки близкая к нейтральной – рН 5,7–6,4, гидролитическая кислотность 1,2–3,2 мг·экв/100 г почвы, сумма поглощенных оснований 33–43 мг·экв/ 100 г почвы, содержание гумуса 5,0–7,8 %» (Чуян с соавт., 2019).

Особенности землепользования и проявлений эрозии почв в Курской области

В Курской области свыше 70 % пахотных угодий (1,1 млн га) относятся к черноземным почвам, из которых 0,9 млн га предназначены для интенсивного использования (первая категория земель); 0,15 млн га – для ограниченного использования (вторая категория земель) и 0,05 млн га пригодны только для возделывания некоторых видов трав и зерновых культур (третья категория земель) (Свиридов с соавт., 2010).

На 1 января 2009 г. общая площадь пашни в области составляла 1,9 млн га. 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. 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 (Доклад о состоянии..., 2009).

По данным Доклада о состоянии окружающей среды за 2011 год 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 (Государственный доклад «О состоянии...», 2011).

2.2. Методы исследования

2.2.1. Определение степени смывости почв

Определение степени смывости и выделение границ чернозема типичного различной степени смывости определялось путём заложения и описания почвенных разрезов и прикопок в различных элементах рельефа. Согласно Классификации и диагностике почв СССР (1977), для черноземов мощных и среднемощных всех подтипов с установившейся глубиной вспашки не менее 22 см при первоначальной мощности гумусовых горизонтов более 50 см разделение по степени эродированности проводится по следующим признакам:

слабосмытые – горизонт А смыт на 30 %, пахотный слой не отличается по цвету от несмытых участков пашни;

среднесмытые – горизонт А смыт более чем наполовину. Пахотный слой отличается незначительным буроватым оттенком.

2.2.2. Определение водопрочности структуры, расчет коэффициента структурности и критерия водопрочности

Определение водопрочности макроструктуры почвы и расчет коэффициента структурности (K) проводились по методу Н.И. Саввинова (Вадюнина, Корчагина, 1986). Для определения этих показателей использовали насыпные образцы верхнего 10-сантиметрового слоя пахотных горизонтов исследуемых почв. Определение водопрочности и расчет K проводились в трехкратной повторности для каждой исследуемой почвы.

Метод определения водопрочности макроструктуры разработан на основе методов Г.И. Павлова и А.Ф. Тюлина и является в настоящее время одним из распространенных в почвоведении. Состоит из двух частей: фракционирования почвы на ситах в воздушно-сухом состоянии (сухое просеивание) и фракционирования на ситах в воде (мокрое просеивание). В первом случае фиксируется количество агрегатов определенного размера ($< 0,25$, $0,25-0,5$, $0,5-1$, $1-2$, $2-3$, $3-5$, $5-7$, $7-10$, > 10 мм) в почве, во втором – определяется

количество водопрочных агрегатов, т.е. дается качественная оценка структуры по водопрочности.

Коэффициент структурности рассчитывали по формуле (Вадюнина, Корчагина, 1986):

$$K = \frac{A}{B}, \quad (8)$$

где А – сумма макроагрегатов размером от 0,25 до 10 мм, %; Б – сумма агрегатов < 0,25 мм и комков > 10 мм, %.

Критерий водопрочности агрегатов (А) рассчитывался в трехкратной повторности для каждой исследуемой почвы по методике, предложенной сотрудниками Агрофизического института (Вадюнина, Корчагина, 1986):

$$A = \frac{C_{\text{вп}}}{C} \cdot 100, \quad (9)$$

где С – содержание структурных фракций в почве размером от 0,25 до 1 мм, полученных при сухом просеивании, в %; $C_{\text{вп}}$ – содержание водопрочных агрегатов размером от 0,25 до 1 мм, %.

2.2.3. Определение содержания гумуса

Определение содержания гумуса в почвах первого почвенно-эрозионного профиля проводилось по методу Никитина с колориметрическим окончанием по Орлову-Гриндель (Практикум по агрохимии, 2001). Для определения содержания гумуса использовали насыпные образцы пахотных горизонтов исследуемых почв, отобранные послойно через каждые 10 см до глубины 30 см. Содержание гумуса определяли в трехкратной повторности в каждом образце.

Навеску подготовленной для определения органического углерода пробы почвы помещали в конические колбы на 100 см³. В колбы с навесками приливали из бюретки по 20 см³ хромовой смеси, осторожно перемешивали и закрывали воронками. Колбы помещали в сушильный шкаф, предварительно нагретый до 150 °С. Через 20 мин после того, как температура в шкафу вновь поднималась до 150 °С, колбы вынимали и давали им охладиться. Затем приливали по 20 см³ воды, давали почве осесть на дно колбы и осторожно

сливали в пробирки. Через сутки раствор фотометрировали в кюветах на 5 мм при длине волны 590 нм или с оранжевым светофильтром. В качестве раствора для сравнения использовали холостую пробу в двукратной повторности, которую ставили в сушильный шкаф одновременно с опытными колбами. Содержание углерода находили по предварительно построенному градуировочному графику (Практикум по агрохимии, 2001). Для построения градуировочного графика использовали раствор глюкозы или сахарозы.

Содержание углерода (C) рассчитывали по формуле $C=(a/m)\times 100$, где a – содержание углерода в пробе, найденное по графику, мг; m – навеска почвы, г (Практикум по агрохимии, 2001).

Определение содержания гумуса в почвах второго почвенно-эрозионного профиля проводилось в трехкратной повторности для каждого образца в Испытательном лабораторном центре Почвенного института им. В.В. Докучаева по методу Тюрина в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26213-91 Почвы..., 1992).

2.2.4. Моделирование мелководных потоков

Эксперименты по моделированию ручейковых потоков проводились на большом эрозионном лотке. Для эрозионных экспериментов использовали насыпные образцы верхнего 10-сантиметрового слоя пахотных горизонтов исследуемых почв.

Большой эрозионный лоток (БЭЛ) сконструирован на кафедре эрозии и охраны почв факультета почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова и 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 было создано искусственное русло (длина – 5 м, ширина – 0,1 м), в которое с помощью электрического насоса с разной скоростью подаётся вода. С помощью дозатора и ленточного транспортера (скорость движения транспортёра 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. Угол наклона русла измеряется при помощи нивелира или мерной иглы. Устройство БЭЛ показано на рисунке 2.

Для каждого эксперимента подготавливали 2 навески почвы массой 1 кг, одну из которых в течение суток насыщали водой для достижения капиллярного увлажнения.

После установления постоянной скорости потока объёмным способом измеряли расход воды, а мерной иглой измеряли угол наклона водной поверхности и глубину потока.

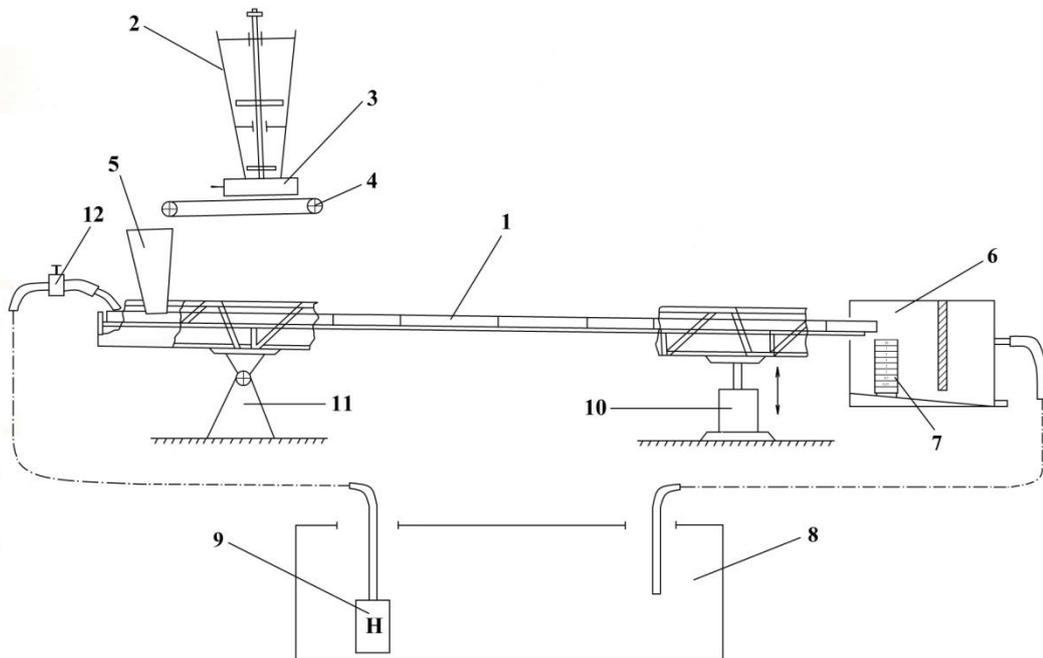


Рисунок 2 – Устройство большого эрозионного лотка: 1) искусственное русло; 2) бункер для почвы; 3) дозатор подачи почвы; 4) транспортёр; 5) направляющий лоток; 6) бак-отстойник; 7) набор сит; 8) основной бак (резервуар для воды); 9) водяной насос; 10) подъёмный механизм (изменение угла наклона лотка); 11) опора установки; 12) кран. Схема предоставлена А.А. Полубневым и В.В. Демидовым

Имея результаты измерения расхода воды (Q , л/с) и величину поперечного сечения водного потока (ω , м²), вычисляли среднюю скорость потока V (м/с) по формуле: $V = Q/\omega/1000$.

Работа на лотке проводилась следующим образом: воздушно-сухую навеску почвы подавали в русло потока при помощи дозатора и транспортера.

Капиллярно-увлажненную почву смывали в поток со специального лоточка струёй воды при небольшом её расходе. В обоих случаях продолжительность эксперимента контролировалась секундомером. Как только весь образец воздушно-сухой или капиллярно-увлажненной почвы поступал в поток, подачу воды в русло прекращали. Выносимые потоком агрегаты поступали в набор сит, установленных в баке-отстойнике на выходе из искусственного русла потока. Сита вынимали и далее делали мокрое просеивание по методу Саввинова (Вадюнина, Корчагина, 1986). Бюксы с почвенными агрегатами различных размеров (фракций) высушивали до воздушно-сухого состояния. Затем проводили расчёт средневзвешенного диаметра вынесенных потоком агрегатов.

Далее рассчитывали мутность экспериментальную $\beta_{эксн}$ (кг/м³) по формуле $\beta_{эксн} = m_2/V_w$, где m_2 – масса почвы, вынесенной потоком, кг, V_w – объём воды, поданной в поток за время эксперимента, м³.

2.2.5. Верификация уравнения транспортирующей способности потока

По данным экспериментов на БЭЛ рассчитывали живое сечение потока ω (м²), среднюю скорость потока V (м/с) (Кузнецов с соавт., 1992); количество воды за эксперимент V_w (м³) как произведение расхода воды и времени эксперимента.

Коэффициент поверхностного сцепления и критическую скорость потока рассчитывали по формулам, выведенным в рамках гидравлической теории водной эрозии В.М. Гендуговым и Г.П. Глазуновым (2009):

$$f = \frac{4}{3}r^2g(\rho_i - \rho_e), \quad (10)$$

где f – коэффициент поверхностного сцепления, Н/м; r – радиус влекаемых или отложившихся в русле агрегатов, м; g – ускорение свободного падения, м/с²; ρ_i – плотность твердой фазы почвы, кг/м³; ρ_e – плотность воды, кг/м³;

$$V_{кр} = \sqrt{\frac{\frac{2}{3}\left(\frac{\rho}{\rho_0}-1\right)g\bar{d}+\frac{f}{\bar{d}\rho_0}}{K_d}}, \quad (11)$$

где $V_{кр}$ – критическая скорость потока, м/с; ρ – удельный вес твердой фазы частицы, кг/м³; ρ_0 – плотность воды, кг/м³; \bar{d} – средний взвешенный диаметр выпадающих из потока частиц почвы, м; f – коэффициент поверхностного сцепления, м²/с²; K_d – коэффициент подъемной силы с-вихря.

Для верификации уравнения транспортирующей способности с использованием расчетных данных по средней и критической скоростям потока, а также экспериментальных значений мутности и глубины потока строили графики зависимости $\ln\beta_{эксн}$ от $\ln((V^2 - V_k^2)/gH)$. Графики линейно аппроксимировали и по уравнению линейного тренда вида $y = kx + b$ для каждого графика находили эмпирический коэффициент C как антилогарифм свободного члена в уравнении линии тренда и эмпирический показатель степени $1/\gamma$ как показатель тангенса угла наклона линии тренда. Далее рассчитывали транспортирующую способность потока по формуле, разработанной для транспорта песка (Гендугов с соавт., 2007). На последнем этапе верификации определяли относительную ошибку расчета транспортирующей способности в сравнении с экспериментально определенной мутностью потока.

Расчёт транспортирующей способности потока проводили согласно модели транспорта наносов склоновыми потоками (Гендугов с соавт., 2007). В настоящее время эта модель является одной из немногих эрозионных моделей, параметры которых легко воспроизводимы в лабораторных условиях и поддаются измерению и вычислению для такого сложного объекта, как почва.

Обозначив минимальную (критическую) скорость потока как V_k , а среднюю скорость потока как V и проведя простое математическое преобразование, получили формулу транспортирующей способности:

$$\beta = \frac{C}{(gH)^{1/\gamma}} (V^2 - V_k^2)^{1/\gamma}, \quad (12)$$

где β – транспортирующая способность потока, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; H – глубина потока, м; V – средняя скорость потока, м/с;

V_k – критическая скорость потока, м/с; C – эмпирический коэффициент, кг/ м³;
 $1/\gamma$ – эмпирический показатель степени.

2.2.6. Микроморфологические исследования

Почвенные шлифы изготавливались М.А. Лебедевым для микроморфологических исследований из ненарушенных образцов пахотных горизонтов исследуемых почв: из верхней и нижней частей горизонта. Метод изготовления шлифов разработан в Почвенном институте им. В.В. Докучаева (Куст с соавт., 2020). Затем проводилась съемка шлифов с помощью оптического поляризационного микроскопа Olympus BX51 с цифровой фотокамерой Olympus DP26 (Olympus, Германия; приборы Центра коллективного пользования научным оборудованием «Функции и свойства почв и почвенного покрова» Почвенного института им. В.В. Докучаева). Описание почвенных шлифов из монолитов проводилось по методам и критериям, описанным отечественными (Парфенова, Ярилова, 1977) и зарубежными (Stoops, 2003) учеными.

2.2.7. Микроморфометрические исследования

В микроморфометрических исследованиях сравнивали параметры агрегатов исследуемых почв до и после эрозионных экспериментов на БЭЛ. Для этого изготавливались почвенные шлифы как из вынесенных потоком агрегатов, так и из агрегатов почвы, не участвовавшей в эрозионных экспериментах на БЭЛ. Для шлифов отбирали агрегаты фракций, в которые попадал средневзвешенный диаметр влекаемых агрегатов. Шлифы изготавливались из агрегатов, полученных в результате экспериментов на БЭЛ с тремя скоростями потока – минимальной, средней и максимальной из диапазона устанавливаемых на БЭЛ скоростей – с образцами в исходном капиллярно-увлажненном состоянии. Затем проводилась съемка шлифов.

Полученные снимки бинаризовались полуавтоматическим методом с использованием ПО Adobe Photoshop CS5 при помощи инструмента Magnetic

Lasso. Настройки инструмента: растушевка – 0 пк, сглаживание – да, ширина – 5 пк, контрастность – 100 %, частота – 57, без уточнения краев.

Для получения морфометрических показателей агрегатов бинарные снимки обрабатывали в программе CTan (Bruker, United Kingdom) с помощью функции 2d-анализа изображений.

Рассчитывали следующие морфометрические показатели: фактор формы – FF (характеризует степень отличия формы агрегата от окружности), степень изометричности – Rdn (показывает, насколько форма агрегата вытянута), коэффициент изрезанности поверхности агрегатов – U (показывает, насколько неровны, шероховаты границы агрегатов).

Фактор формы и степень изометричности рассчитывали в программе CTan:

$$FF = \frac{4 \times \pi \times A}{P_m^2}, \quad (13)$$

где FF – фактор формы, A – площадь объекта, мм^2 , P_m – периметр объекта, мм;

$$Rdn = \frac{4A}{\pi \times (d_{max})^2}, \quad (14)$$

где Rdn – степень изометричности, A – площадь объекта, мм^2 , d_{max} – максимальный диаметр объекта, мм.

Коэффициент изрезанности (U) рассчитывали отдельно по формуле:

$$U = L / (\pi \times D^*), \quad (15)$$

где L – длина линии, ограничивающей объект, мм; D^* – диаметр круга с площадью, эквивалентной площади объекта, мм (Amada et al., 2002).

2.2.8. Статистическая обработка данных

Статистическую обработку данных проводили в программе Statistica 12 и программной среде RStudio. Во всех случаях уровень значимости различий α принимали равным 0,05.

Достоверность линейной аппроксимации данных при верификации уравнения транспортирующей способности оценивали по коэффициенту корреляции R Пирсона, а в случае чернозема типичного косимой степи

дополнительно по критерию корреляции R Спирмена (ввиду малой выборки данных). Коэффициенты корреляции рассчитывали между $\ln\beta_{эксн}$ и $\ln((V^2 - V_k^2)/gH)$ в программе Statistica 12.

Для морфометрических параметров почвенных агрегатов были рассчитаны описательные статистики. Влияние факторов исходной степени смытости почвы и скорости модельного потока на изменение параметров агрегатов оценивали с помощью многофакторного дисперсионного анализа в программной среде RStudio. Коррекцию уровней значимости выполняли методом Y. Benjamini и D. Yekutieli (2001).

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. Анализ микростроения пахотных горизонтов эродированных черноземов типичных Курской области³

Общее описание микростроения исследованных почв приведено в таблице 1. Несмотря на присутствие угловато- и округло-блоковых агрегатов, в почти всех шлифах наблюдается хорошая агрегированность, существенная выраженность комковатой и зернистой структур (рисунок 3), что характерно для гумусового горизонта чернозема (Поляков, Ярилова, 1978; Герасимова с соавт., 1992). Поровое пространство хорошо развито во всех разновидностях изучаемого чернозема, преобладают поры-каналы и межагрегатные поры (Поляков, 1980), стенки которых хотя бы частично аккомодированы. Такая высокая видимая пористость описана В.В. Медведевым (1979) для типичных и обыкновенных пахотных черноземов сразу после распашки, по прошествии двух недель она уменьшалась. Изученные нами черноземы находились под сельскохозяйственной растительностью в момент отбора образцов, следовательно, высокая их пористость связана скорее с генетическими особенностями почвы, нежели с недавней вспашкой. При этом верхние части пахотного горизонта несмытого и среднесмытого черноземов обнаруживают сильное сплывание агрегатов, формирование крупных глыбистых отдельностей с широкими порами-трещинами между ними (рисунок 3 А, Д). В качестве причины этого явления можно назвать интенсивное сельскохозяйственное

³При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых, согласно Положению о присуждении ученых степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

1. **Плотникова О.О.**, Демидов В.В., Лебедева М.П. Влияние транспорта почвенного материала мелководными потоками на микроморфологические свойства поверхностных горизонтов чернозема типичного // Сборник трудов Международной молодежной научной конференции Проблемы деградации и охраны почв. – РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева Москва, 2017. – С. 107–109.

2. Лебедева М.П., Куст П.Г., Лебедев М.А., **Плотникова О.О.**, Романис Т.В. Микростроение основных типов почв Европейской территории России / Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2018620714.

Общий объем публикации – 0,84 авторского листа. Объем личного вклада соискателя: 25%.

использование исследуемых почв, ежегодную распашку, вызывающую деградацию почвенной структуры (Санжарова с соавт., 1988). При этом в верхней части несмытой разновидности такое сильное сплывание можно объяснить ещё и тем, что отбор образцов происходил в рекордно влажный год после двухнедельного периода дождей. В нижней же части пахотного горизонта среднесмытого чернозема тенденция к сплыванию мелких комковато-зернистых агрегатов в крупные угловато-блоковые объясняется припахиванием материала переходного горизонта АВ (Дубовик, 2017) и, как следствие, частичной утратой характерной структуры, естественной для гумусово-аккумулятивного горизонта типичных черноземов (Ярилова, 1974). Однако в целом структура этой части пахотного горизонта среднесмытой почвы лучше в агрономическом отношении, чем структура приповерхностной части горизонта Апах несмытого чернозема (рисунок 3 А, Д). Это также объясняется припахиванием горизонта АВ, содержащего карбонат кальция, который способствует упрочнению водостойких агрегатов почвы. В приповерхностной части пахотного горизонта слабосмытой почвы не отмечено такого выраженного сплывания и деградации структуры, как в приповерхностных частях горизонта Апах несмытого и среднесмытого чернозема. Это объясняется положением слабосмытого чернозема в эрозионном ландшафте – длительные осадки благодаря поверхностному стоку не вызвали здесь такого интенсивного сплывания агрегатов.

Гумусовое вещество во всех изученных пахотных горизонтах черноземов типичных представлено темными (до черного) гумонами, как рассеянными (точечный гумус), так и соединенными мостиками (рисунок 4), в несмытом черноземе также представлен гумус в форме хлопьев. Отмечены следующие закономерности с увеличением степени смытости: уменьшение количества и размера гумонов (таблица 1), уменьшение доли гумонов, связанных мостиками, и нарастание относительной доли рассеянных гумонов, что свидетельствует о деградации (диспергации). Уменьшение содержания гумуса, отмеченное на микроуровне, согласуется как с данными проведенного нами анализа

литературы по микроморфологии черноземов, описанными в разделе 1.2, так и с данными других авторов, полученными не микроморфологическим методом (Дубовик, Дубовик, 2019).

В горизонте Апах среднесмытого чернозема цвет гумонов бурый, что может быть вызвано двумя причинами. Во-первых, вероятно, происходит уменьшение доли гуминовых кислот в составе гумуса пахотного горизонта относительно несмытой разновидности (Масютенко с соавт., 2016). Во-вторых, согласно данным Н.С. Кухарук с соавторами (2011), при длительной распашке в черноземах происходит перераспределение органического вещества вниз по профилю и максимум содержания наблюдается в подпахотных горизонтах. Таким образом, в условиях снижения структурообразующей роли гумуса в среднесмытом черноземе типичном роль дополнительного структурообразователя в пахотном горизонте играет карбонат кальция, наличие которого отчетливо заметно при рассмотрении шлифов под микроскопом (рисунок 5 В, Е).

В пахотном горизонте несмытого чернозема карбонатов нет, встречаются единичные ассимилированные агрегаты, состоящие из глинистого материала горизонта АВ, имеющего раздельно-чешуйчатую оптическую ориентацию (рисунок 5 А, Г). Агрегатов из материала нижележащего горизонта в пахотном горизонте слабосмытого чернозема также немного, однако тонкодисперсная масса в них уже имеет признаки кристаллитовой оптической ориентации, присущей карбонатному составу (рисунок 5 Б, Д). В пахотном горизонте среднесмытого чернозема ассимилированные агрегаты тоже имеют признаки карбонатов в составе тонкодисперсной массы, а их встречаемость значительно чаще – около 10 штук на шлиф из нижней части горизонта в сравнении с 1-2 штуками в слабосмытом черноземе (рисунок 5 В, Е). Помимо этого, в слабосмытом и среднесмытом черноземах встречены зерна кальцита в основной почвенной массе, оказавшиеся здесь после ассимиляции агрегатов из горизонта Вк (рисунок 6 Б, В), причем в слабосмытом черноземе это единичные случаи, тогда как в среднесмытом черноземе такие зерна встречаются более 10

раз на шлиф (таблица 2). Сферолитовый карбонатный инфиллинг, обнаруженный в поре в верхней части пахотного горизонта слабосмытого чернозема (рисунок 6 А), по всей вероятности, является новообразованием (Парфенова, Ярилова, 1977), результатом биологической деятельности – концентрации карбоната кальция корнями растений (Поляков, 1989).

Железистые новообразования представлены железистыми и железисто-марганцевыми нодулями, встречающимися редко (до 10 штук на шлиф) и имеющими размер в среднем 100–300 мкм. Как правило, нодули имеют округлую форму, резкие границы и сложный состав, характеризующийся включением минеральных зерен (рисунок 6 Г–Е). Появление микронодулей связано, по-видимому, с колебанием окислительно-восстановительных режимов в год отбора образцов (Герасимова с соавт., 1992), вызванным длительными осадками с последующим просыханием пахотных горизонтов.

Кроме вышеописанных тенденций, с увеличением степени смытости в составе органического вещества возрастает доля органических остатков средней степени разложенности, что говорит о снижающейся интенсивности гумификации и преобладании более грубого гумуса типа “mull-moder” (Герасимова с соавт., 1992). В несмытом черноземе растительные остатки встречаются единично (таблица 1).

В слабосмытом черноземе в верхней части пахотного горизонта в порах отмечено обилие отдельных скелетных зерен, что, по-видимому, связано с разрушением и распылением структуры этой почвы. В несмытом и среднесмытом вариантах таких зерен значительно меньше, что объясняется наиболее уязвимым положением слабосмытой почвы: клеящие гуминовые вещества из неё уже активно вымываются под действием водной эрозии, но нижележащий горизонт АВ, содержащий цементирующие карбонаты, ещё не припахивается.

В результате проведенного анализа микростроения пахотных горизонтов черноземов типичных несмытого, слабо- и среднесмытого нами было показано, что при увеличении степени смытости происходит ухудшение гумусного

состояния этих почв, снижение интенсивности гумификации, повышение глубины появления в профиле ассимилированных биогенных агрегатов с тонкодисперсным кальцитом, разрушение структуры и формирование глыбистых отдельностей, повышение доли пор-трещин. Частично этот процесс нивелируется сельскохозяйственной обработкой (вспашкой), что выражено на микроуровне в хорошо развитом поровом пространстве и обилии копрогенных агрегатов во всех изученных почвах.

Таблица 1 – Описание микростроения пахотных горизонтов черноземов типичных разной степени смытости (Курская область)

Глубина отбора, см	Микроструктура (по преобладающему типу агрегатов)		Основная почвенная масса			Органическое вещество, не входящее в основную почвенную массу	Копролиты (экскременты почвенных животных)			Железистые н-я	Материал CaCO ₃ состава (в том числе н-я)	Примечание
	Тип микроструктуры (по убыванию степени выраженности)	Степень аккомодации	Микросложение (соотношение грубо- и тонкодисперсной массы)	Органическое вещество	Состав и оптическая ориентация тонкодисперсной массы		Форма	Степень разрушенности, плотность	Количество, цвет, шероховатость			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Чернозем типичный несмытый												
7-12	Комковатая, зернистая, угловато-блоковая (единично элементы)	Частично аккомодированная	Порфирированное (слабокомпактная упаковка частиц)	Гумуса немного – хлопья, гумоны (с мостиками и рассеянные). Много мелких полуразложившихся и углефицированных (10–100 мкм) р.о.	Гумусово-глинистая; раздельно-чешуйчатая (вокругскелетная фрагментарно)	Слабо разложившиеся р.о. – немного	Округлые, эллипсоидные, цилиндрические	От слабой до сильной разрушенности, плотные	Много, цвет и более светлый, и аналогичный цвету вмещающего горизонта, шероховатость зависит от степени разложившенности – есть гладкая педотубула, есть шероховатые копролиты	Нодулей немного, есть сложные железистые (130–500 мкм), марганцево-железистые типичные (90–190 мкм)	Нет	Структура глыбисто-комковато-зернистая, зерна и комки уплотнены в глыбы. Много зон активной биогенной проработки. Немного мелких комковатых агрегатов. Обломок раковины моллюска, единичный инфиллинг глинистого бескарбонатного материала гор. АВ с вокругскелетной и чешуйчатой глинистой плазмой
36-41	Комковатая, зернистая, округло-блоковая (единично)	Неаккомодированная	Порфирированное (компактная и слабокомпактная упаковка частиц)	Гумуса больше – хлопья, гумоны (с мостиками и рассеянные). Много углефицированных растительных остатков и гумусово-железисто-глинистых ступков, единичные ожеженные р.о.		Слабо разложившиеся р.о. – единично	Округлые, эллипсоидные	-/-	Много, цвет и более светлый, и аналогичный цвету вмещающего горизонта, степень разрушенности от слабой до сильной	-/-	-/-	Структура комковато-зернистая, присутствуют призмовидные агрегаты, в целом материал сильно перерытый, в агрегатах множество трещин и на срезе видно большое количество пор-каналов в агрегатах

Примечание – н-я – новообразования, р.о. – растительные остатки, ТДМ – тонкодисперсная масса

Продолжение Таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Чернозем типичный слабосмытый												
6-11	Комковатая, зернистая, угловато-блоковая (единично)	Частично аккомодированная	Порфирированное (слабокомпактная и умереннокомпактная упаковка частиц)	Гумуса меньше, чем в несмытом черноземе, гумоны рассеянные. Много обугленных и ожелезненных растительных остатков, много гумусово-железисто-глинистых сгустков	Гумусово-глинистая, раздельно-чешуйчатая (вокругскелетная фрагментарно, встречается реже, чем в несмытом черноземе)	Свежие хорошо разложившиеся р.о. (встречаются ожелезненные) – много	Округлые, эллипсоидные	От слабой до сильной разрушенности, от плотных до очень пористых	Много, цвет аналогичный цвету вмещающего горизонта, шероховатость отчетливо заметна, многие сильно разрушены (пористые)	Нодулей немного, различные: нуклеарный размером 113 мкм с кварцевым ядром, типичные меньшего размера	Спаритовый инфиллинг в поре по разложившемуся р.о.	Структура по большей части копрогенно-комковато-зернистая, однако копролиты не имеют вид плотного инфиллинга, скорее почвенная масса состоит наполовину из них. Пор очень много. Нередко встречаются массивные глыбы размером до нескольких мм
20-25	Комковатая, зернистая, округло-блоковая (единично)	-//-	Порфирированное (компактная, слабокомпактная и умереннокомпактная упаковка частиц)	Гумуса столько же, сколько и в верхней части горизонта, гумоны рассеянные. Много мелких полуразложившихся, ожелезненных и углефицированных р.о., много гумусово-железисто-глинистых сгустков		Хорошо разложившиеся р.о. – единично	Округлые, цилиндрические	Хорошо разложившиеся, с неровными границами	Много, цвет различный – от более светлого, чем вмещающий горизонт до более темного, границы шероховатые	Нодуль единичный, типичный, 200–300 мкм, с трещиной	Единично, ассимилированный материал гор. АВ с признаками кристаллитовой оптической ориентации ТДМ	Структура в целом практически идентичная, но присутствуют крупные трещины. Сильнее выражена угловато-блоковая структура. В зонах с плотным сложением встречаются микрозоны обогащения скелетом

Окончание Таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Чернозем типичный среднесмытый												
6-11	Угловато-блоковая, округло-блоковая, комковатая	Частично аккомодированная	Порфириновидное (слабокомпактная упаковка частиц)	Гумуса меньше, чем в несмытом и слабосмытом черноземах, гумоны рассеянные. Много сильно разложившихся растительных и углефицированных р.о., часто встречаются глинисто-гумусовые сгустки	Глинисто-гумусовая, раздельно-чешуйчатая (вокругскелетная встречается чаще, чем в несмытом черноземе, пленки как фрагментарные, так и полные)	Слабо разложившиеся остатки кукурузы/подсолнечника, мелкие средние и сильно разложившиеся р.о. (есть ожелезненные) – много, свежие р.о. – немного	Округлые	Разложившиеся	Практически нет, цвет аналогичный цвету вмещающего горизонта, шероховатые	Нодулей немного, сложные, в основном округлые с включениями кварца, размеры 100–300 мкм	Единично, ассимилированный материал гор. АВ с признаками кристаллитовой оптической ориентации ТДМ	Структура угловато-блоковая, глыбистая, редко встречаются комки. Структура сильно уплотнена по сравнению с предыдущими разрезами. Материал пронизан сетью сильно аккомодированных трещин. Единично зоны относительного обогащения скелетом / обеднения ТДМ
15-20	округло-блоковая, комковатая, зернистая	-//-	Порфириновидное (слабокомпактная и умереннокомпактная упаковка частиц)	Гумуса столько же, гумоны рассеянные, очень много мелких разложившихся и углефицированных (единично встречаются довольно крупные до 1 мм), много гумусово-глинистых сгустков		Свежие р.о. – среднее количество, сильно разложившиеся р.о. – много	-//-	-//-	Много. Цвет аналогичный цвету вмещающего горизонта, шероховатые, непрозрачные, непористые	-//-	Часто, мелкие ассимилированные инфиллинги с глинисто-карбонатной ТДМ (около 10 штук на шлиф)	Есть зоны биогенной переработки. Единично встречаются зоны относительного обогащения скелетом / обеднения ТДМ. Встречаются первичные карбонатные зерна (около 10 штук на шлиф), единично такое зерно имеет неправильную форму и признаки выветривания

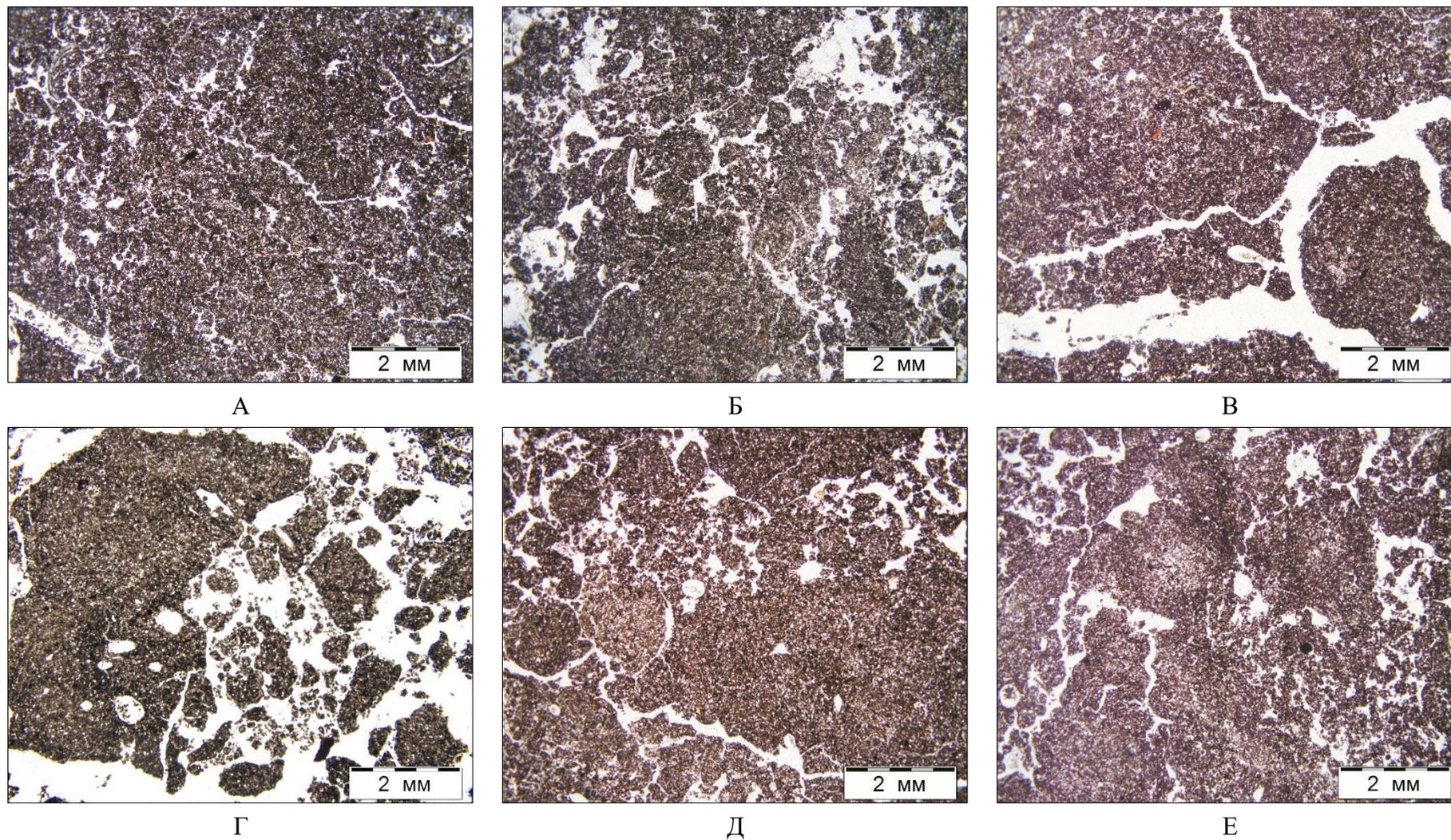


Рисунок 3 – Микроструктура пахотных горизонтов черноземов типичных различной степени смытости (Курская область, 2017 г.): А, Г – несмытый чернозем, глубина 7–12 и 36–41 см соответственно; Б, Д – слабосмытый чернозем, глубина 6–11 и 20–25 см соответственно; В, Е – среднесмытый чернозем, глубина 6–11 и 15–20 см соответственно. Снимки выполнены в проходящем свете без анализатора

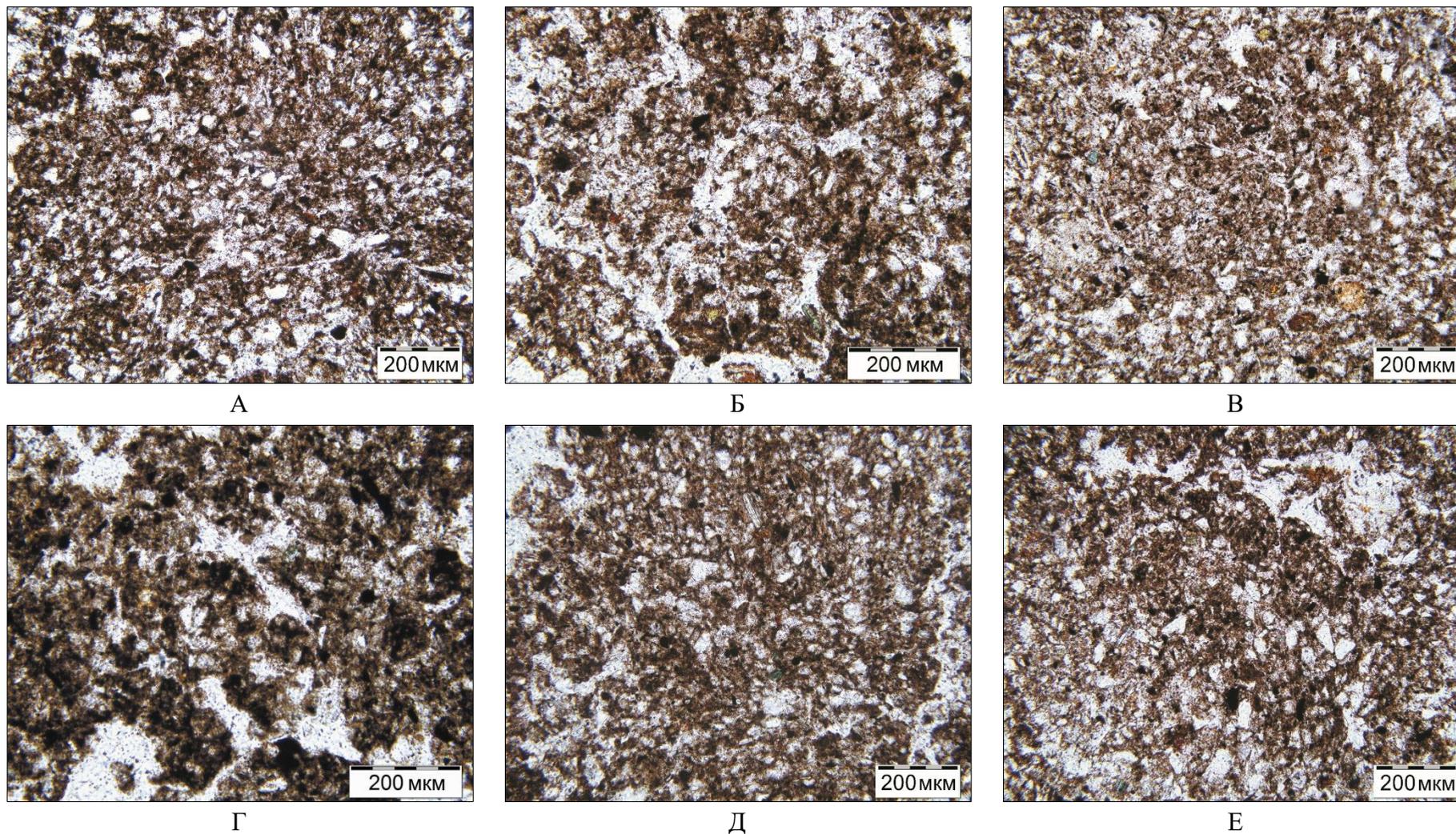


Рисунок 4 – Гумусное состояние пахотных горизонтов черноземов типичных различной степени смытости на микроуровне (Курская область, 2017 г.): А, Г – несмытый чернозем, глубина 7–12 и 36–41 см соответственно; Б, Д – слабосмытый чернозем, глубина 6–11 и 20–25 см соответственно; В, Е – среднесмытый чернозем, глубина 6–11 и 15–20 см соответственно. Снимки выполнены в проходящем свете без анализатора

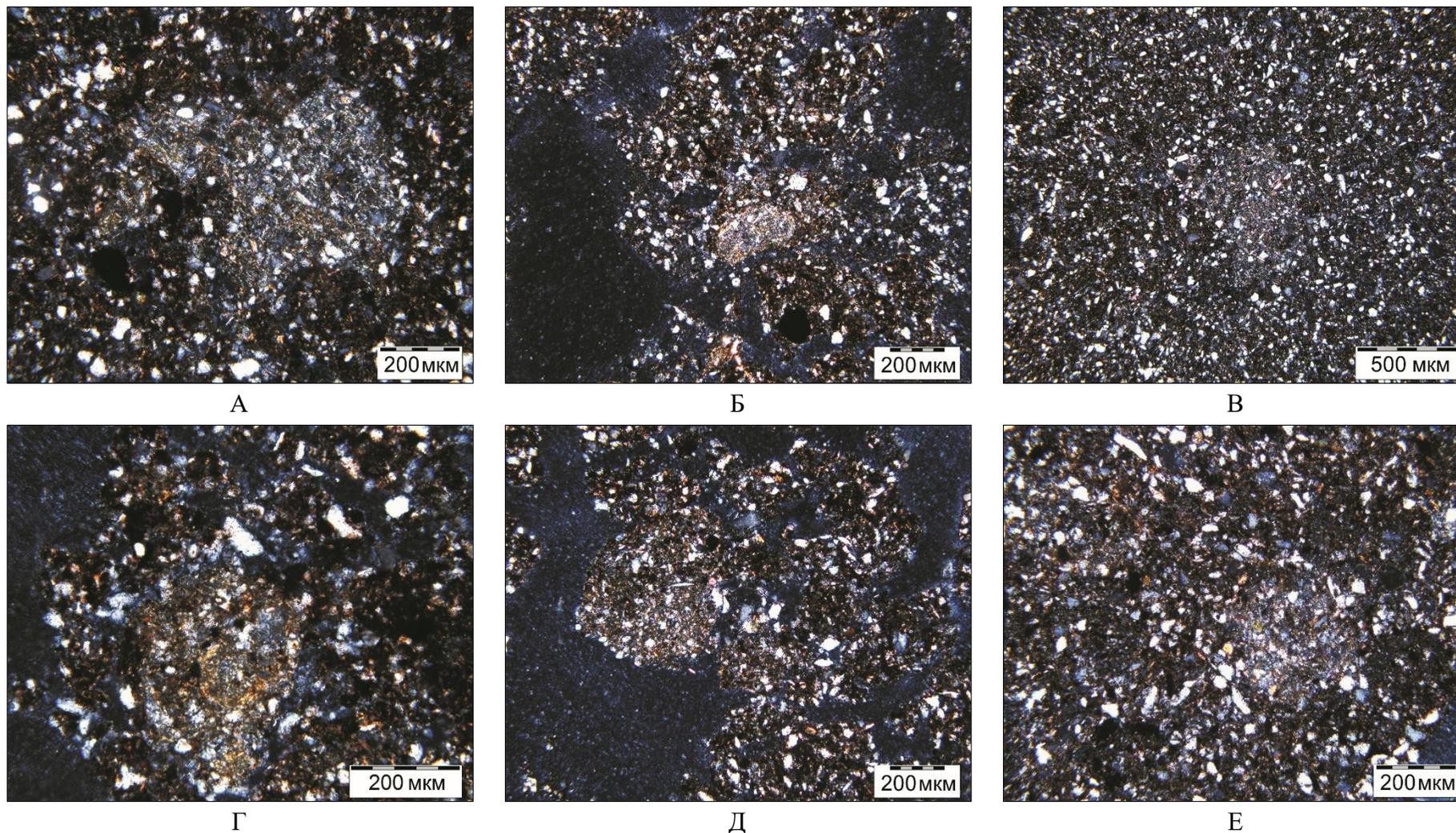


Рисунок 5 – Занесенные биотой агрегаты из нижних карбонатных горизонтов, в разной степени ассимилированные в пахотных горизонтах черноземов типичных различной степени смытости (Курская область, 2017 г.): А, Г – несмытый чернозем, глубина 7–12 и 36–41 см соответственно; Б, Д – слабосмытый чернозем, глубина 6–11 и 20–25 см соответственно; В, Е – среднесмытый чернозем, глубина 6–11 и 15–20 см соответственно. Снимки выполнены в проходящем свете с анализатором

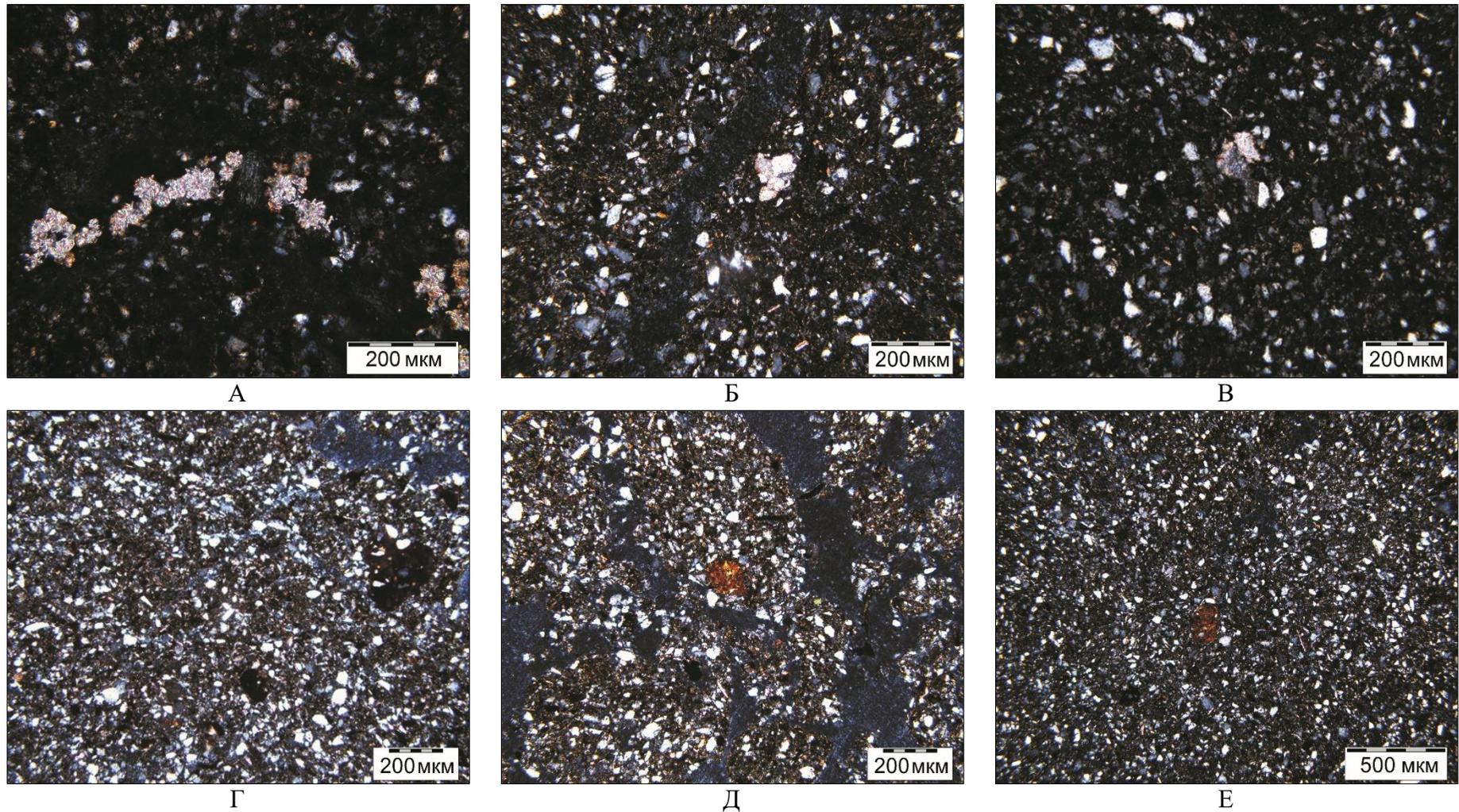


Рисунок 6 – Особенности микростроения пахотных горизонтов черноземов типичных различной степени смытости (Курская область, 2017 г.): А – спаритовый инфиллинг в поре, слабосмытый чернозем, верхняя часть пахотного горизонта (6–11 см); Б – спаритовое зерно в основной почвенной массе, среднесмытый чернозем, верхняя часть пахотного горизонта (6–11 см); В – спаритовое зерно с признаками выветривания, среднесмытый чернозем, нижняя часть пахотного горизонта (15–20 см); Г – железисто-марганцевый нодуль с включениями, несмытый чернозем, нижняя часть пахотного горизонта (36–41 см); Д, Е – железистый нодуль с включениями, слабо- и среднесмытый чернозем соответственно, верхняя часть пахотного горизонта (6–11 см). Снимки выполнены в проходящем свете с анализатором

3.2. Агрегатный состав и водоустойчивость исследуемых почв и связь этих показателей с содержанием гумуса⁴

Проведенное определение агрегатного состава и расчет показателей структурности и водоустойчивости (водопрочности) агрегатов исследуемых почв показали, что основная доля водопрочных агрегатов чернозема косимой степи (ЦЧЗ) приходилась на такие фракции, как 5–3, 3–2 и 2–1 мм (рисунок 7 Б). Наибольший средневзвешенный диаметр агрегатов (\bar{d}) при сухом просеивании среди пахотных черноземов имел среднесмытый чернозем (4,9 мм), средние значения – слабосмытый и несмытый чернозем (3,7–4,1 мм). Наименьшим средневзвешенным диаметром агрегатов характеризовался поверхностный горизонт контрольного варианта – чернозема косимой степи (таблица 2). По данным мокрого просеивания сухой почвы \bar{d} водопрочных агрегатов чернозема типичного косимой степи составил 2,3 мм, для всех остальных почв это значение приблизительно было одинаково и составляло 0,3–0,4 мм. Эти значения сопоставимы с результатами, полученными Е.В. Дубовик (2008) на территории этого же опытного хозяйства, и ниже, чем определенные В.Г. Мамонтовым с соавторами (2016) для пахотного чернозема типичного на территории Петринского опорного пункта Почвенного института им. В.В. Докучаева. По результатам мокрого просеивания капиллярно-увлажненной почвы наибольший \bar{d} соответствовал чернозему косимой степи (3,0 мм), наименьший – пахотному несмытому чернозему (1,4 мм). При этом \bar{d} агрегатов после мокрого просеивания капиллярно-увлажненных образцов слабо- и среднесмытого черноземов больше, чем для несмытого.

⁴ При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых, согласно Положению о присуждении ученых степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

1. **Плотникова О.О., Демидов В.В.** Прогнозирование величин транспорта чернозема типичного водными потоками малой глубины // Проблемы агрохимии и экологии. – 2020. – № 1. – С. 55–61. – DOI: 10.26178/AE.2020.2019.4.012 – IF РИНЦ 2018 = 0,303
Общий объем публикации – 0,95 авторского листа. Объем личного вклада соискателя: 85%.

Тот факт, что наибольший \bar{d} агрегатов по сухому просеиванию оказался присущ среднесмытому чернозему, можно объяснить следующим: во-первых, повышением доли глыбистых агрегатов (> 10 мм) в агрегатном составе до 27 % (рисунок 7А) (Медведев, 1979; Хитров, Чечуева, 1994); во-вторых, повышением содержания карбоната кальция в поверхностном горизонте за счет припахивания переходного горизонта АВ, содержащего карбонаты кальция (Дубовик, 2017).

Таблица 2 – Показатели структуры, водоустойчивости, содержание гумуса в черноземах типичных (Курская область)

Вариант изучаемой почвы	Средневзвешенный диаметр агрегатов \bar{d} в зависимости от вида фракционирования, мм			Коэффициент структурности K , %	Критерий водопрочности A , %	Среднее содержание гумуса в слое 0–30 см, %
	Сухое	Мокрое				
	сухой почвы	сухой почвы	капиллярно-увлажненной почвы			
Чернозем	3,3	2,3	3,0	11,1	1,94	7,18 ⁵
Несмытый чернозем	4,1	0,3	1,4	2,6	1,50	5,00
Слабосмытый чернозем	3,7	0,4	3,0	2,9	2,40	4,72
Среднесмытый чернозем	4,9	0,4	2,6	1,9	2,63	4,36

Примечание – здесь и далее по разделу значения \bar{d} приводятся в мм для удобства их сравнения между собой; чернозем – чернозем типичный участка «Косимая степь» (ЦЧЗ)

Значения показателя агрегатного состава (по данным сухого просеивания) поверхностных 10-сантиметровых слоев пахотных горизонтов черноземов типичных оказались больше, чем у чернозема косимой степи (таблица 2). На этот показатель оказала влияние относительная массовая доля глыбистых агрегатов (иногда она доходила до 50 % массы рассеиваемого образца – рисунок 7 А), поэтому средневзвешенный диаметр агрегатов в сухом состоянии в данном случае не может быть значимой характеристикой структурного состояния почвы. Агрегатный состав в этом случае следует оценивать по средневзвешенному диаметру водопрочных агрегатов и коэффициенту структурности.

⁵ Данные о содержании гумуса в гумусовом слое чернозема типичного косимой степи предоставлены отделом химии и физико-химии почв Почвенного института им. В.В. Докучаева.

Для пахотных почв значение коэффициента структурности (K) было значительно меньше, чем для почвы косимой степи (таблица 2). Кроме того, наблюдается тенденция к его уменьшению с увеличением степени смытости. При этом несмытый и слабосмытый пахотные черноземы слабо отличались по коэффициенту структурности, поскольку в этих почвах не происходит припашки карбонатно-аккумулятивного горизонта – таким образом, карбонат кальция не оказывает цементирующего действия, способствующего упрочнению агрегатов (Парфенова, Ярилова, 1977, Дубовик, 2017). Наименьшим K характеризовался чернозем типичный среднесмытый.

В целом изученные нами пахотные черноземы типичные имеют коэффициент структурности ниже, чем отмечено на этой территории Е.В. Дубовик (2008). Однако стоит отметить, что все исследованные почвы характеризовались хорошим состоянием по своему агрегатному составу (Шеин, 2005). Вероятно, это связано с тем, что изученные нами эродированные почвы находятся на склоне южной экспозиции – Е.В. Дубовик (2017) было показано, что структурное состояние чернозема типичного на южном склоне лучше, чем на северном (коэффициент структурности 3,2 и 2,3 соответственно).

Наибольшая доля агрономически ценных агрегатов выявлена в черноземе типичном косимой степи (рисунок 7). Стоит отметить, что, согласно данным Т.Н. Початковой, к агрономически ценным следует относить агрегаты с диаметром от 0,25 до 5 мм (Початкова, 1985). При мокром просеивании как воздушно-сухих, так и капиллярно-увлажненных образцов в агрегатном составе пахотных почв по сравнению с контролем резко увеличивалась доля мелких агрегатов (2–1, 1–0,5 и 0,5–0,25 мм), а также микроагрегатов (< 0,25 мм). Это же явление отмечали В.Г. Мамонтов с соавторами (2016) при исследовании черноземов типичных на территории Петринского опорного пункта Почвенного института им. В.В. Докучаева.

На рисунке 7 Б видно, что при мокром просеивании сухих образцов пахотных черноземов практически все агрегаты крупнее 2 мм разрушаются, а в составе водопрочных агрегатов преобладают фракции < 0,25 и 0,25–0,5 мм. Это

является признаком ухудшения структуры антропогенно измененных черноземов (Ахтырцев, Лепилин, 2001). В то же время критерий водопрочности с увеличением степени смытости повышается (таблица 2).

Подобное явление описано П.С. Шульгой для выщелоченных черноземов – критерий водопрочности агрегатов пахотных горизонтов увеличивался с увеличением интенсивности их сельскохозяйственного использования (Шульга, 2004). Поскольку в нашем случае интенсивность использования изучаемых почв одинакова, можно заключить, что на водоустойчивость агрегатов эродированных черноземов типичных также оказывает влияние припахивание в пахотный горизонт материала нижележащего горизонта, содержащего карбонат кальция.

Средневзвешенный диаметр водопрочных агрегатов, определенный при мокром просеивании капиллярно-увлажненных образцов, больше, чем при мокром просеивании сухих образцов, что свидетельствует о повышении водопрочности агрегатов при их предварительном увлажнении, а следовательно, повышении их противэрозионной устойчивости (Govers et al., 1990; Bradford, Foster, 1996; Defersha, Melesse, 2012). Это связано с постепенным заполнением внутриагрегатных пор водой, в результате чего не происходит резкого вытеснения из них воздуха и последующего разрушения агрегатов. Распределение размеров водопрочных агрегатов после мокрого просеивания капиллярно-увлажненных образцов свидетельствует о наилучшей водопрочности агрегатов чернозема косимой степи.

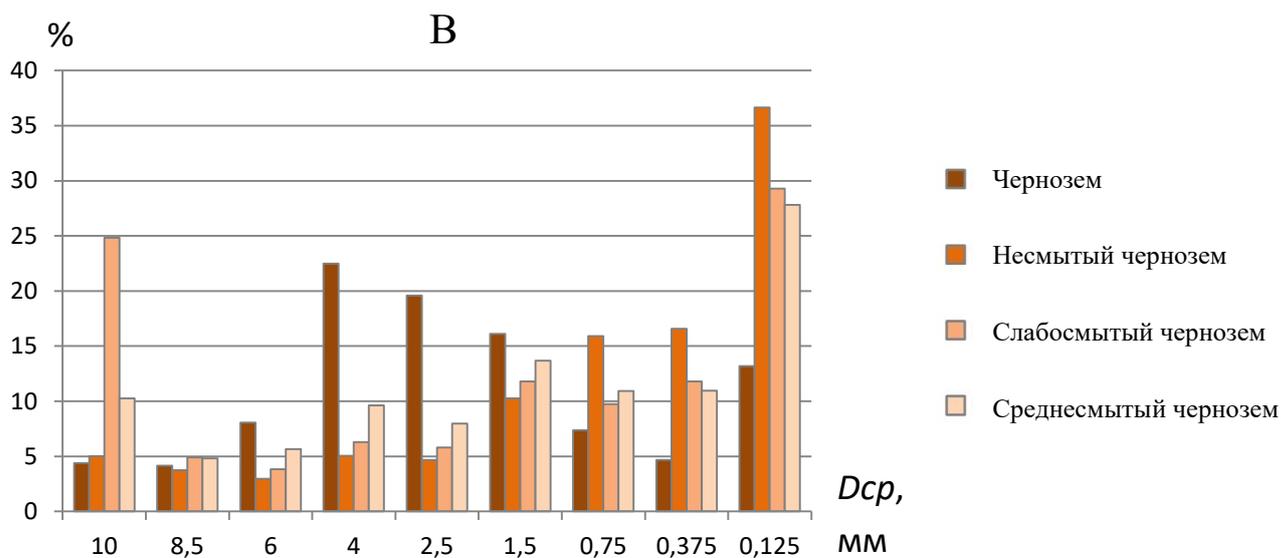
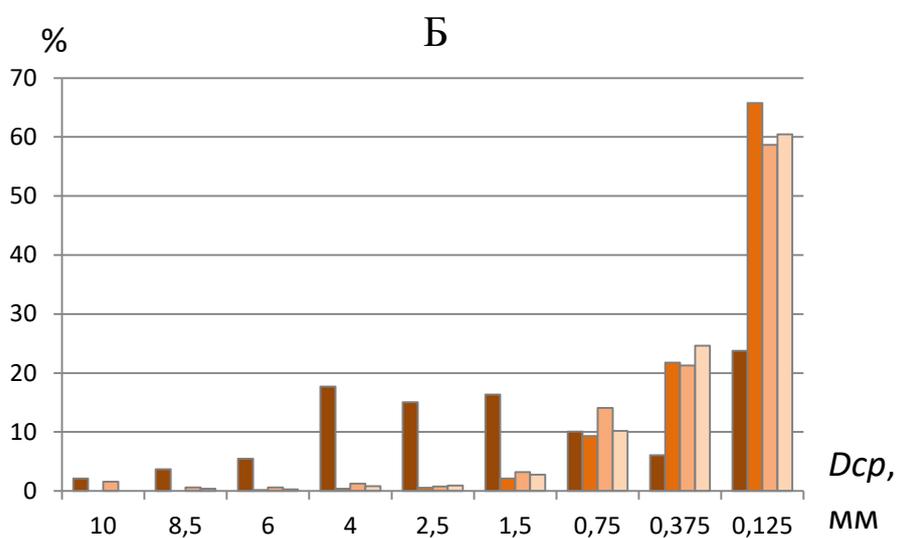
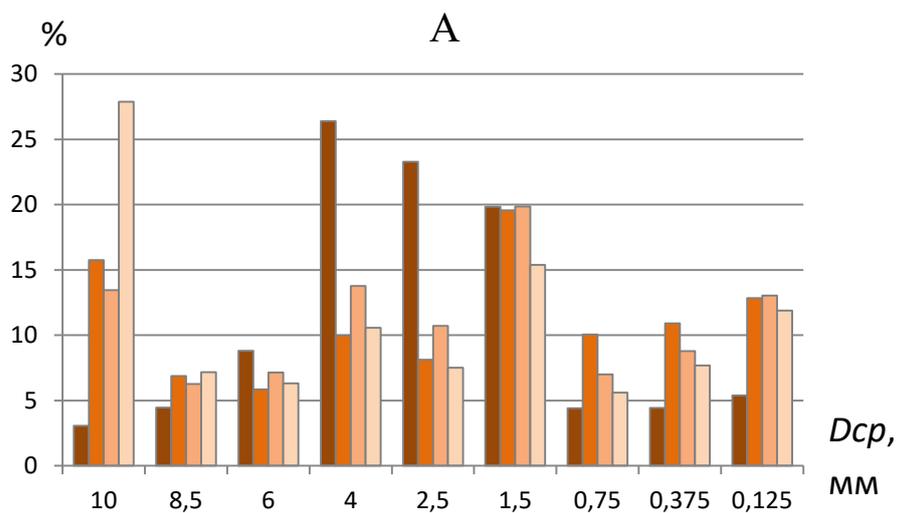


Рисунок 7 – Агрегатный состав черноземов типичных (Курская область): А – сухое просеивание сухой почвы; Б – мокрое просеивание сухой почвы; В – мокрое просеивание капиллярно-увлажненной почвы; % – доля фракции определенного размера в агрегатном составе, D_{cp} – средний диаметр фракции агрегатов. Примечание – чернозем – чернозем участка «Косимая степь», ЦЧЗ

С увеличением степени смытости содержание гумуса в слое 0–30 см в пахотных черноземах уменьшалось с 5,00 % в несмытой до 4,36 % в среднесмытой почве. В черноземе косимой степи содержание гумуса составило 7,18 % (таблица 2). Эти данные подтверждают, что на содержание гумуса в поверхностном слое пахотных почв оказывают влияние как интенсивное сельскохозяйственное использование (Кузнецова, 1977; Сорокина, Когут, 1997; Муха, 2009; Когут с соавт., 2012; Мамонтов с соавт., 2016), так и интенсивность проявления эрозионных процессов (Масютенко с соавт., 2015; Танасиенко, 1983; Тишкина, Иванова, 2010).

В связи с повышенным содержанием фракции > 10 мм связь между содержанием гумуса и средневзвешенным диаметром агрегатов не прослеживается (таблица 2). Однако при сопоставлении агрегатного состава исследуемых почв и содержания гумуса в них заметно, что чернозем косимой степи характеризуется наибольшим содержанием гумуса и наилучшими с агрономической точки зрения агрегатным составом и водопрочностью агрегатов, как было показано выше. В то же время черноземы типичные пахотные, характеризующиеся сниженным содержанием гумуса по сравнению с контролем, отличаются пониженной водопрочностью (таблица 2, рисунок 7 Б). Схожие результаты были получены и другими авторами при исследовании структурного состояния и содержания органического углерода в целинных и пахотных черноземах типичных Курской области (Мамонтов с соавт., 2016), Тамбовской области (Евдокимова, Тишкина, 1999).

Таким образом, изучение агрегатного состава и водоустойчивости структуры поверхностных 10-сантиметровых слоев пахотных исследуемых черноземов типичных показало, что вспашка снижает качество структуры почвы, что выражается в уменьшении коэффициента структурности, критерия водопрочности по сравнению с нераспаханным аналогом. При этом с увеличением степени смытости пахотных черноземов типичных их водопрочность повышается. Это происходит, вероятно, за счет цементации агрегатов карбонатом кальция.

Наши результаты показывают, что, во-первых, снижение содержания гумуса в пахотных черноземах типичных по сравнению с черноземом косимой степи влияет на ухудшение их структуры, во-вторых, уменьшение содержания гумуса в черноземах типичных разной степени смывости не снижает водоустойчивость агрегатов их пахотных горизонтов, поскольку возрастает роль карбонатов кальция в упрочнении их структуры. В нашем исследовании это соображение подтверждается как полевыми данными (глубина вскипания почвы от соляной кислоты с увеличением степени смывости сильно уменьшилась – с 90 до 29 см в несмытом и среднесмытом пахотных черноземах типичных соответственно), так и данными микроморфологического анализа (раздел 3.1).

3.3. Изменение диаметра влекомых агрегатов в зависимости от скорости потока⁶

Модельные эксперименты на БЭЛ с насыпными образцами исследуемых почв проводились в диапазонах скоростей: 0,31–0,58 м/с (чернозем участка «Косимая степь», ЦЧЗ); 0,26–0,64 м/с (несмытый чернозем); 0,26–0,65 м/с (слабо- и среднесмытый чернозем) (таблица 1 Приложения 2). Выбор диапазонов скоростей обусловлен как возможностями БЭЛ, так и тем, что скорости склоновых потоков в природе не превышают, как правило, 1–1,5 м/с (География овражной эрозии, 2006).

Проведенный анализ изменения диаметра влекомых потоком агрегатов пахотных черноземов типичных, поступающих в русло в воздушно-сухом состоянии, показал: с увеличением скорости водного потока диаметр

⁶ При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых, согласно Положению о присуждении ученых степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

1. **Плотникова О.О.**, Демидов В.В., Лебедева М.П. Действие мелководных потоков на поверхностные горизонты чернозема типичного различной степени смывости // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. – 2018. – № 91. – С. 85–109. – DOI: 10.19047/0136-1694-2018-91-85-109 – IF РИНЦ 2018 = 0,811
Общий объем публикации – 1,13 авторского листа. Объем личного вклада соискателя: 90%.

транспортируемых агрегатов возрастает очень слабо. В то же время при поступлении в русло капиллярно-увлажненных образцов средневзвешенный диаметр влекаемых агрегатов заметно увеличивается с возрастанием скорости водного потока от минимальной к максимальной (в некоторых случаях на порядок) (рисунок 8).

Такая закономерность объясняется несколькими причинами. При попадании в воду сухой почвы происходит взрывное вытеснение воздуха из агрегатов, что приводит к их разрушению (Шейн, 2005), тогда как предварительное их увлажнение повышает противоэрозионную устойчивость почвы (Кузнецов, 1981; Govers et al, 1990; Ларионов с соавт., 2014). В разделе 3.2 приведены результаты исследования агрегатного состава изучаемых черноземов, которые демонстрируют их невысокую водоустойчивость при исходном сухом состоянии и существенное повышение водоустойчивости при предварительном увлажнении образцов.

Также в работе Г.А. Ларионова с коллегами (Ларионов с соавт., 2019) показано, что при предварительном увлажнении агрегаты почвы подвергаются гидростатическому взвешиванию и меньше испытывают влияние силы тяжести. Вследствие описанных явлений при одних и тех же характеристиках потока в капиллярно-увлажненном состоянии потоком выносятся заметно более крупные агрегаты, чем в исходно сухом состоянии.

Кроме того, при длительном капиллярном увлажнении образцов происходит разрастание колоний почвенных микроорганизмов, оказывающих скрепляющее действие на агрегаты (Кузнецов, 1981; Ларионов с соавт., 2007). Однако насколько сильно проявляется это действие при размыве образцов на БЭЛ, сказать трудно, поскольку длина русла небольшая, а воздействие потока в экспериментах было кратковременным.

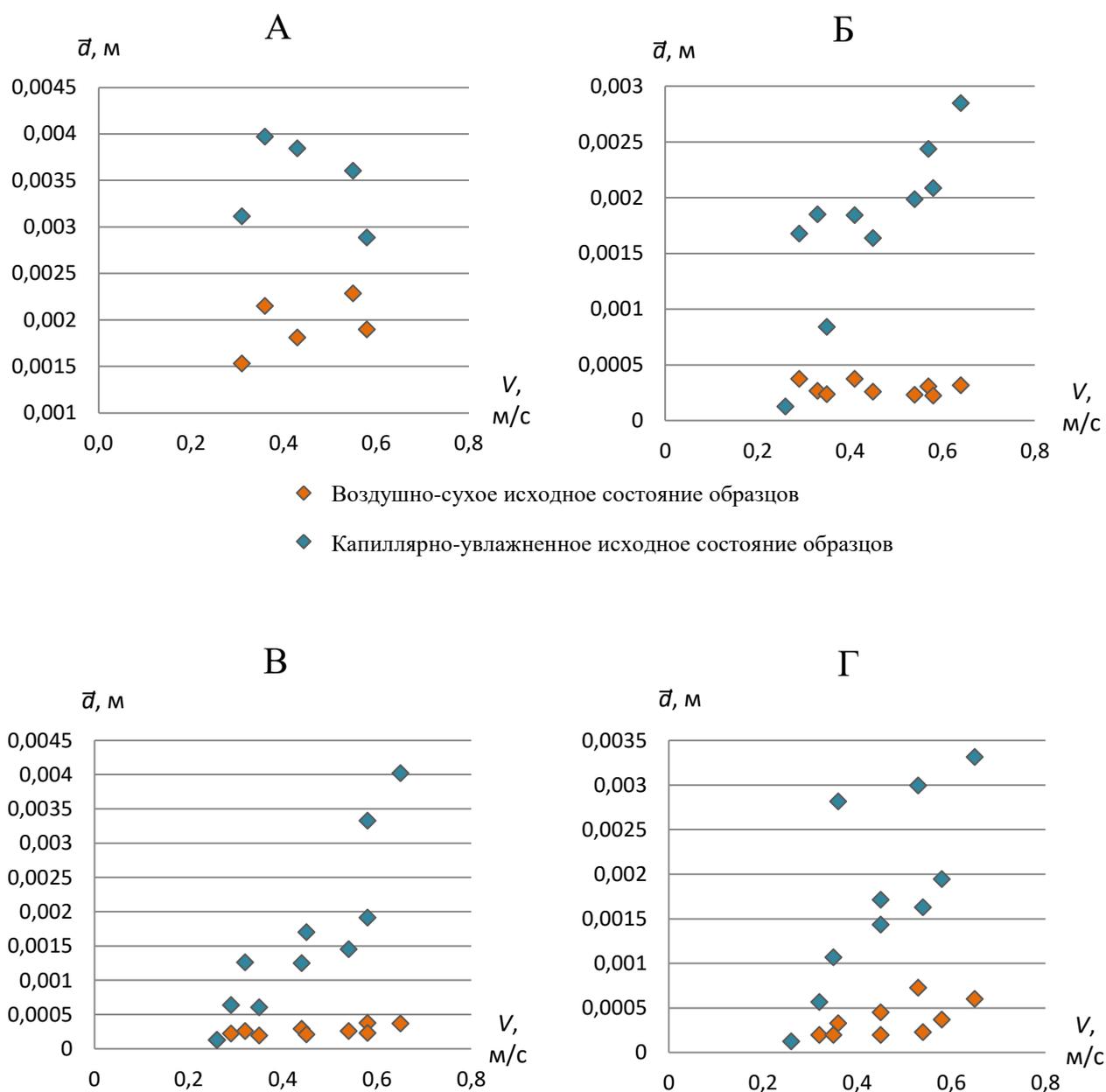


Рисунок 8 – Изменение средневзвешенных диаметров влекаемых агрегатов в зависимости от скорости потока малой глубины: А – чернозем участка «Косимая степь», ЦЧЗ; Б, В, Г – пахотные черноземы типичные несмытый, слабо- и среднесмытый соответственно

Таким образом, при увеличении скорости модельных мелководных потоков при исходном воздушно-сухом состоянии почвы средневзвешенный диаметр влекаемых агрегатов пахотных черноземов типичных практически не изменяется. При исходном капиллярно-увлажненном состоянии почвы средневзвешенный диаметр влекаемых агрегатов увеличивается значительно с увеличением скорости мелководных склоновых потоков. Эти явления связаны с повышением водостойчивости агрегатов при предварительном увлажнении.

3.4. Верификация уравнения транспортирующей способности потоков малой глубины⁷

По результатам модельных экспериментов с насыпными образцами исследуемых почв на БЭЛ были рассчитаны значения критической скорости потока (V_k , м/с) и мутности потока ($\beta_{эксн}$, кг/м³), после чего построены графики зависимости $\ln\beta_{эксн}$ от $\ln((V^2 - V_k^2)/gH)$ для верификации уравнения (12) (Приложение 2). По уравнению линейного тренда вида $y = kx + b$ для каждого графика (рисунок 9, 10) находили эмпирический коэффициент C как антилогарифм свободного члена в уравнении линии тренда и эмпирический показатель степени $1/\gamma$ как показатель тангенса угла наклона линии тренда (таблица 3). Коэффициенты корреляции Пирсона R при аппроксимации зависимостей $\ln\beta_{эксн}$ от $\ln((V^2 - V_k^2)/gH)$ оказались достаточно высоки при исследовании пахотных почв (от 0,74 для слабосмытой воздушно-сухой почвы до 0,92 для среднесмытой капиллярно-увлажненной почвы), что говорит об удовлетворительной достоверности выполненной аппроксимации.

С использованием полученных при верификации уравнения (12) C и $1/\gamma$ были рассчитаны значения транспортирующей способности модельных потоков, соответствующие заданным на БЭЛ параметрам. Затем были рассчитаны относительные ошибки P для каждого эксперимента (таблица 2 Приложения 2) и средние ошибки по сериям экспериментов (таблица 3). Выяснилось, что относительная ошибка расчетных значений β для пахотных

⁷ При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых, согласно Положению о присуждении ученых степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

1. **Плотникова О.О.**, Демидов В.В., Лебедева М.П. Действие мелководных потоков на поверхностные горизонты чернозема типичного различной степени смытости // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. – 2018. – № 91. – С. 85–109. – DOI: 10.19047/0136-1694-2018-91-85-109 – IF РИНЦ 2018 = 0,811

Общий объем публикации – 1,13 авторского листа. Объем личного вклада соискателя: 90%.

2. **Плотникова О.О.**, Демидов В.В. Прогнозирование величин транспорта чернозема типичного водными потоками малой глубины // Проблемы агрохимии и экологии. – 2020. – № 1. – С. 55–61. – DOI: 10.26178/АЕ.2020.2019.4.012 – IF РИНЦ 2018 = 0,303

Общий объем публикации – 0,95 авторского листа. Объем личного вклада соискателя: 85%.

черноземов типичных во всех случаях оказалась достаточно низкой и соответствующей диапазону ошибок, наблюдающихся в подобных исследованиях (Гендугов с соавт., 2007): от 12,8 % для слабосмытого чернозема в воздушно-сухом исходном состоянии до 16,9 % для несмытого чернозема в капиллярно-увлажненном исходном состоянии.

Таблица 3 – Результаты верификации уравнения транспортирующей способности водных потоков малой глубины на примере черноземов типичных (Курская область)

Исходное состояние образцов	R	C	I/γ	$ P , \%$
Чернозем участка «Косимая степь», ЦЧЗ				
Воздушно-сухое	0,87	36,03	-0,52	52,7
Капиллярно-увлажненное	0,50	22,61	-0,03	52,6
Чернозем несмытый				
Воздушно-сухое	0,90	12,53	0,46	13,0
Капиллярно-увлажненное	0,86	12,78	0,46	16,9
Чернозем слабосмытый				
Воздушно-сухое	0,74	13,73	0,25	12,8
Капиллярно-увлажненное	0,84	10,27	0,67	16,2
Чернозем среднесмытый				
Воздушно-сухое	0,81	11,57	0,58	16,2
Капиллярно-увлажненное	0,92	8,20	0,86	14,6

Примечание – R – коэффициент корреляции; C – эмпирический коэффициент; I/γ – эмпирический показатель степени; $|P|$ – относительная ошибка по модулю

Для серий экспериментов с образцами чернозема типичного косимой степи коэффициенты корреляции R Пирсона были равны 0,50 (для исходно воздушно-сухих образцов) и 0,87 (для исходно капиллярно-увлажненных образцов). Также были рассчитаны непараметрические коэффициенты корреляции R Спирмена, показывающие не только силу, но и направленность связи между $\ln\beta_{эксн}$ и $\ln((V^2 - V_k^2)/gH)$. Для серии экспериментов с воздушно-сухой почвой R Спирмена оказался равен -0,9 и являлся значимым, что показывает тесную отрицательную связь $\ln\beta_{эксн}$ и $\ln((V^2 - V_k^2)/gH)$. Это подтверждается и графиком (рисунок 10). В случае с предварительно капиллярно-увлажненной почвой оказалось, что R Спирмена равен -0,7 и является незначимым.

Таким образом, можно сказать, что в этой серии экспериментов связь между логарифмированными показателями отсутствует, а верификацию уравнения транспортирующей способности потоков малой глубины осуществить не удалось. Для чернозема косимой степи R оказались равны в среднем 52,7 %, что ясно показывает, что верифицировать уравнение (12) для этой почвы не удалось. Можно предположить, что это связано с сильным переплетением почвы корнями в поверхностном слое чернозема косимой степи и формированием под степной травянистой растительностью особенной почвенной структуры, так называемых бус. Даже в экспериментах по размыву супесей, в разной степени скрепленных корнями травянистой растительности, было показано, что интенсивность отрыва почвенных частиц сильно снижалась с увеличением плотности корней в образце (De Vaets et al, 2006). В наших экспериментах, несмотря на то что образцы использовались насыпные, очень заметным оказалось влияние совокупности факторов: высокая доля корней, повышенное относительно пахотных почв содержание гумуса, сильная водоустойчивость структуры и тяжелосуглинистый гранулометрический состав почвы заповедника.

Таким образом, на примере пахотных черноземов типичных разной степени смывости нами было показано, что для расчета транспортирующей способности потоков малой глубины, действующих на эти почвы, успешно можно применять уравнение транспортирующей способности, разработанное на кафедре эрозии и охраны почв факультета почвоведения МГУ с применением гидравлического подхода (Гендугов с соавт., 2007). В дальнейшем это уравнение может применяться для расчетов в таких широко используемых эрозионных моделях как WEPP (Flanagan et al., 2001) и WaTEM/SEDEM (Van Oost et al., 2000).

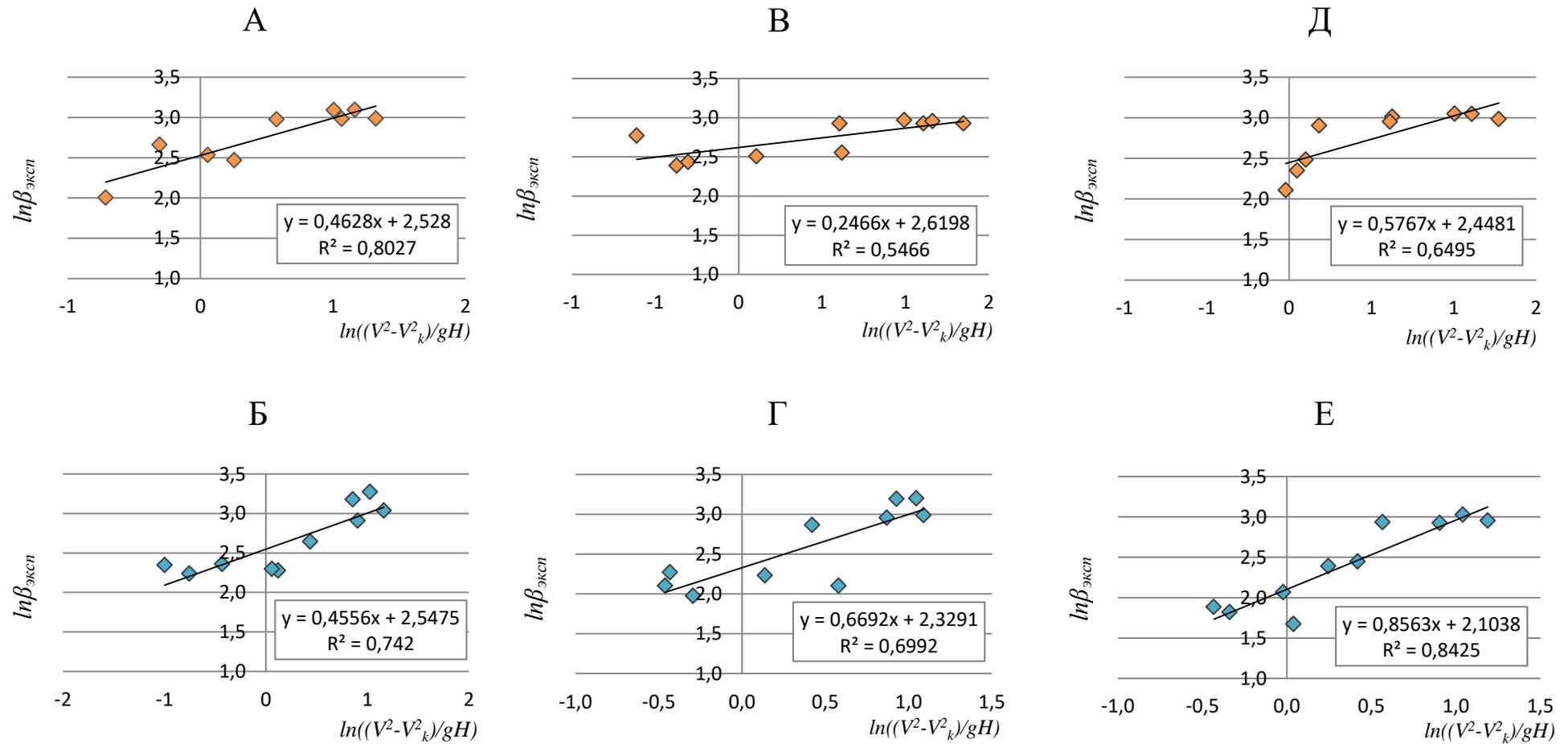


Рисунок 9 – Зависимости $\ln\beta_{\text{эксп}}$ от $\ln((V^2 - V_k^2)/gH)$ для верификации уравнения транспортирующей способности водных потоков малой глубины на примере пахотных черноземов типичных (Курская область): А, Б – несмытый; В, Г – слабосмытый; Д, Е – среднесмытый чернозем; А, В, Д – воздушно-сухое, Б, Г, Е – капиллярно-увлажненное исходное состояние образцов

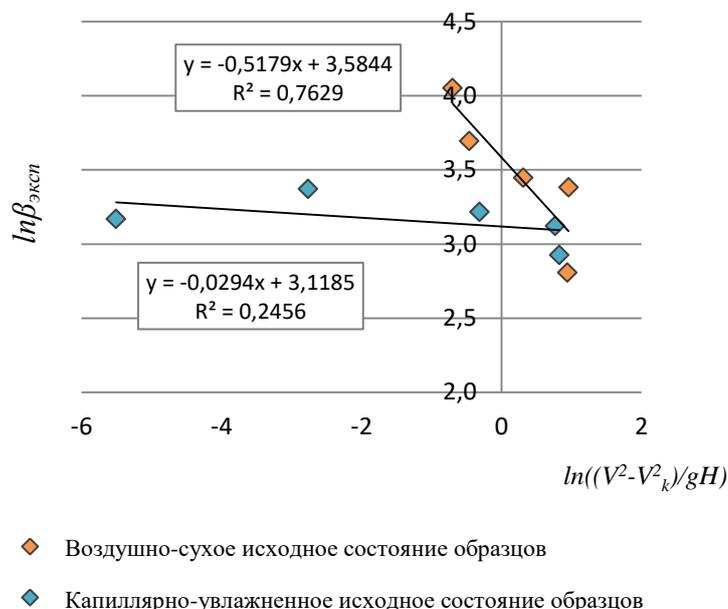


Рисунок 10 – Зависимость $\ln\beta_{\text{экср}}$ от $\ln((V^2-V_k^2)/gH)$ для верификации уравнения транспортирующей способности водных потоков малой глубины на примере чернозема типичного участка «Косимая степь» (ЦЧЗ, Курская область)

3.5. Морфометрические параметры агрегатов черноземов типичных и их изменение в результате воздействия модельных мелководных потоков⁸

Для оценки степени влияния модельных мелководных потоков на морфометрические параметры агрегатов нами были выбраны фракции, соответствующие средневзвешенному диаметру влекаемых агрегатов при трех вариантах скорости потока. Варианты скорости подбирали таким образом, чтобы они были приблизительно равны между собой при разных степенях смытости исследуемых почв и по возможности являлись наименьшей, средней

⁸ При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых, согласно Положению о присуждении ученых степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

1. **Plotnikova O.O.**, Lebedeva M.P., Demidov V.V., Karpova D.V. Comparison of micromorphometric characteristics of aggregates from noneroded and moderately eroded typical chernozem in a laboratory experiment // Eurasian Soil Science. – 2019. – V. 52. – № 10. – P. 1258–1265. – DOI: 10.1134/S1064229319100090 – IF SJR 2019 = 0,53

Общий объем публикации – 0,82 авторского листа. Объем личного вклада соискателя: 85%.

2. **Плотникова О.О.**, Романис Т.В., Куст П.Г. Сравнение методов цифрового анализа изображений для морфометрической характеристики почвенных агрегатов в шлифах // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. – 2020. – № 104. – С. 199–222. – DOI: 10.19047/0136-1694-2020-104-199-222 – IF РИНЦ 2018 = 0,811

Общий объем публикации – 1,18 авторского листа. Объем личного вклада соискателя: 80%.

и наибольшей из диапазона скоростей размыва образцов на БЭЛ. Стоит отметить, что при исходном воздушно-сухом состоянии образцов выносились чаще всего агрегаты, соответствующие фракциям 0,5–0,25 и < 0,25 мм. В связи с недостоверным выделением границ таких мелких агрегатов на снимках шлифов и искажением последующего анализа было принято решение влияние размыва на морфометрические параметры этих агрегатов не анализировать. Таким образом, анализировали агрегаты исходно капиллярно-увлажненных образцов. К каждой фракции агрегатов, транспортируемых потоком, была подобрана аналогичная по размеру фракция агрегатов, не размывавшихся на БЭЛ. Для удобства все изучаемые фракции были закодированы. В таблице 4 представлены величины скоростей и фракции, отобранные для изготовления шлифов и дальнейшего анализа.

Таблица 4 – Фракции агрегатов черноземов типичных, влекомых модельными мелководными потоками, отобранные для оценки влияния скорости потока на микроморфометрические параметры агрегатов

V, м/с	Фракция, мм	Код фракции размывтых агрегатов	Код фракции неразмывтых агрегатов
Чернозем участка «Косимая степь», ЦЧЗ			
0,31	1-2	CHKOSST.S1.22	CHKOSST.FR.1_2
0,44	3-5	CHKOSST.S3.22	CHKOSST.FR.3_5
0,58	2-3	CHKOSST.S5.23	CHKOSST.FR.2_3
Чернозем несмытый			
0,55	2-3	CHNESM.S7.23	CHNESM.FR.2_3
0,41	1-2	CHNESM.S9.24	CHNESM.FR.1_2
0,29	1-2	CHNESM.S10.24	CHNESM.FR.1_2
Чернозем слабосмытый			
0,32	1-2	CHSLAB.S12.24	CHSLAB.FR.1_2
0,44	1-2	CHSLAB.S13.24	CHSLAB.FR.1_2
0,58	3-5	CHSLAB.S14.22	CHSLAB.FR.3_5
Чернозем среднесмытый			
0,54	2-3	CHSRED.S17.23	CHSRED.FR.2_3
0,45	3-5	CHSRED.S18.22	CHSRED.FR.3_5
0,32	0.5-1	CHSRED.S20.25	CHSRED.FR.0.5_1

Примечание – CHKOSST – чернозем участка «Косимая степь», ЦЧЗ; CHNESM – несмытый чернозем; CHSLAB – слабосмытый чернозем; CHSRED – среднесмытый чернозем; S – скорость потока в экспериментах на БЭЛ; FR – фракция агрегатов, не участвовавших в экспериментах на БЭЛ

Описательные статистики выборок полученных морфометрических показателей представлены в таблицах 1–3 Приложения 3. Остановимся подробнее на их рассмотрении. Поскольку величины в выборках в большинстве случаев распределены не нормально, о чем можно судить по диаграммам размаха (рисунок 11–13), имеет смысл оценивать морфометрические показатели агрегатов по их медианным значениям.

Среди влекомых потоком агрегатов чернозема косимой степи наименьшим фактором формы (FF) характеризуются агрегаты, снесенные потоком при средней скорости, а наибольшим фактором формы – снесенные при минимальной скорости. В случае чернозема пахотного несмытого наименьший FF присущ агрегатам, снесенным при максимальной скорости, а наибольший – снесенным при средней скорости. Среди изученных фракций агрегатов среднесмытого пахотного чернозема наименьший FF соответствует фракции, снесенной потоком со средней скоростью, а наибольший FF – фракции, снесенной с минимальной скоростью. В целом среди размытых на БЭЛ почв бóльший FF присущ агрегатам пахотного несмытого чернозема, а меньший – агрегатам слабосмытого чернозема.

Рассматривая фактор формы агрегатов изучаемых почв, не размытых на БЭЛ, можно сказать, что самым большим FF характеризуются фракции 0,5–1 мм среднесмытого пахотного чернозема и 1–2 мм чернозема косимой степи и слабосмытого пахотного. Наименьшим FF характеризуются фракции неразмытых агрегатов размером 2–3 мм несмытого и среднесмытого пахотных черноземов и 3–5 мм чернозема косимой степи.

В целом медианные значения FF всех изученных фракций почвенных агрегатов черноземов варьируют в диапазоне от 0,42 до 0,65, то есть форму всех изученных фракций можно считать более-менее близкой к окружности. По классификации Е.Б. Скворцовой и Д.Р. Морозова, разработанной ими для пор (Скворцова, Морозов, 1993), изученные фракции агрегатов черноземов типичных можно отнести к категории изометричных сильноизрезанных и овально-вытянутых. Однако необходимо учитывать, что Е.Б. Скворцова и

Д.Р. Морозов рассчитывали FF по усложненной формуле, учитывающей изрезанность в явной форме. В нашем же исследовании степень изрезанности поверхности агрегата рассчитывается и оценивается дополнительно, поскольку фактор формы, рассчитываемый программой STan, характеризует главным образом округлость изучаемого объекта.

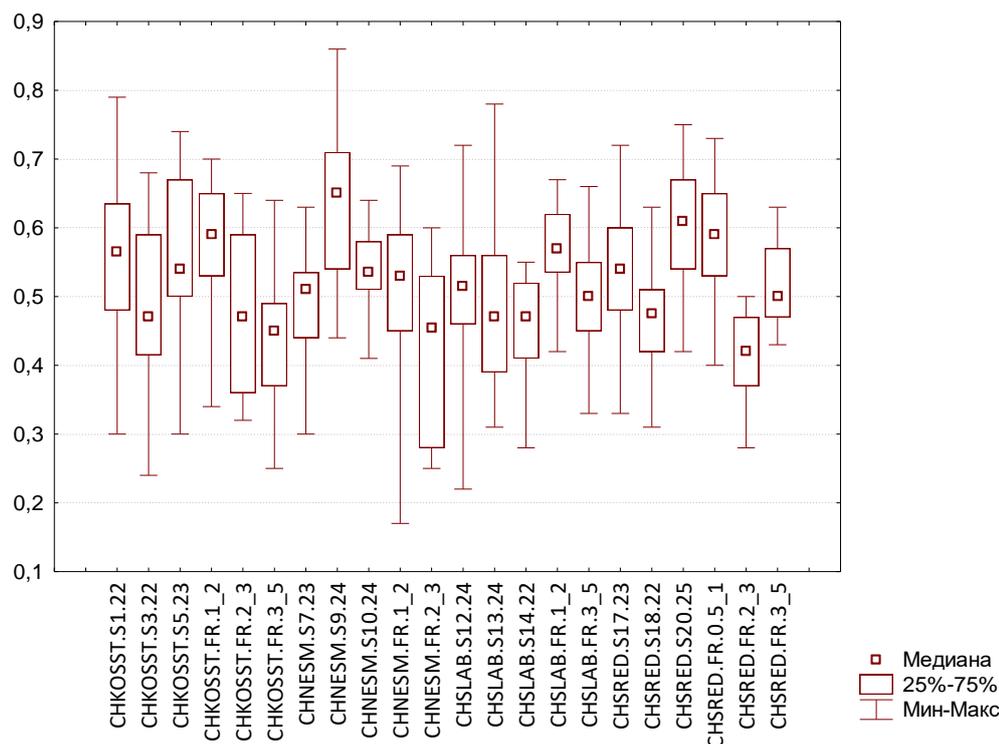


Рисунок 11 – Диаграммы размаха значений фактора формы (FF) агрегатов черноземов типичных Курской области. Примечание – CHKOSST – чернозем участка «Косимая степь», ЦЧЗ; CHNESM – несмытый чернозем; CHSLAB – слабосмытый чернозем; CHSRED – среднесмытый чернозем; S – скорость потока в экспериментах на БЭЛ; FR – фракция агрегатов, не участвовавших в экспериментах на БЭЛ

Рассматривая фактор формы всех изученных фракций черноземов типичных, можно заметить, что независимо от степени смытости почвы и факта размыва образца на БЭЛ наименьшим FF отличаются крупнейшие из изученных фракций – 3–5 мм, а наибольшим FF – наименьшие фракции, 0,5–1 и 1–2 мм. Таким образом, можно сделать вывод: чем крупнее агрегаты, тем они менее изометричны.

Наибольшей степенью изометричности (Rdn) среди фракций агрегатов чернозема косимой степи, размывших на БЭЛ, характеризуются снесенные

потоком при максимальной скорости (0,58 м/с), а наименьшей – снесенные при средней скорости (0,44 м/с). В случае несмытого пахотного чернозема степень изометричности агрегатов, снесенных потоком с минимальной и максимальной скоростями, приблизительно одинакова, а *Rdn* агрегатов, влекаемых потоком средней скорости, максимальна, как и в случае слабосмытого пахотного чернозема (рисунок 12). Наибольшая степень изометричности размывших на БЭЛ агрегатов пахотного среднесмытого чернозема соответствует фракции 0,5–1 мм, влекаемой потоком при минимальной скорости (0,32 м/с).

Среди агрегатов исходных образцов наибольший *Rdn* характерен для фракций 1–2 мм несмытого и 0,5–1 мм среднесмытого пахотных черноземов, а наименьший *Rdn* соответствует фракциям 2–3 мм несмытого и среднесмытого пахотных черноземов.

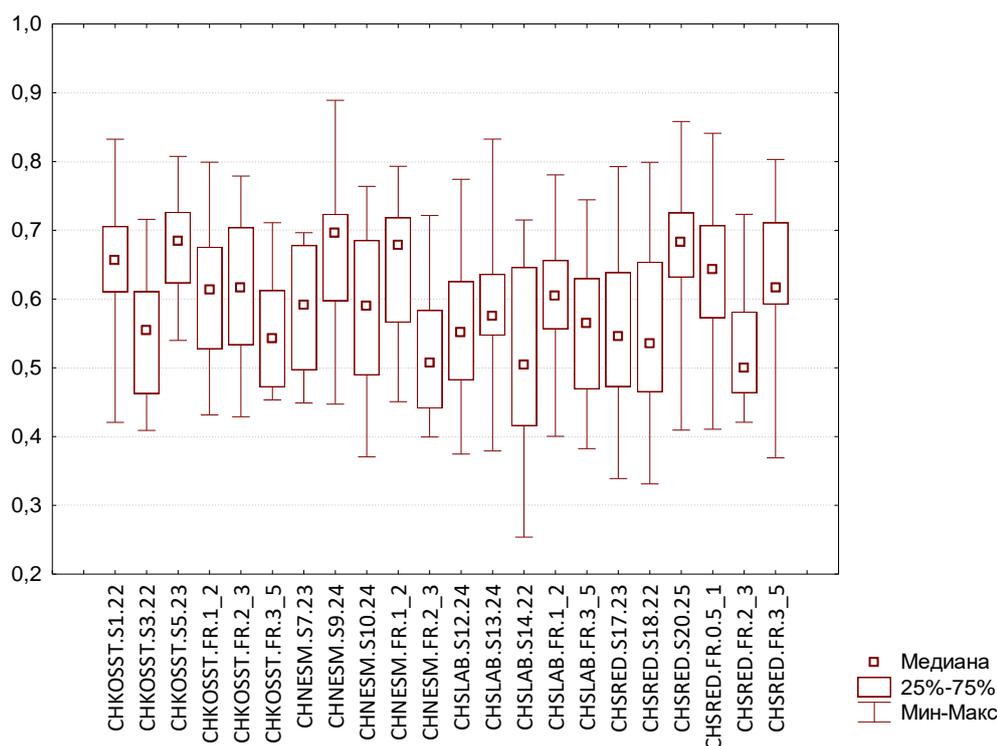


Рисунок 12 – Диаграммы размаха степени изометричности (*Rdn*) агрегатов черноземов типичных Курской области. Примечание – CHKOSST – чернозем участка «Косимая степь», ЦЧЗ; CHNESM – несмытый чернозем; CHSLAB – слабосмытый чернозем; CHSRED – среднесмытый чернозем; S – скорость потока в экспериментах на БЭЛ; FR – фракция агрегатов, не участвовавших в экспериментах на БЭЛ

Оценивая степень изометричности агрегатов изученных фракций черноземов типичных, стоит отметить две особенности: 1) как и в случае с

фактором формы, наибольшие значения степени изометричности присущи мелким агрегатам – 0,5–1 и 1–2 мм, а вот наименьшие Rdn оказались характерны для фракции 2–3 мм; 2) в большинстве случаев Rdn размытых на БЭЛ агрегатов выше, чем Rdn исходных агрегатов.

Из размытых на БЭЛ агрегатов изученных черноземов Курской области по коэффициенту изрезанности поверхности (U) наиболее изрезанными оказались следующие фракции: чернозем косимой степи, 3–5 мм, скорость средняя; слабосмытый пахотный чернозем, 1–2 и 3–5 мм, скорости средняя и максимальная; среднесмытый пахотный чернозем, 3–5 мм, скорость средняя (рисунок 13). Стоит отметить, что коэффициент изрезанности во всех случаях составляет $\approx 1,45$ – $1,46$, а в трех случаях из четырех описанных выше наиболее изрезанными являются агрегаты фракции 3–5 мм, самой крупной из изученных.

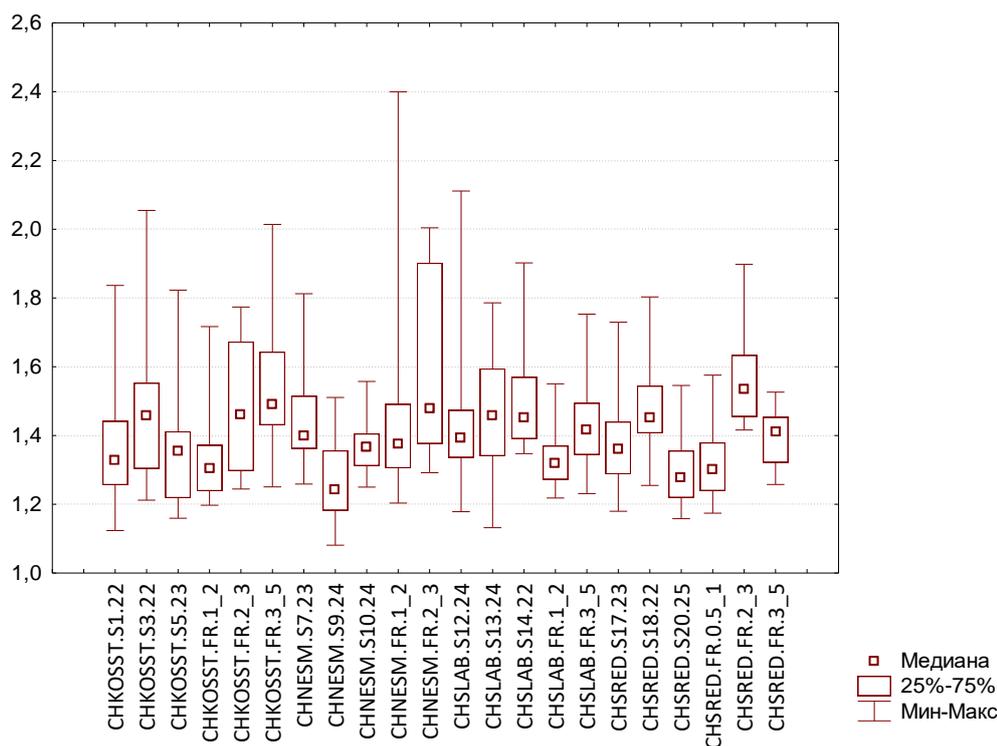


Рисунок 13 – Диаграммы размаха коэффициента изрезанности поверхности (U) агрегатов черноземов типичных Курской области. Примечание – CHKOSST – чернозем участка «Косимая степь», ЦЧЗ; CHNESM – несмытый чернозем; CHSLAB – слабосмытый чернозем; CHSRED – среднесмытый чернозем; S – скорость потока в экспериментах на БЭЛ; FR – фракция агрегатов, не участвовавших в экспериментах на БЭЛ

Наименьшую изрезанность из размытых на БЭЛ имеют фракции: 1–2 мм, чернозем косимой степи, минимальная скорость; 1–2 мм, несмытый пахотный

чернозем, средняя скорость; 0,5–1 мм, среднесмытый пахотный чернозем, минимальная скорость.

Размеры фракций, не размытых на БЭЛ, имеющих наибольшую изрезанность поверхности агрегатов: 2–3 и 3–5 мм, косимая степь; 2–3 мм, несмытый чернозем; 3–5 мм, слабосмытый чернозем; 2–3 и 3–5 мм, среднесмытый чернозем. Наименьшую изрезанность из исходных фракций имеют: 1–2 мм, косимая степь, и 0,5–1 мм, среднесмытый пахотный чернозем. Нетрудно отметить следующую закономерность: вне зависимости от степени смытости почвы и размыва на БЭЛ, чем крупнее агрегаты, тем больше коэффициент изрезанности их поверхности.

Следовательно, общая тенденция такова, что чем меньше по размеру агрегаты чернозема типичного, тем более они округлы, изометричны и менее изрезанны, и наоборот. Однако о влиянии на эти показатели степени смытости чернозема и размыва агрегатов мелководными потоками достаточно сложно судить по одним лишь медианным значениям FF , Rdn и U . Поэтому был выполнен многофакторный дисперсионный анализ для этих трех характеристик агрегатов. Его результаты представлены в таблице 5 и на рисунках 14–16.

Данные таблицы 5 показывают, что на изменение фактора формы агрегатов оказывает влияние как степень смытости почвы, так и скорость, при которой образцы размываются потоком, причем один фактор усиливает влияние другого. С коэффициентом изрезанности поверхности агрегатов ситуация такая же, как и с фактором формы. На изометричность же агрегатов влияние оказывает только степень смытости почвы, но ее влияние усиливается при добавлении фактора скорости. Дисперсионный анализ не показал статистически значимого влияния скорости потока на степень изометричности агрегатов без учета фактора степени смытости исходной почвы.

Рассмотрим подробнее, как именно влияют такие факторы, как смытость почвы и скорость потока на морфометрические показатели агрегатов почвы в эрозионном эксперименте.

На рисунке 14 отчетливо видно, что чернозем косимой степи и среднесмытый пахотный чернозем имеют одинаковый вид кривых изменений фактора формы агрегатов, вызванных воздействием мелководного потока. В то же время несмытый и слабосмытый пахотные черноземы демонстрируют другой характер изменений. При воздействии потока с минимальной скоростью на образцы чернозема косимой степи и среднесмытого пахотного чернозема агрегаты становятся более округлыми, чем до размыва. Однако при увеличении скорости потока до значений $\approx 0,4$ м/с агрегаты становятся существенно менее округлыми, а затем при дальнейшем увеличении скорости их FF вновь увеличивается до значений, близких к исходным значениям до размыва.

Таблица 5 – Результаты многофакторного дисперсионного анализа значений фактора формы (FF), степени изометричности (Rdn) и коэффициента изрезанности поверхности (U) агрегатов черноземов типичных Курской области

	SS	Степени свободы	MS	F	p
FF					
Свободный член	100,7194	1	100,7194	9862,65	0,000000
Смытость	0,1242	3	0,0414	4,05	0,007254
Скорость	0,1127	3	0,0376	3,68	0,012091
Смытость×скорость	0,6066	9	0,0674	6,60	0,000000
Ошибка	5,6269	551	0,0102		
Rdn					
Свободный член	131,9280	1	131,9280	12271,01	0,000000
Смытость	0,1602	3	0,0534	4,97	0,002079
Скорость	0,0585	3	0,0195	1,81	0,143400
Смытость×скорость	0,4663	9	0,0518	4,82	0,000003
Ошибка	5,9239	551	0,0108		
U					
Свободный член	728,4426	1	728,4426	29622,48	0,000000
Смытость	0,3122	3	0,1041	4,23	0,005685
Скорость	0,2268	3	0,0756	3,07	0,027281
Смытость×скорость	1,3352	9	0,1484	6,03	0,000000
Ошибка	13,5496	551	0,0246		

Примечание – SS – сумма квадратов, MS – средний квадрат, F – F -критерий, p – уровень значимости. Красным цветом отмечены строки, для которых $p < \alpha$

Степень округлости агрегатов несмытого пахотного чернозема при воздействии мелководного потока увеличивается, достигая максимальных значений при средней скорости потока, а затем уменьшается до исходных

значений при максимальной скорости. В случае слабосмытого чернозема фактор формы агрегатов с увеличением скорости мелководного потока постепенно уменьшается, принимая минимальные значения при максимальной скорости (рисунок 14).

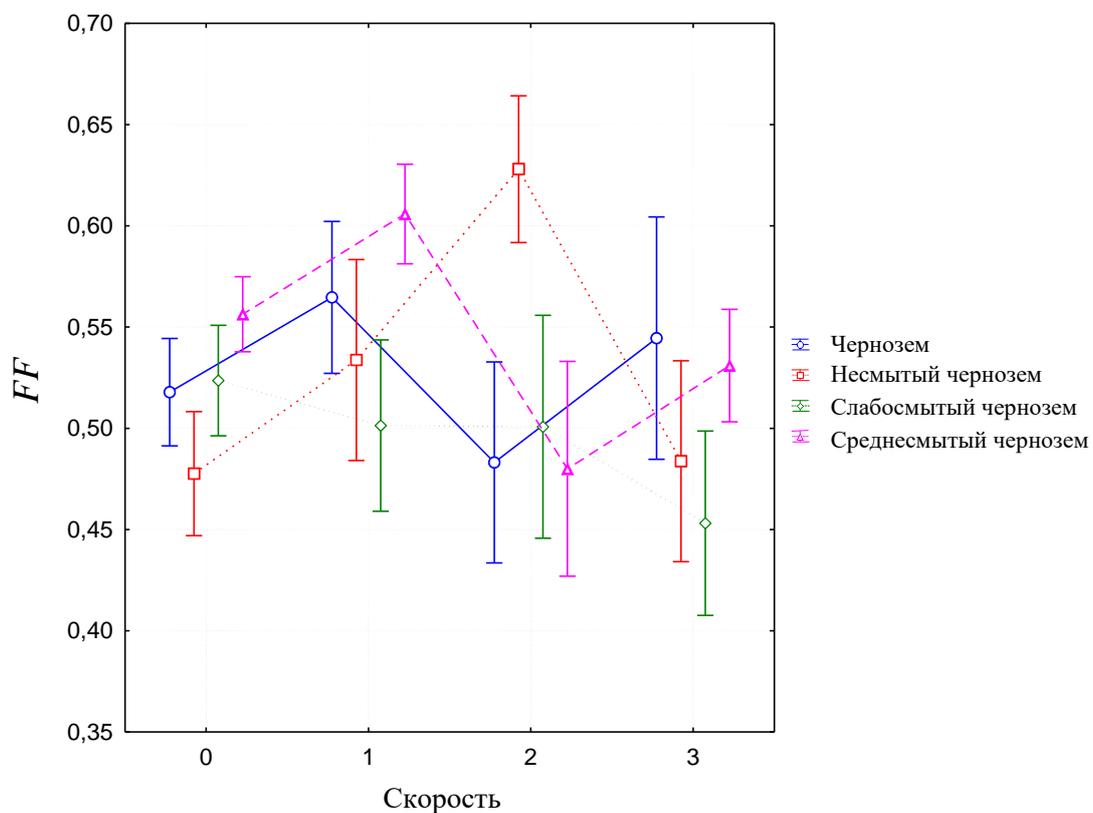


Рисунок 14 – Изменение средних значений фактора формы (FF) агрегатов черноземов типичных (Курская область) с увеличением скорости модельного мелководного потока. Обозначения скорости: 0 – контроль до размыва (нет скорости), 1 – минимальная, 2 – средняя, 3 – максимальная. Вертикальные столбцы равны 0,95 доверительных интервалов. Примечание – чернозем – чернозем участка «Косимая степь», ЦЧЗ

На изометричность агрегатов по данным дисперсионного анализа бóльшее влияние оказывает смытость почвы, поэтому график построен в координатах Rdn – Смытость (рисунок 15). Можно отметить, что при минимальной и максимальной скоростях потока влияние смытости имеет одинаковые закономерности, при отсутствии размыва на БЭЛ влияние степени смытости выражено слабее, но имеет схожие очертания с графиками влияния минимальной и максимальной скоростей. При средней скорости влияние степени смытости приобретает особенный характер. При отсутствии размыва

на БЭЛ степень изометричности агрегатов изменяется с увеличением степени смытости очень слабо и средние значения Rdn колеблются около 0,60.

При размыве на БЭЛ с минимальной и максимальной скоростями модельных потоков изометричность влекомых почвенных агрегатов уменьшается при переходе от чернозема косимой степи к слабосмытому пахотному чернозему, а затем вновь увеличивается с увеличением степени смытости (при переходе от слабо- к среднесмытому пахотному чернозему). При средней скорости мелководного потока значение степени изометричности агрегатов несмытого чернозема значительно больше, чем Rdn агрегатов чернозема косимой степи, а с увеличением степени смытости средние значения этого морфометрического показателя уменьшаются. При этом Rdn среднесмытого пахотного чернозема приблизительно равна Rdn чернозема косимой степи в середине диапазона скоростей размыва на БЭЛ (рисунок 15).

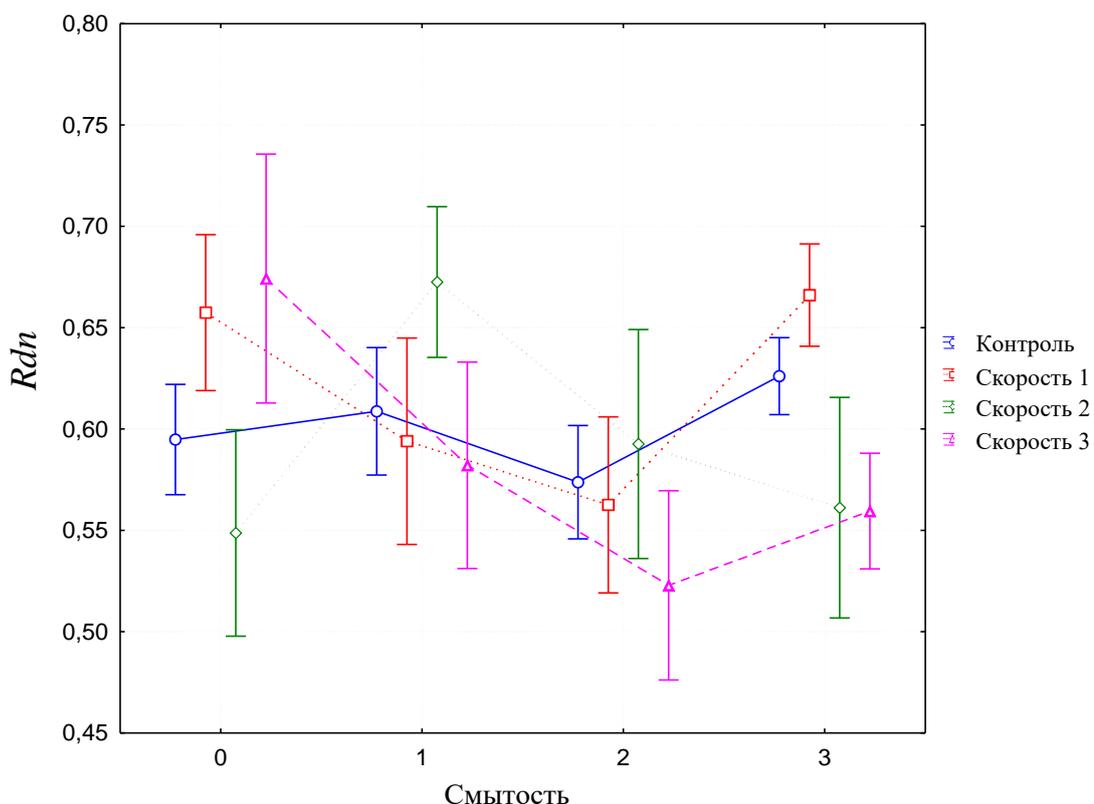


Рисунок 15 – Изменение средних значений степени изометричности (Rdn) агрегатов черноземов типичных (Курская область) с увеличением степени смытости исходной почвы. Обозначения смытости: 0 – чернозем участка «Косимая степь», ЦЧЗ; 1, 2, 3 – несмытый, слабосмытый, среднесмытый пахотные черноземы соответственно. Обозначения скорости: контроль – до размыва (нет скорости), скорость 1 – минимальная, скорость 2 – средняя, скорость 3 – максимальная. Вертикальные столбцы равны 0,95 доверительных интервалов

Закономерности изменения коэффициента изрезанности поверхности агрегатов изучаемых почв в зависимости от скорости мелководного потока обратны описанным выше закономерностям изменения фактора формы (рисунок 14, 16).

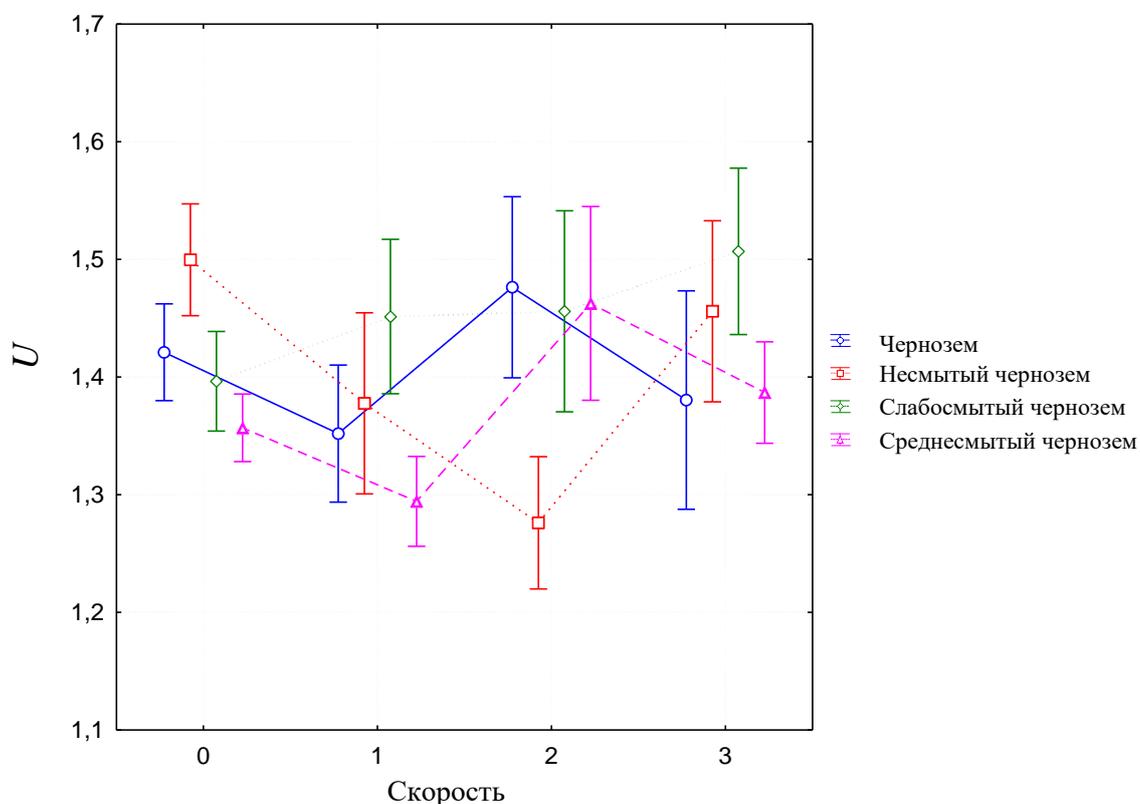


Рисунок 16 – Изменение средних значений коэффициента изрезанности поверхности (U) агрегатов черноземов типичных (Курская область) с увеличением скорости модельного мелководного потока. Обозначения скорости: 0 – контроль до размыва (нет скорости), 1 – минимальная, 2 – средняя, 3 – максимальная. Вертикальные столбцы равны 0,95 доверительных интервалов. Примечание – чернозем – чернозем участка «Косимая степь», ЦЧЗ

При воздействии потока с минимальной скоростью на образцы чернозема косимой степи и среднесмытого пахотного чернозема агрегаты становятся менее изрезанными, чем были до размыва. Однако при увеличении скорости потока до значений $\approx 0,4$ м/с изрезанность агрегатов существенно увеличивается, а затем при дальнейшем увеличении скорости вновь уменьшается до значений, близких к исходным, до размыва. Коэффициент изрезанности поверхности агрегатов несмытого пахотного чернозема при воздействии мелководного потока уменьшается, достигая минимальных

значений при средней скорости потока, а затем увеличивается практически до исходных значений при максимальной скорости. В случае слабосмытого чернозема коэффициент изрезанности поверхности агрегатов с увеличением скорости мелководного потока постепенно увеличивается, принимая максимальные значения при максимальной скорости (рисунок 16).

Таким образом, несмотря на то, что по данным дисперсионного анализа и степень смытости почвы, и скорость размыва ее мелководным потоком оказывают значимое влияние на изменение морфометрических параметров агрегатов, в действительности характер влияния этих факторов гораздо сложнее. В изученном диапазоне скоростей потока (0,3–0,58 м/с) влияние мелководных потоков на морфометрию агрегатов проявляется слабее, чем влияние степени смытости исходной почвы. Это выражается в том, что именно в зависимости от степени смытости почвы по-разному проявляется влияние скорости мелководного потока на морфометрические параметры почвенных агрегатов. Подтверждается это соображение и тем фактом, что *p*-уровень значимости различий по фактору скорости существенно выше, чем по фактору смытости для фактора формы агрегатов и коэффициента изрезанности поверхности, а в случае степени изометричности по фактору скорости вообще не обнаружено значимых различий.

ВЫВОДЫ

Результаты работы позволяют сделать следующие выводы:

1. Агрегатный состав как показатель качества структуры пахотных черноземов типичных различной степени смытости следует оценивать по средневзвешенному диаметру водопрочных агрегатов и коэффициенту структурности. В ряду изученных почв от несмытых до среднесмытых черноземов типичных степень смытости по-разному проявляется в свойствах пахотных горизонтов: а) наиболее низким содержанием гумуса характеризуется среднесмытый чернозем; б) все изученные почвы, подверженные регулярной вспашке, независимо от степени смытости, имеют низкую водоустойчивость агрегатов и среднее значение коэффициента структурности.

2. В результате сельскохозяйственного освоения и водной эрозии заметно ухудшение микроструктуры черноземов типичных, проявляющееся в укрупнении структурных отдельностей почвы, увеличении доли пор-трещин. Также с увеличением степени смытости на микроуровне происходит уменьшение содержания и сокращение разнообразия форм гумуса в тонкодисперсной массе пахотных горизонтов. За счет припахивания переходного горизонта АВ в пахотных горизонтах увеличивается содержание почвенных фрагментов, обогащенных карбонатом кальция.

3. С увеличением скорости водного потока средневзвешенный диаметр транспортируемых агрегатов пахотных черноземов типичных при исходном воздушно-сухом состоянии возрастает очень слабо. При поступлении в русло исходно капиллярно-увлажненной почвы средневзвешенный диаметр влекомых агрегатов заметно увеличивается с возрастанием скорости водного потока. Эти явления связаны с повышением водоустойчивости агрегатов при предварительном увлажнении.

4. Проведена верификация уравнения транспортирующей способности водных потоков малой глубины применительно к чернозему типичному разной

степени смывости. Сопоставление полученных экспериментально и рассчитанных по уравнению значений мутности показало удовлетворительное соответствие – средняя относительная ошибка расчета не превышает 17 %.

5. Фактор формы, степень изометричности, коэффициент шероховатости поверхности агрегатов черноземов типичных разной степени смывости зависят от размеров агрегатов: чем меньше агрегаты, тем более они изометричны, округлы и менее изрезанны, и наоборот. Влияние на морфометрические показатели агрегатов черноземов типичных разной степени смывости оказывает как степень смывости исходной почвы, так и скорость размывающих мелководных потоков. При этом в изученном диапазоне скоростей потока (0,3–0,58 м/с) влияние степени смывости исходной почвы проявляется сильнее, чем влияние мелководных потоков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На примере эродированных черноземов типичных Курской области с применением физического и химического методов было выявлено влияние транспортирующей способности склоновых мелководных потоков разной скорости и степени смывости черноземов на следующие свойства их пахотных горизонтов: коэффициент структурности, водопрочность агрегатов, гумусное состояние, средневзвешенный диаметр агрегатов, влекомых потоками.

Использование микроморфологического метода позволило более подробно изучить качественные признаки ухудшения структуры и гумусного состояния пахотных горизонтов черноземов типичных в результате воздействия эрозионных процессов. При изучении шлифов из монолитов пахотных горизонтов черноземов типичных Курской области было выявлено, что с увеличением степени смывости в пахотных горизонтах возрастает доля ассимилированных окарбонированных агрегатов за счет припахивания нижней части горизонта, переходного к карбонатно-аккумулятивному. Это явление обуславливает повышение водоустойчивости структуры изученных черноземов с увеличением степени смывости.

Успешная верификация уравнения транспортирующей способности водных потоков малой глубины показала перспективы дальнейшего изучения транспортирующей способности мелководных потоков в приложении к другим типам почв, вовлеченным в сельскохозяйственный оборот. Дальнейшие разработки в этой области позволят применять параметр транспортирующей способности при комплексном моделировании эрозионных процессов.

Морфометрическое изучение почвенных агрегатов является перспективным направлением изучения антропогенной трансформации почвы. Применение микроморфометрического метода позволило выявить влияние исходной степени смывости черноземов типичных и воздействия мелководных склоновых потоков в лабораторном эксперименте на морфометрические параметры агрегатов пахотных горизонтов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдулханова Д.Р., Григорьев В.Я. Обобщенные уравнения расхода наносов для оценки размывающей и транспортирующей способности потоков малой глубины // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17: Почвоведение. – 2009. – № 3. – С. 42–47.
2. Абросимов К.Н., Юдина А.В., Фомин Д.С. Изучение микроструктуры агрегата чернозема миграционно-мицеллярного методом неразрушающего контроля // Российский журнал прикладной экологии. – 2019. – № 2. – С. 9–14.
3. Алексеевский Н.И., Чалов Р.С. Движение наносов и русловые процессы. – М.: МГУ. – 1997. – 170 с.
4. Антоненко Д.А., Белюченко И.С., Мельник О.А. Влияние сложного компоста на физико-химические свойства чернозема обыкновенного // Научный журнал КубГАУ. – 2016. – № 121. – С. 1–29. – DOI: 10.21515/1990-4665-121-136
5. Архангельский М.М. О вероятностной схеме движения в придонной области турбулентного потока // Взаимодействие поверхностного и подземного стока. – 1974. – Вып. 2. – С. 121–130.
6. Афанасьева Е.А. Черноземы Среднерусской возвышенности / Под ред. А.А. Роде. – М.: Наука. – 1966. – 228 с.
7. Ахтырцев Б.П., Лепилин И.А. Водно-физические свойства типичных черноземов Среднерусской возвышенности в условиях интенсивного использования // Почвоведение. – 2001. – № 4. – С. 444–454.
8. Барышников Н.Б., Демидова Ю.А., Пагин А.О., Соколов А.Б. Формулы и методы для расчета расходов донных наносов // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2009. – № 11. – С. 16–23.
9. Барышников Н.Б. Динамика русловых потоков. Учебник. – СПб.: изд-во РГГМУ. – 2007. – 314 с.
10. Барышников Н.Б., Попов И.В. Динамика русловых потоков и русловые процессы. – Л.: Гидрометеоиздат. – 1988. – 456 с.

11. Бастраков Г.В., Ларионов Г.А. Эмпирические и полуэмпирические модели эрозии для инженерного обоснования почвозащитных и водоохраных мер // Эрозионные и русловые процессы. Вып. 2. Материалы координационных совещаний вузов 1991–1995 гг. / Под ред. Р.С. Чалова. – М. – 1996. – С. 12–24.
12. Бганцов В.Н., Мосолова А.И., Санжарова С.И., Челобянец С.А. Микроморфологические исследования влияния полимерных препаратов на структурное состояние типичного чернозема // Микроморфология антропогенно измененных почв. – М.: Наука. – 1988. – С. 36–46.
13. Белова А.Н., Балалаев К.А., Яковенко В.Н. Особенности генезиса порового пространства почв лесных биогеоценозов в условиях степного Приднепровья // Грунтознание. – 2006. – Т. 7. – № 1–2. – С. 69–79.
14. Быстрицкая Т.Л., Герасимова М.И. О годовом цикле современного черноземного процесса // Почвоведение. – 1988. – № 6. – С. 5–16.
15. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А., Методы исследования физических свойств почв. – М.: Агропромиздат. – 1986. – 416 с.
16. Великанов М.А. Динамика русловых потоков. – Л.: Гидрометеиздат. – 1949. – 475 с.
17. Великанов М.А. Динамика русловых потоков. Т. II. Наносы и русло. – М.: Гостехиздат. – 1955. – 323 с.
18. Великанов М.А. Перенос взвешенных наносов турбулентным потоком // Изв. АН СССР. Отд. техн. наук. – 1944. – № 3. – С. 189–208.
19. Вялых И.Е. Земельный фонд Курской области и особенности его использования // Рекультивация почв, нарушенных промышленностью. – Воронеж: Центр.-Черн. кн. изд-во. – 1980. – С. 4–8.
20. Галицкая Н.Ф., Галицкий В.И., Капитонов Е., Кочергин П. География Курской области. – Воронеж: Центр.-Черн. кн. изд-во. – 1974. – 136 с.
21. Гендугов В.М., Глазунов Г.П. О единстве механизмов водной и ветровой эрозии почвы // Почвоведение. – 2009. – №5. – С. 598–605.

22. 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.
23. География овражной эрозии / Под ред. Е.Ф. Зориной. – М.: изд-во Моск. ун-та. – 2006. – 324 с.
24. География / Под ред. А.П. Горкина. – М.: РОСМЭН. – 2006. – 623 с.
25. Геологическая карта четвертичных отложений Курской области. Масштаб 1:500 000 / Под ред. Шика С.М. – Мин. природ. рес. РФ, Центр. рег. геол. центр, Межрегион. центр по геол. картогр. – 1998.
26. Герасимова М.И., Губин С.В., Шоба С.А. Микроморфология почв природных зон СССР / Под ред. Г.В. Добровольского. – Пущино: изд-во ПНЦ РАН. – 1992. – 219 с.
27. Гончаров В.Н. Движение наносов в равномерном потоке. – М.–Л.: ОНТИ. – 1938. – 312 с.
28. Гончаров В.Н. Динамика русловых потоков. – Л.: Гидрометеиздат. – 1962. – 374 с.
29. Гончаров В.Н. Основы динамики русловых потоков. – Л.: Гидрометеиздат. – 1954. – 452 с.
30. ГОСТ 26213–91 Почвы. Методы определения органического вещества. – М.: Изд-во стандартов. – 1992. – 8 с.
31. Гостунский А.Н. Взвешивающая способность // Изв. АН УзбССР. – 1954. – № 3. – С. 59–68.
32. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2011 году» // Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. – 356 с. – Электронный ресурс: <http://www.mnr.gov.ru/upload/iblock/a76/gosdoklad2011.pdf>
33. Григорьев В.Я. Модификация модели предельного транспорта наносов потоками малой глубины // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 18. – М. – 2012. – С. 24–41.

34. Гришанин К.В. Динамика русловых потоков. – Л.: Гидрометеиздат. – 2-е издание. – 1979. – 312 с.
35. Дебольский В.К., Котков В.М. Особенности динамики дефицитных форм в поступательных потоках // Метеорология и гидрология. – 1977. – № 10. – С. 67–71.
36. Демидов В.В., Осанина О.О. Закономерности процессов переноса и отложения почвенного материала водными потоками малой глубины // Живые и биокосные системы. – 2015. – № 12. – Электронный ресурс: <https://jbks.ru/archive/issue-12/article-1/>
37. Демидов В.В., Панова И.Г. Шульга П.С., Ильясов Л.О., Ярославов А.А. Противозерозионные свойства чернозема, обработанного полиэлектролитными комплексами на основе гуматов калия // Key concepts of soil physics: development, current applications and future prospects. IOP conferencia Series: rscience. – 2019. – С. 503–507.
38. Добровольский Г.В., Куст Г.С. Основные пути и методы прогноза эволюции почв под влиянием глобальных изменений климата // Вестн. Моск. ун-та. Серия 17: Почвоведение. – 2007. – № 3. – С. 3–14.
39. 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.
40. Дроздов К.А. Распространение овражной эрозии на территории Центральных черноземных областей // Науч. записки Воронеж. отд-ния географии СССР. – Воронеж. – 1965. – С. 64–71.
41. Дубовик Е.В. Взаимосвязь гумусного и структурного состояния в эродированных черноземах склоновых агроландшафтах ЦЧР / Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. – М. – 2017. – 48 с.
42. Дубовик Е.В. Влияние агрогенных факторов на агрофизические показатели чернозема типичного при бессменном возделывании культур // Интенсификация, ресурсосбережение и охрана почв в адаптивно–ландшафтных системах земледелия. Международная научно–практическая конференция ГНУ

ВНИИЗиЗПЭ. – Курск: Курский ЦНТИ-филиал ФГУ Объединение «Росинформресурс». – 2008. – С. 476–479.

43. Дубовик Е.В. Влияние дождевания на макроструктуру чернозема типичного // Почвоведение. – 2012. – № 3. – С. 350–355.

44. Дубовик Е.В., Дубовик Д.В. Взаимосвязь содержания углерода органических соединений и структурного состояния чернозема типичного // Почвоведение. – 2019. – № 2. – С. 171–183. – DOI: .1134/S0032180X19020047

45. Дубовик Е.В. Изменение структурно-агрегатного состояния чернозема типичного при дождевании // Достижения науки и техники АПК. – 2010. – № 1. – С. 39-41.

46. Евдокимова Т.И., Тишкина Э.В. Изменения свойств чернозема типичного под влиянием сельскохозяйственного использования // Почвоведение. – 1999. – № 5. – С. 652–660.

47. Егиазаров И.В. Расход влекомых потоком наносов // Изв. АН АрмССР. – 1949. – № 5. – С. 321–328.

48. Железняков Г.В. Гидрологические и гидравлические аспекты проблемы взаимодействия потоков основного русла и поймы // Труды V Всесоюзного гидрол. съезда. – 1988. – Т. 10. – Кн. 2. – С. 203–209.

49. Замарин Е.А. Транспортирующая способность и допускаемые скорости течения в каналах. – М.–Л.: Госстройиздат. – 1951. – 84 с.

50. Знаменская Н.С. Гидравлическое моделирование русловых процессов. – Л.: Гидрометеиздат. – 1992. – 240 с.

51. Калуцкова Н.Н. Курская область // Большая российская энциклопедия. – М. – 2010. – Т. 16. – С. 435–437.

52. Карасев И.Ф. Морфометрические инварианты русловых потоков // Труды Акад. водохоз. наук. – 1995. – Вып. 1. – С. 26–39.

53. Карасев И.Ф. Русловые процессы при переброске стока. – Л.: Гидрометеиздат. – 1975. – 288 с.

54. Караушев А.В. Общие и некоторые частные вопросы теории русловых процессов и склоновой эрозии // Труды ГГИ. – 1972. – Вып. 191. – С. 5–22.
55. Караушев А.В. Проблемы динамики естественных водных потоков. – Л.: Гидрометеиздат. – 1960. – 392 с.
56. Караушев А.В. Пути изучения речных наносов // Труды ГГИ. – 1963. – Вып. 100. – С. 3–25.
57. Караушев А.В. Теория и методы расчета речных наносов. – Л.: Гидрометеиздат. – 1977. – 272 с.
58. Караушев А.В. Транспорт наносов в открытых потоках // Труды ГГИ. – 1951. – Вып. 28 (82). – С. 78–122.
59. Каштанов А.Н., Извеков А.С., Рожков В.А., Кузнецова И.В., Сорокина Н.П., Щепотьев В.Н., Мамаева Г.Г., Черкасов Г.Н., Масютенко Н.П., Бахирев Г.И., Сухановский Ю.П., Здоровцов И.П., Пыхтин И.Г., Акименко А.С., Кузнецов М.С., Шабает А.И., Лашкин В.М., Немцев С.Н. Теоретические и методические основы предотвращения водной эрозии почв // Научные основы предотвращения деградации почв (земель) сельскохозяйственных угодий России и формирования систем воспроизводства их плодородия в адаптивно-ландшафтном земледелии: Т. 1. Теоретические и методические основы предотвращения деградации почв (земель) сельскохозяйственных угодий. Коллективная монография // М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева Россельхозакадемии. – 2013. – С. 213–301.
60. Керженцев А.С., Майснер Р., Демидов В.В., Оллеш Г., Сухановский Ю.П., Волокитин М.П., Кистнер И., Коломийцев Н.В., Роде М., Сон Б.К., Быховец С.С., Демин Д.В., Пискунов А.Н., Ильина Т.А., Киселева О.Е. Моделирование эрозионных процессов на территории малого водосборного бассейна. – М.: Наука. – 2006. – 224 с.
61. Классификация и диагностика почв России / Л.Л. Шишов, В.Д. Тонконогов, И.И. Лебедева, М.И. Герасимова. – Смоленск: Ойкумена. – 2004. – 342 с.

62. Классификация и диагностика почв СССР / В.В. Егоров, В.М. Фридланд, Е.Н. Иванова, Н.Н. Розов, В.А. Носин, Т.А. Фриев. – М.: Колос. – 1977. – 223 с.
63. Когут Б.М., Сысуев С.А., Холодов В.А. Водопрочность и лабильные гумусовые вещества типичного чернозема при разном землепользовании // Почвоведение. – 2012. – № 5. – С. 555–561.
64. Кондратьев А.Н. Двухфакторная классификация русловых процессов равнинных рек на основе относительной транспортирующей способности потока // Автореф. дисс. ... канд. геогр. наук. – СПб. – 2008. – 17 с.
65. Копалиани З.Д., Костюченко А.А. Расчёты расхода донных наносов в реках / Сб. работ по гидрологии. – СПб.: Гидрометеиздат. – 2004. – № 27. – С. 25–40.
66. Королев В.А., Громовик А.И., Боронтов О.К. Изменение основных показателей плодородия чернозема выщелоченного при разных способах основной обработки // Почвоведение. – 2016. – № 1. – С. 107–114. – DOI 10.7868/S0032180X16010093
67. Королюк Т.В. Почвенная интерпретация космических изображений в системе методов ЦПК // Цифровая почвенная картография: теоретические и экспериментальные исследования. – М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева. – 2012. – С. 125–140.
68. Крупеников И.А. Черноземы (возникновение, совершенство, трагедия деградации, пути охраны и возрождения). – М.: Pontos. – 2008. – 290 с.
69. Кузнецов М.С., Глазунов Г.П., Зорина Е.Ф. Физические основы эрозии почв. – М.: изд-во Моск. ун-та. – 1992. – 95 с.
70. Кузнецов М.С., Глазунов Г.П. Эрозия и охрана почв: Учебник. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: изд-во МГУ, изд-во «КолосС». – 2004. – 352 с.
71. Кузнецов М.С., Демидов В.В., Окулик Е.В. Глобальные изменения климата и их влияние на процессы водной эрозии почв // Интенсификация, ресурсосбережение и охрана почв в адаптивно-ландшафтных системах земледелия. Международная научно–практическая конференция ГНУ

ВНИИЗиЗПЭ. – Сборник докладов. – Курск: Курский ЦНТИ-филиал ФГУ Объединение «Росинформресурс». – 2008. – С. 539–544.

72. Кузнецов М.С. Противоэрозионная стойкость почв. – М.: изд-во МГУ. – 1981. – 135 с.

73. Кузнецова И.В. Агрофизическая характеристика типичных мощных черноземов Курской области // Агрофизическая характеристика почв степной и сухостепной зон Европейской части СССР. – М.: Колос. – 1977. – С. 38–52.

74. Курская область. – Воронеж: Центр.-Черн. кн. изд-во. – 1966. – 480 с.

75. Куст П.Г., Лебедев М.А., Лебедева М.П., Романис Т.В., Плотникова О.О. Способ изготовления плоскопараллельных почвенных шлифов / Патент на изобретение, рег. № 2728926 от 03.08.2020. – М.: ФИПС. – 2020.

76. Кухарук Н.С., Чендев Ю.Г., Петин А.Н. Микроморфологические особенности органического вещества при агрогенной трансформации почв лесостепной зоны // Научные ведомости БелГУ. Серия: Естественные науки. – 2011. – № 15 (110). – Вып. 16. – С. 168–179.

77. 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. – DOI: 10.7868/S0032180X18030097

78. Ларионов Г.А., Бушуева О.Г., Добровольская Н.Г., Кирюхина З.П., Краснов С.Ф., Литвин Л.Ф. Влияние силы тяжести на размыв модельных образцов почвы // Почвоведение. – 2015. – № 7. – С. 872–876. – DOI: 10.7868/S0032180X15070072

79. 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. – DOI: 10.7868/S0032180X14070107

80. 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.

81. Ларионов Г.А., Бушуева О.Г., Добровольская Н.Г., Кирюхина З.П., Литвин Л.Ф., Максимова И.А. Разрушение почвенных агрегатов в склоновых потоках // Почвоведение. – 2007. – № 10. – С. 1263–1269.

82. Ларионов Г.А., Горобец А.В., Добровольская Н.Г., Кирюхина З.П., Краснов С.Ф., Литвин Л.Ф. Эродируемость модельной почвы в широком диапазоне скоростей водного потока // Почвоведение. – 2019. – № 10. – С. 1278–1282. – DOI: 10.1134/S0032180X19090041

83. Ларионов Г.А., Добровольская Н.Г., Кирюхина З.П., Краснов С.Ф., Литвин Л.Ф. Эродирующая и транспортирующая способность мелководных потоков // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 12. – М. – 2000. – С. 8–28.

84. 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. – С. 354–359. – DOI: 10.7868/S0032180X17010099

85. Ларионов Г.А., Добровольская Н.Г., Кирюхина З.П., Литвин Л.Ф. Влияние наносов на эродирующую способность мелководных потоков // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 14. – М. – 2004. – С. 34–44.

86. Ларионов Г.А., Добровольская Н.Г., Кирюхина З.П., Литвин Л.Ф. Влияние твердости донных наносов ложа потока на его эрозионную способность // Почвоведение. – 2005. – № 4. – С. 494–498.

87. Ларионов Г.А., Краснов С.Ф. Вероятностная модель размыва почв и связных грунтов // Почвоведение. – 2000. – № 2. – С. 235–242.

88. Ларионов Г.А., Краснов С.Ф. Гидрофизическая концепция эрозии почв // Почвоведение. – 1997. – № 5. – С. 616–624.

89. Ларионов Г.А., Краснов С.Ф. Гидрофизическая модель эрозии и возможности ее реализации // Экологические проблемы эрозии почв и русловых процессов. – М.: изд-во МГУ. – 1992. – С. 5–15.
90. Ларионов Г.А., Краснов С.Ф., Добровольская Н.Г., Кирюхина З.П., Литвин Л.Ф., Бушуева О.Г. Уравнение транспорта наносов для склоновых потоков // Почвоведение. – 2006. – № 8. – С. 965–976.
91. Леви И.И. Динамика русловых потоков. – Л.–М.: Госэнергоиздат. – 1948. – 222 с.
92. Леви И.И. Инженерная гидрология. – М.: Высшая школа. – 1968. – 238 с.
93. Лелявский С. Введение в речную гидравлику. Пер. с англ. – Л.: Гидрометеиздат. – 1961. – 230 с.
94. Маккавеев В.М. Вопросы теории турбулентности и движения наносов // Труды ГГИ. – 1963. – Вып. 100. – С. 54–87.
95. Маккавеев В.М., Коновалов И.М. Гидравлика. – Л.: Речиздат. – 1940. – 643 с.
96. Мамонтов В.Г., Когут Б.М., Родионова Л.П., Рыжков О.В. Влияние сельскохозяйственного использования чернозема типичного на его структурное состояние и содержание органического углерода в агрегатах разного размера // Известия ТСХА. – 2016. – Вып. 6. – С. 22–31.
97. Марголина Н.Я. Александровский А.Л., Ильичев Б.А., Черкинский А.Е., Чичагова О.А. Возраст и эволюция черноземов / Под ред. В.О. Таргульяна. – М.: Наука. – 1988. – 145 с.
98. Масютенко Н.П., Глазунов Г.П., Кузнецов А.В., Масютенко М.Н. Система показателей агроэкологической оценки эродированных черноземов // Достижения науки и техники АПК. – 2016. – Т. 30. – № 11. – С. 7–11.
99. Масютенко Н.П., Глазунов Г.П., Санжаров А.И., Кузнецов А.В., Афонченко Н.В., Олещицкий В.В. Влияние степени эродированности на показатели экологического состояния черноземных почв // Достижения науки и техники АПК. – 2015. – Т. 29. – № 8. – С. 19–23.

100. Медведев В.В. Временная и пространственная гетерогенизация распахиваемых почв // Грунтознавство. – 2013. – Т. 14. – № 1–2. – С. 5–22.
101. Медведев В.В. Некоторые изменения физических свойств черноземов при обработке // Почвоведение. – 1979. – № 1. – С. 79–87.
102. Медведев В.В. Состав и строение макро– и микроагрегатов некоторых почв Украины // Почва, плодородие, урожай. – Минск. – 1968. – С. 323–327.
103. Мирцхулава Ц.Е. Инженерные методы расчета и прогноз водной эрозии. – М.: Колос. – 1970. – 239 с.
104. Михайлова Н.А. Перенос твёрдых частиц турбулентными потоками воды. – Л.: Гидрометеиздат. – 1966. – 234 с.
105. Муха В.Д. Агрогенная трансформация чернозема типичного и серой лесной почвы лесостепи // Аграрная наука. – 2009. – № 8. – С. 15–17.
106. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Части 1-6. Выпуск 28. Калужская, Тульская, Тамбовская, Брянская, Липецкая, Орловская, Курская, Воронежская, Белгородская области / Под ред. О.О. Штанниковой. – Л.: Ленинградская типография № 4 ордена Трудового Красного Знамени Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой Государственного комитета СССРП по печати. – 1990. – 356 с.
107. Национальный атлас почв Российской Федерации. – М.: Астрель. – 2011. – 632 с.
108. Никитин Я.А. Определение расхода донных наносов на реках Средней Азии // Гидротехника и мелиорация. – 1951. – № 10. – С. 17–21.
109. Парфенова Е.И., Ярилова Е.А. Руководство к микроморфологическим исследованиям в почвоведении. – М.: Наука. – 1977. – 198 с.
110. Плотникова О.О., Демидов В.В., Лебедева М.П. Действие мелководных потоков на поверхностные горизонты чернозема типичного

различной степени смытости // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. – 2018. – № 91. – С. 85–109. – DOI: 10.19047/0136-1694-2018-91-85-109

111. Плотникова О.О., Лебедева М.П., Демидов В.В., Карпова Д.В. Сравнение микроморфометрических показателей агрегатов несмытого и среднесмытого пахотного чернозема типичного в лабораторном эрозионном эксперименте // Почвоведение. – 2019. – № 10. – С. 1225–1233. – DOI: 10.1134/S0032180X19100095

112. Подобед Е.А. .Ландшафтно-экологическое состояние территории Курской области / Автореф. дис. ... канд. геогр. наук.. – Воронеж. – 2013. – 24 с.

113. Поздняков Ш.Р., Романовский В.В. Исследование и расчёт расхода влекомых наносов горных рек // Труды V Всесоюзного гидрол. съезда. – Л.: Гидрометеиздат. – 1988. – Т. 10. – Кн. 2. – С. 54–61.

114. Польский М.Н. О некоторых новых путях изучения порозности и структуры почвы // Почвоведение. – 1955. – № 5. – С. 29–43.

115. Поляков А.Н. Микроморфологическое и морфометрическое исследование южных черноземов европейской части СССР // Биологические науки. – 1979. – № 3 (183). – С. 76–85.

116. Поляков А.Н. Микроморфологическое исследование кальцита в черноземах европейской части СССР // Почвоведение. – 1989. – № 2. – С. 79–86.

117. Поляков А.Н. Микроморфология черноземов европейской части СССР / Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. – М. – 1984. – 42 с.

118. Поляков А.Н. Микроморфология черноземов Заволжско–Предуральской лесостепи // Биологические науки. – 1981. – № 5 (209). – С. 90–97.

119. Поляков А.Н. Микроморфология черноземов правобережной лесостепи Украинской ССР // Почвоведение. – 1980. – № 9. – С. 98–109.

120. Поляков А.Н. Опыт использования статистического анализа при микроморфометрическом исследовании почв // Научн. докл. Высшей школы. Биологические науки. – 1975. – № 9. – С. 139–144.

121. Поляков А.Н., Ярилова Е.А., Кизяков Ю.Е. Микроморфологическое исследование и морфометрия карбонатных черноземов Предкавказья // Почвоведение. – 1972. – № 11. – С. 91–100.

122. 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.

123. Поляков А.Н., Ярилова Е.А.. Основные черты микросложения черноземов Центрально-Черноземных областей // Почвоведение. – 1978. – № 5. – С. 99–109.

124. Початкова Т.Н. Состав и свойства почвенных агрегатов в зависимости от их размеров / Автореф. дис. ... канд. биол. наук. – М. – 1985. – 24 с.

125. Практикум по агрохимии. Учеб. пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. / Под ред. В.Г. Минеева. – М.: изд-во МГУ. – 2001. – 689 с.

126. Разумихина К.В. Вопросы применимости методов расчета транспорта наносов к речным потокам // Труды ГГИ. – 1966. – Вып. 132. – С. 18–45.

127. Романовский В.В., Дебольский В.К. Транспорт наносов в реках // Труды V Всесоюзного гидрол. съезда. – 1988. – Т. 10. – Кн. 2. – С. 4–12.

128. Россинский К.И. Движение донных наносов // Труды ГГИ. – 1968. – Вып. 160. – С. 102–139.

129. Россинский К.И., Дебольский В.К. Речные наносы. – М.: Наука. – 1980. – 216 с.

130. Россинский К.И., Любомирова К.С. Скачкообразное движение речных наносов // Динамика и термика речных потоков. – М.: Наука. – 1972. – С. 50–62.

131. Русский чернозем – 100 лет после Докучаева / Под ред. В.А. Ковды, Е.М. Самойловой. – М.: Наука. – 1983. – 309 с.

132. Самойлова Е.М., Сизов А.П., Яковченко В.П. Органическое вещество почв Черноземной зоны / Под ред. В.А. Ковды. – К.: Наукова думка. – 1990. – 119 с.

133. 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.

134. 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.

135. Симакова М.С. От визуального дешифрирования аэрофотоснимков и полевого картографирования почв до автоматизированного дешифрирования и картографирования по космическим снимкам // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. – 2014. – № 74. – С. 3–19. – DOI: 10.19047/0136–1694–2014–74–3–19

136. Скворцова Е.Б., Морозов Д.Р. Варьирование микроморфометрических показателей порового пространства в пахотном типичном черноземе // Почвоведение. – 1995. – № 12. – С. 1469–1478.

137. Скворцова Е.Б., Морозов Д.Р. Микроморфометрическая классификация и диагностика строения порового пространства почвы // Почвоведение. – 1993. – № 6. – С. 49–56.

138. Скворцова Е.Б., Санжарова С.И. Микроморфометрические особенности порового пространства в пахотных горизонтах суглинистых почв // Почвоведение. – 2007. – № 4. – С. 487–497.

139. Скворцова Е.Б. Строение порового пространства естественных и антропогенноизмененных почв / Автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. – М. – 1999. – 44 с.

140. Скворцова Е.Б., Шеин Е.В., Абросимов К.Н., Романенко К.А., Юдина А.В., Ключева В.В., Хайдапова Д.Д., Рогов В.В. Влияние многократного замораживания – оттаивания на микроструктуру агрегатов дерново-подзолистой почвы (микротомографический анализ) // Почвоведение. – 2018. – № 2. – С. 187–196. – DOI: 10.7868/S0032180X18020065
141. Сорокина Н.П., Когут Б.М. Динамика содержания гумуса в пахотных черноземах и подходы к ее изучению // Почвоведение. – 1997. – № 2. – С. 178–184.
142. Сток наносов, его изучение и географическое распределение / Под ред. А.В. Караушева. – Л.: Гидрометеиздат. – 1977. – 240 с.
143. Ступс Ж. Влияние работ В. Кубиены на развитие микроморфологии почв. К 70-летию публикации книги «Микрopedология» // Почвоведение. – 2009. – № 6. – С. 744–749.
144. Танасиенко А.А. Гумус выщелоченных черноземов и его изменение под воздействием эрозии // Почвоведение. – 1983. – № 4. – С. 116–125.
145. Тишкина Э.В., Иванова Н.Н. Почвенный покров распаханых и целинных прибалочных склонов (Курская область) // Вестн. Моск. ун-та. Серия 5: География. – 2010. – № 6. – С. 73–79.
146. Толковый словарь по почвоведению / Под ред. А.А. Роде. – М.: Наука. – 1975. – 286 с.
147. Турсина Т.В. Микроморфологическая диагностика устойчивости черноземов при орошении // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. – 2014. – № 76. – С. 52–73. – DOI: 10.19047/0136-1694-2014-76-52-73
148. Турсина Т.В. Микростроение орошаемых черноземов // Плодородие черноземов в связи с интенсификацией их использования. – М.: Наука. – 1990. – С. 228–234.
149. Факторович М.Э. Схематизация процессов руслоформирования и развитие методики расчета русловых трансформаций // Движение наносов в открытых руслах. – М.: Наука. – 1970. – С. 32–37.

150. Феофарова И.И. Микроморфологическая характеристика такыров // Такыры Западной Туркмении и пути их сельскохозяйственного освоения. – М. – 1956. – С. 351–380.
151. Хитров Н.Б., Чечуева О.А. Влияние распашки и орошения на макроструктуру черноземов // Почвоведение. – 1994. – № 6. – С. 106–114.
152. Чалов Р.С. Русловые процессы (русловедение). – М.: ИНФРА-М. – 2016. – 565 с. – DOI: 10.12737/XXXXXX.
153. Чекулаев Г.С. О показателях устойчивости русел каналов оросительных систем // Вопросы гидротехники. – 1955. – Вып. 1. – С. 61–75.
154. Чжуан Я., Хартеминк А.Е., Хуан Ц. Количественная характеристика фракций крупнозема из почвенных образцов с использованием цифровых фотоснимков // Почвоведение. – 2019. – № 8. – С. 956–965. – DOI: 10.1134/S0032180X19080173
155. 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. – № 65. – С. 36–47.
156. Чуян О.Г., Дубовик Д.В., Масютенко Н.П., Лазарев В.И. Научно-практические рекомендации по известкованию почв в Курской области. – Курск: ФГБНУ «Курский федеральный аграрный научный центр», Комитет АПК Курской области. – 2019. – 30 с.
157. Шеин Е.В. Курс физики почв. – М.: изд-во Моск. ун-та. – 2005. – 432 с.
158. Шульга П.С. Изменение свойств черноземов оподзоленных и выщелоченных Среднерусской возвышенности при сельскохозяйственном использовании / Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. – Курск. – 2004. – 18 с.
159. Щеглов Д.И. Черноземы центра Русской равнины и их эволюция под влиянием естественных и антропогенных факторов. – М.: Наука. – 1999. – 211 с.

160. Щербаков А.П., Аbruкова В.В., Букреев Д.А. Агроэкологическое состояние черноземов ЦЧО. – Курск. – 1996. – 327 с.
161. Ярилова Е.А. Микроморфология черноземов // Черноземы СССР. – М.: Колос. – 1974. – Т. 1. – С. 156–173.
162. Ярилова Е.А., Самойлова Е.М., Поляков А.Н., Макеева В.И. Микроморфология черноземов Русской равнины // Микроморфологическая диагностика почв и почвообразовательных процессов. – М.: Наука. – 1983. – С. 130–139.
163. Abrahams A.D., Li G., Krishnan C., Atkinson J.F. A sediment transport equation for interrill overland flow on rough surfaces // *Earth Surf. Process. Landf.* – 2001. – V. 26. – № 13. – P. 1443–1459. – DOI: 10.1002/esp.286
164. Al-Durrah M.M., Bradford J.M. The mechanism of raindrop splash on soil surfaces // *Soil. Sci. Soc. Am. J.* – 1982. – V. 46. – P. 1086–1090.
165. Ali M., Seeger M., Sterk G., Moore D. A unit stream power based sediment transport function for overland flow // *Catena.* – 2013. – V. 101. – P. 197–204. – DOI: 10.1016/j.catena.2012.09.006
166. Amada S., Imagawa K., Aoki S. Splat profile of impinging droplets on rough substrates: influence of surface roughness // *Surf. Coat. Technol.* – 2002. – V. 154. – P. 27–33.
167. Angulo K., Gil D., Espitia H. Method for edges detection in digital images through the use of cellular automata // *Advances in Intelligent Systems and Computing book series.* – 2020. – V. 1078. – P. 3–21. – DOI: 10.1007/978-3-030-33614-1_1
168. Asmussen P., Conrad O., Günther A., Kirsch M., Riller U. Semi-automatic segmentation of petrographic thin section images using a “seeded-region growing algorithm” with an application to characterize weathered subarkose sandstone // *Comput. Geosci.* – 2015. – V. 83. – P. 89–99. – DOI: 10.1016/j.cageo.2015.05.001
169. Bagnold R.A. An approach to the sediment transport problem from general physics // *Geol. Surv. Prof. Paper.* – 1966. – V. 422-1. – 37 p.

170. Bagnold R.A. Sediment transport by wind and water // *Nord. Hydrol.* – 1979. – V. 10. – P. 309–322.
171. Beasley D.B. ANSWERS: a mathematical model for simulating the effects of land use and management on water quality / Ph.D. Thesis. – Purdue University, West Lafayette, IN. – 1977. – 266 p.
172. Benjamini Y., Yekutieli D. The control of the false discovery rate in multiple testing under dependency // *Annals of Statistics.* – 2001. – V. 29. – № 4. – P. 1165–1188.
173. Bovi R.C., Boschi R.S., de Carvalho C.C., Cooper M. Analysis of the soil sand fraction and recent sediments deposits: an approach based on two-dimensional image analysis // *Soil Sci.* – 2016. – V. 181. – Iss. 11–12. – P. 513–519. – DOI: 10.1097/SS.000000000000184
174. Bradford J.M., Ferris J.E., Remley P.A. Interrill soil erosion processes: II. Relationship of splash detachment to soil properties // *Soil Sci. Soc. Am. J.* – 1987. – V. 51. – P. 1571–1575.
175. Bradford J.M., Foster G.R. Interrill Soil Erosion and Slope Steepness Factors // *Soil Sci. Soc. Am. J.* – 1996. – V. 60. – P. 909–915. – DOI: 10.2136/sssaj1996.03615995006000030033
176. Bridge J.S., Dominic D.F. Bed load grain velocities and sediment transport rates // *Water Resour. Res.* – 1984. – V. 20. – № 4. – P. 476–490.
177. Bryk M. Macrostructure of diagnostic B horizons relative to underlying BC and C horizons in Podzols, Luvisol, Cambisol, and Arenosol evaluated by image analysis // *Geoderma.* – 2016. – V. 263. – P. 86–103. – DOI: 10.1016/j.geoderma.2015.09.014
178. Ciarkowska K., Hanus-Fajerska E. Microstructures and selected properties of reclaimed zinc and lead post-flotation wastes and soil of adjacent natural ecosystem // *Gruntoznavstvo.* – 2007. – V. 8. – № 1–2. – P. 25–32.
179. Culling W.E. H. Theory of erosion on soil-covered slopes // *J. Geol.* – 1965. – V. 73. – № 2. – P. 230–254.

180. Danel P., Durand R., Condolions E. Introduction to the study of saltation // *La Houille Blanche*. – 1953. – V. 8. – № 6. – P. 815–829.
181. De Baets S., Poesen J., Gyssels G., Knapen A.. Effects of grass roots on the erodibility of topsoils during concentrated flow // *Geomorphology*. – 2006. – V. 76. – № 1–2. – P. 54–67.
182. Defersha M.B., Melesse A.M. Effect of rainfall intensity, slope and antecedent moisture content on sediment concentration and sediment enrichment ratio // *Catena*. – 2012. – V. 90. – P. 47–52. – DOI: 10.1016/j.catena.2011.11.002
183. De Roo P.J., Offermans R.J.E., Cremers N.H.D.T. A single-event physically-based hydrological and soil erosion model for drainage basins. II: sensitivity analysis, validation and application // *Hydrol. Process*. – 1996. – V. 10. – № 8. – P. 1119–1126.
184. Einstein H.A. Formulas for the transportation of bed load // *Trans. ASAE*. – 1942. – V. 107. – P. 575–577.
185. Ellison W.D. Studies of Raindrop Erosion // *Agricultural engineering*. – 1944. – V. 25. – P. 131–181.
186. Ferrari G.A., Pagliai M. Micromorphometry and micromorphology of a clay soil sample treated with a ferric conditioner // *Zeitschrift Für Pflanzenernährung Und Bodenkunde*. – 1980. – V. 143. – №. 3. – P. 283–297. – DOI: 10.1002/jpln.19801430306
187. Finkner S.C., Nearing M.A., Foster G.R., Gilley J.E. A simplified equation for modeling sediment transport capacity // *Trans. ASAE*. – 1989. – V. 32. – № 5. – P. 1545–1550.
188. Flanagan D.C., Ascough II. J.C., Nearing M.A., Laflen J.M. The Water Erosion Prediction Project (WEPP) Model // *Landscape Erosion and Evolution Modeling (Chapter 7)*. – Eds. R.S. Harmon, W.W. Doe. – New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers. – 2001. – P. 145–199.
189. Flanagan D.C., Gilley J.E., Franti T.G. Water Erosion Prediction Project (WEPP): development history, model capabilities, and future enhancements // *Trans. ASABE*. – 2007. – V. 50. – № 5. – P. 1603–1612.

190. Fogle A.W., Barfield B.J. Channel, a model of channel erosion by shear, scour and channel headwall propagation: Part 1. Model development // *KWRRI Res. Reports*. 22. – 1992. – 92 p.
191. Fortier S., Scobey F.G. Permissible canal velocities // *Trans. ASAE*. – 1926. – V. 89. – P. 940–984.
192. Foster G.R., Meyer L.D. A closed form soil erosion equation for upland areas // *Sedimentation*. – Ed. H.W. Shen. – Fort Collins: Colorado State Univ. – 1972. – P. 12–19.
193. Free G.R. Erosion characteristics of rainfall // *Agricultural Engineering*. – 1960. – V. 41. – P. 447–449.
194. Gantzer C.J., Buyanovsky G.A., Alberts E.E., Remley P.A. Effects of soybean and corn residue decomposition on soil strength and splash detachment // *Soil Sci. Soc. Am. J.* – 1987. – V. 51. – P. 202–206.
195. Gerasimova M.I., Bronnikova M.A., Khitrov N.B., Shorkunov I.G. Hierarchical morphogenetic analysis of Kursk chernozem // *Dokuchaev Soil Bulletin*. – 2016. – V. 86. – P. 64–76. – DOI: 10.19047/0136–1694–2016–86–64–76
196. Gilbert G.K. The transportation of debris by running water // *US Geological survey Prof. Paper*. 86 – 1914. – P. 263.
197. Gorbov S.N., Bezuglova O.S., Abrosimov K.N., Skvortsova E.B., Tagiverdiev S.S., Morozov I.V. Physical properties of soils in Rostov agglomeration // *Eurasian Soil Sci.* – 2016. – V. 49. – P. 898–907. – DOI: 10.1134/S106422931606003X
198. Govers G. Empirical relationships for the transport capacity of overland flow // *Erosion, transport and deposition processes*. – IAHS 139. – 1990. – P. 45–63 (Pit–9L).
199. Govers G. Evaluation of transporting capacity formulae for overland flow // *Overland Flow Hydraulics and Erosion Mechanics*. – Eds. A.J. Parsons, A.D. Abrahams. – London: University College London Press. – 1992. – P. 243–273.
200. Govers G., Everaert W., Poesen J., Rauws G., De Ploey J., Lautridou J.P. A long flume study of the dynamic factors affecting the resistance of a loamy soil to

concentrated flow erosion // *Earth Surf. Process. Landf.* – 1990. – V. 15. – P. 313–328.

201. Govers G. Selectivity and transport capacity of thin flows in relation to rill erosion // *Catena.* – 1985. – V. 12. – P. 35–49.

202. Hairsine P.B., Rose C. W. Modelling water erosion due to overland flow using physical principles 1. Sheet flow// *Water Resour. Res.* – 1992. – V. 28. – № 1. – P. 237–243.

203. Herbertson J. Scaling procedures for mobile bed hydraulic models in terms of similitude theory // *J. of Hydraul. Res.* – 1968. – V. 7. – P. 315–353.

204. IPCC, 2019: Summary for Policymakers // *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems.* – Eds. P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson–Delmotte, H.– O. Pörtner, D.C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley. – In press. – Электронный ресурс: <https://www.ipcc.ch/srccl/chapter/summary-for-policymakers/>

205. Ivanov A.L., Shein E.V., Skvortsova E.B. Tomography of soil pores: from morphological characteristics to structural–functional assessment of pore space // *Eurasian Soil Sci.* – 2019. – V. 52. – № 1. – P. 50–57. – DOI: 10.1134/S106422931901006X

206. Jeffreys H. On the transport of sediment by streams // *Proc. Camb. Phil. Soc.* – 1929. – V. 25. – P. 272–276.

207. Kraemer F.B., Morras H.J.M. Macroporosity of a Typic Argiudoll with different cropping intensity under no-tillage // *Spanish J. of Soil Sci.* – 2018. – V. 8. – № 2. – P. 214–235. – DOI: 10.3232/SJSS.2018.V8.N2.06

208. Kubiëna W. (Ed.) *Die Mikromorphometrische Bodenanalyse.* – Stuttgart: Ferd. Enke Verlag. – 1967. – 188 p.

209. Laflen J.M., Flanagan D.C., Engel B.A. Soil erosion and sediment yield prediction accuracy using WEPP // *J. of the Am. Water Resour. Assoc.* – 2004. – V. 40. – № 2. – P. 289–297.
210. Lee H.-Y., Lin Y.-T., Yunyou J., Wenwang H. On three-dimensional continuous saltating process of sediment particles near the channel bed // *J. of Hydraul. Res.* – 2006. – V. 44. – Iss. 3. – P. 374–389. – DOI: 10.1080/00221686.2006.9521689
211. Li G., Abrahams A.D. Controls of sediment transport capacity in laminar interrill flow on stone-covered surfaces // *Water Resour. Res.* – 1999. – V. 35. – № 1. – P. 305–310.
212. Li G., Abrahams A.D. Effect of saltating sediment load on the determination of the mean velocity of overland flow // *Water Resour. Res.* – 1997. – V. 33. – P. 341–347.
213. Li W., Li D., Wang X. An approach to estimating sediment transport capacity of overland flow // *Sci. China Technol. Sci.* – 2011. – V. 54. – № 10. – P. 2649–2656. – DOI: 10.1007/s11431-011-4506-x
214. Low H.S. Effect of sediment density on bedload transport // *J. Hydraul. Eng.* – 1989. – V. 115. – № 1. – P.124–138.
215. Luna L., Vignozzi N., Miralles I., Sole-Benet A. Organic amendments and mulches modify soil porosity and infiltration in semiarid mine soils // *Land Degrad. Dev.* – 2018. – V. 29. – №. 4. – P. 1019–1030. – DOI: 10.1002/ldr.2830
216. Mahmoodabadi M., Ghadiri H., Rose C., Yu B., Rafani H., Rouhipour H. Evaluation of GUEST and WEPP with a new approach for the determination of sediment transport capacity // *J. Hydrol.* – 2014. – V. 513. – P. 413–421. – DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.03.060
217. Marcelino V., Cnudde V., Vansteelandt S., Carò F. An evaluation of 2D-image analysis techniques for measuring soil microporosity // *Europ. J. of Soil Sci.* – 2007. – V. 58. – P. 133–140. – DOI: 10.1111/j.1365-2389.2006.00819.x

218. Mermut A.R., Arnaud R.J.St. Micromorphology of some Soils with Grumic Properties of Saskatchewan, Canada // *Soil Sci. Soc. Am. J.* – 1983. – V. 47. – P. 536–541.
219. Mermut A.R., Norton L.D. Preface // *Geoderma*. – 1992. – V. 53. – Iss. 3–4. – P. iii–iv. – DOI: 10.1016/0016–7061(92)90053–A
220. Merten M.A., Nearing G.R., Borges A.L.O. Effect of sediment load on soil detachment and deposition in rills // *Soil Sci. Soc. Am. J.* – 2001. – V. 65. – № 3. – P. 861–868. DOI: 10.2136/sssaj2001.653861x
221. Meyer-Peter E., Müller R. Formulas for bed load transport // *Internat. Assoc. Hydraul. Structures Res.* – Stockholm. – 1948. – App. 2. – P. 1–26.
222. Miedema R., Slager S. Micromorphological quantification of clay illuviation // *J. of Soil Sci.* – 1972. – V. 23. – № 3. – P. 309–314.
223. Misra R.K., Rose C.W. Application and sensitivity analysis of process-based erosion model GUEST // *Eur. J. Soil Sci.* – 1996. – V. 47. – № 4. – P. 593–604.
224. Morgan R.P.C., Quinton J.N., Smith R.E., Govers G., Poesen J.W.A., Auerswald K., Styczen M.E. The European soil erosion model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments // *Earth Surf. Process. Landf.* – 1998. – V. 23. – № 6. – P. 527–544.
225. Mota J.C.A., Menezes A.S., do Nascimento C.D.V., de Alencar T.L., de Assis R.N.D., Toma R.S., Romero R.E., Costa M.C.G., Cooper M. Pore shape, size distribution and orientation in Bt horizons of two Alfisols with and without cohesive character from Brazil // *Geoderma Regional*. – 2018. – V. 15. – E00197. – DOI: 10.1016/j.geodrs.2018.e00197
226. 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. – P. 339–344. DOI: 10.2136/sssaj1991.03615995005500020006x
227. Nearing M. A., Bradford J. M. Single waterdrop splash detachment and mechanical properties of soils // *Soil Sci. Soc. Am. J.* – 1985. – V. 49. – № 3. – P. 547–552. – DOI: 10.2136/sssaj1985.03615995004900030003x

228. Nearing M.A., Foster G.R., Lane L.J., Finkner S.C. A Process-Based Soil Erosion Model for USDA – Water Erosion Prediction Project Technology // *Trans. ASAE.* – 1989. – V. 32. – № 5. – P. 1587–1593.
229. Nearing M.A., Norton L.D., Bulgakov D.A., Larionov G.A., West L.T., Dontsova K.M. Hydraulics and erosion in eroding rills // *Water Resour. Res.* – 1997. – V. 33. – № 4. – P. 865–876. – DOI: 10.1029/97wr00013
230. Niño Y., García M. Gravel Saltation: 2. Modeling // *Water Resour. Res.* – 1994. – V. 30. – № 6. – P. 1915–1924. – DOI: 10.1029/94wr00534
231. O’Brien M.P. Review of the theory of turbulent flow and its relation to sediment transportation // *Trans. Amer. Geophys. Union.* – 1933. – V. 14. – № 1. – P. 487–491. – DOI: 10.1029/tr014i001p00487
232. Poesen J., Savat J. Detachment and transportation by raindrop splash: II. Detachability and transportability measurements // *Catena.* – 1981. – V. 8. – P. 19–41.
233. Polyakov V.O., Nearing M.A. Sediment transport in rill flow under deposition and detachment conditions // *Catena.* – 2003. – V. 51. – P. 33–43.
234. Proffitt A.P.B., Rose C.W. Soil erosion process. II. Settling velocity characteristics of eroded sediment // *Aust. J. Soil Res.* – 1991. – V. 29. – P. 685–695.
235. Prosser, I.P., Rustomji, P. Sediment transport capacity relations for overland flow // *Prog. Phys. Geogr.* – 2000. – V. 24. – № 2. – P. 179–193.
236. Pusedá-Chulde M. R., Salazar-Fierro F. A., Sandoval-Pillajo L., Herrera-Granda E. P., García-Santillán I. D., De Giusti A. Image analysis based on heterogeneous architectures for precision agriculture: a systematic literature review // *Advances in Intelligent Systems and Computing book series.* – 2020. – V. 1078. – P. 51–70. – DOI: 10.1007/978-3-030-33614-1_4
237. Rodríguez J., Edeskär T., Knutsson S. Particle shape quantities and measurement techniques: a review // *Electronic J. of Geotech. Eng.* – 2013. – V. 18. – P. 169–198. – Электронный ресурс: <http://ejge.com/2013/Ppr2013.016alr.pdf>
238. San José Martínez F., Muñoz Ortega F.J., Caniego Monreal F.J., Kravchenko A.N., Wang W. Soil aggregate geometry: Measurements and

morphology // *Geoderma*. – 2015. – V. 237–238. – P. 36–48. – DOI: 10.1016/j.geoderma.2014.08.003

239. Savin I.Y., Prudnikova E.Y., Vasilyeva N.A., Veretelnikova I.V., Bairamov A.N. The color of soils as a basis for proximal sensing of their composition // *Dokuchaev Soil Bulletin*. – 2016. – V. 86. – P. 46–52. – DOI: 10.19047/0136–1694–2016–86–46–52

240. Sauzet O., Cammas C., Gilliot J. M., Bajard M., Montagne D. Development of a novel image analysis procedure to quantify biological porosity and illuvial clay in large soil thin sections // *Geoderma*. – 2017. – V. 292. – P. 135–148. – DOI: 10.1016/j.geoderma.2017.01.004

241. Shvidchenko A.B. Incipient motion of streambeds / Ph.D. Dissertation. – University of Glasgow. – Glasgow, UK. – 2000. – 260 p. – Электронный ресурс: <http://theses.gla.ac.uk/2550/1/2000shvidchenkophd.pdf>

242. Skvortsova E. B., Rozhkov V. A. Morphometric profiles of pore space in loamy soils of the forest and steppe zones of European Russia // *Eurasian Soil Sci.* – 2011. – V. 4. – № 10. – P. 1209–1221. – DOI: 10.1134/S1064229311100140

243. Smith D.D., Wischmeier W.H. Rainfall Erosion // *Adv. Agron.* – 1962. – V. 14. – P. 10–148. – DOI: 10.1016/S0065-2113(08)60437-X

244. Stoops G. Guidelines for analysis and description of soil and regolith thin sections // *Soil Sci. Soc. Am. Madison, Wisconsin*. – 2003. – 184 p.

245. Stoops G. Micromorphology as a Tool in Soil and Regolith Studies // *Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths*. – 2018. – P. 1–19. – DOI: 10.1016/b978-0-444-63522-8.00001-2

246. Takashimizu Y., Iiyoshi M. New parameter of roundness R: circularity corrected by aspect ratio // *PEPS*. – 2016. – V. 3:2. – 16 p. – DOI: .1186/s40645–015–0078–x

247. Tokaj J. Mikromorfologia i mikromorfometria agregatów glebowych // *Roczniki gleboznawcze*. – 1975. – T. XXVI. – V. 3. – P. 3–21.

248. Tsai C., Man C., Oh J. Stochastic particle based models for suspended particle movement in surface flows // *Int. J. of Sediment Res.* – 2014. – V. 29. – P. 195–207. – DOI: 10.1016/S1001–6279(14)60036–6.
249. Tsuchiya V. Mechanics of the successive saltation of a sand particle on a granular bed in a turbulent stream // *Bull. Disast. Prev. Res. Inst. Kyoto Univ.* – 1969. – T. 19. – V. 152. – № 1. – P. 31–44.
250. Vanoni V.A. Transportation of suspended sediment by water // *Proc. Amer. Soc. of Civ. Eng.* – 1944. – Part III. – P. 608–620.
251. Van Oost K., Govers G., Desmet P. Evaluating the effects of changes in landscape structure on soil erosion by water and tillage // *Landsc. Ecol.* – 2000. – V. 15. – № 6. – P. 577–589. – DOI: 10.1023/A:1008198215674
252. Vrydaghs L., Ball T.B., Devos Y. Beyond redundancy and multiplicity. Integrating phytolith analysis and micromorphology to the study of Brussels Dark Earth // *J. of Archaeol. Sci.* – 2016. – V. 68. – P. 79–88. – DOI: 10.1016/j.jas.2015.09.004
253. Wang Q., Hartemink A. E., Jiang Z., Jin N., Sun Z. Digital soil morphometrics of crotonas in a deep Alfisol derived from loess in Shenyang, China // *Geoderma.* – 2017. – V. 301. – P. 11–18. – DOI: 10.1016/j.geoderma.2017.04.010
254. Wiberg P.L., Smit, J.D. A theoretical model for saltating grains in water // *J. of Geophys. Res.* – 1985. – V. 90. – № C4. – P. 7341–7354. – DOI: 10.1029/jc090ic04p07341
255. Wirtz S., Seeger M., Ries J.B. Field experiments for understanding and quantification of rill erosion processes // *Catena.* – 2012. – V. 91. – P. 21–34. – DOI: 10.1016/j.catena.2010.12.002
256. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. – FAO, Rome. – 2015.– 181 p.
257. Wu B., Wang Z., Shen N., Wang S. Modelling sediment transport capacity of rill flow for loess sediments on steep slopes // *Catena.* – 2016. – V. 147. – P. 453–462. – DOI: 10.1016/j.catena.2016.07.030

258. Yalin M.S. An expression for bed-load transportation // J. Hydraul. Eng. – 1963. – V. 89. – № 3. – P. 221–250.
259. Zhang G.H., Liu B.Y., Zhang X.C. Applicability of WEPP sediment transport equation to steep slopes // Trans. ASABE. – 2008. – V. 51. – № 5. – P. 1675–1681.
260. Zhang G.H., Liu Y.M., Han Y.F., Zhang X.H. Sediment transport and soil detachment on steep slopes: I. Transport capacity estimation // Soil Sci. Soc. Am. J. – 2009. – V. 73. – № 4. – P. 1291–1297.
261. Zhao L., Zhang K., Wu S., Feng D., Shang H., Wang J. Comparative study on different sediment transport capacity based on dimensionless flow intensity index // J. Soils Sediments. – 2020. – V. 20. – P. 2289–2305. – DOI: 10.1007/s11368–020–02568–5
262. Zhao Y., Han Q., Zhao Y., Liu J. Soil pore identification with the adaptive fuzzy C-means method based on computed tomography images // J For Res (Harbin). – 2019. – V. 30. – P. 1043–1052. – DOI: 10.1007/s11676–018–0725–3

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Описание почвенных профилей

Пункт: Курская область, Медвенский район, с. Панино-2, Опытное поле ВНИИЗиЗПЭ.

Макрорельеф: Среднерусская возвышенность. Общий рельеф: пологоволнистый. Микрорельеф: борозды от вспашки, колеи.

Угодье: пашня. Сельскохозяйственные растения: 2017 г. – на несмытом черноземе озимая пшеница, на слабо- и среднесмытом – ячмень; 2018 г. – на всех трех вариантах подсолнечник.

Признаки заболоченности, засоленности: отсутствуют. Уровень почвенно-грунтовых вод не вскрыт. Материнская и подстилающая порода: лёссовидные суглинки.

Приведены описания несмытого, слабо- и среднесмытого пахотных черноземов, обобщенные на основе описаний разрезов для каждой разновидности черноземов типичных, заложенных в двух почвенно-эрозионных профилях. Перед скобками и в скобках указаны глубины горизонтов по описанию разрезов первого и второго почвенно-эрозионного профиля соответственно.

Чернозем типичный несмытый

1. Положение разреза в рельефе: склон южной экспозиции, водораздел, угол наклона земной поверхности $1,1^\circ$, нулевой створ (расстояние от дороги 20 (35) м). Координаты разрезов: 2017 год – N $51^\circ 32' 36''$ E $036^\circ 06' 33''$; 2018 год – N $51^\circ 32' 36''$ E $036^\circ 06' 35''$.

2. Вскипание с 80 (100) см.

3. Название почвы по Классификации и диагностике почв СССР (1977): чернозем типичный умеренно теплый промерзающий мощный малогумусный среднесуглинистый на лёссовидных суглинках.

4. Описание горизонтов:

Апf[(PU) – 0–41 (30) см. Свежий, окраска однородная темно-серая, структура непрочно-глыбисто-комковато-зернисто-порошистая, много мелких корней, рыхлый, мягкий, имеются копролиты, в нижней части большое количество неразложившихся пожнивных остатков, средний суглинок, граница ровная, переход ясный по твердости.

А (AU) – 41 (30)–72 (85) см. Влажноватый, окраска неоднородная: на темно-сером фоне бурые пятна кротовин, структура комковато-зернистая с преобладанием зерен, много мелких корней, плотный, мягкий, копролиты, ходы червей, кротовины, средний суглинок, граница ровная, переход ясный по цвету.

АВ (AUB) – 72 (85)–95 (120) см. Влажноватый, окраска неоднородная: на темно-сером фоне палево-охристые потяжины, структура комковато-зернистая с тенденцией к ореховатости, призматичности, мелких корней меньше, чем в горизонта А, плотный, мягкий, новообразования: карбонатная присыпка (мицелий) в материале горизонта Вк, включения: кротовины и ходы червей с материалом горизонта А, легкий-средний суглинок, вскипает бурно с 80 (100) см, граница слабоволнистая, переход ясный по окраске.

Вк (BCA) – 95 (120)–130 (170) см. Влажноватый, окраска неоднородная: на палево-охристом фоне темно-серые червороины и белые пятнышки белоглазки (редко) и мицелий CaCO_3 (часто), структура ореховато-призматическая, мелкие корни единичны, плотный (плотнее АВ), мягкий, новообразования: редкая белоглазка до 2 см в диаметре, множество мицелия мелкими кусочками (до 5 мм в длину), включений нет, тяжелый суглинок, граница ровная, переход заметный по более светлой окраске и обильным CaCO_3 новообразованиям.

Ск (ССА) – со 170 см. Влажный, окраска неоднородная: на бежево-палевом фоне множество белых пятнышек мицелия, структура глыбисто-

ореховато-призматическая, единичные мелкие корни, плотный, твердоватый, новообразования: CaCO_3 мицелий и белоглазка, вскипание бурное, встречаются единичные ходы червей с материалом горизонта А, тяжелый суглинок.

Чернозем типичный слабосмытый

1. Положение разреза в рельефе: склон южной экспозиции, выпуклый склон, угол наклона земной поверхности $3,6^\circ$ ($2,8^\circ$), расстояние от нулевого створа 190 (150) м (расстояние от дороги 210 (170) м). Координаты разрезов: 2017 год – N $51^\circ 32' 31''$ E $036^\circ 06' 34''$; 2018 год – N $51^\circ 32' 32.2''$ E $036^\circ 06' 35.9''$.

2. Вскипание с 60 (64) см.

3. Название почвы по Классификации и диагностике почв СССР (1977): чернозем типичный умеренно теплый промерзающий мощный малогумусный среднесуглинистый на лёссовидных суглинках слабосмытый.

4. Описание горизонтов:

Апах (PU) – 0–25 (30) см. Свежий, окраска однородная темно-серая, структура непрочно-глыбисто-комковато-зернисто-порошистая, корней среднее количество, плотный, твердоватый, копролиты, осколки кирпича, средний суглинок, граница слабоволнистая, переход постепенный по сложению и окраске.

А (AU) – 25 (30)–40 (45) см. Свежий, окраска неоднородная: на буро-темно-сером фоне охристо-бурые пятна кротовин с материалом горизонта Вк, структура глыбисто-комковато-зернисто-порошистая, корней мало, плотный, но более рыхлый, чем предыдущий, твердоватый, новообразований нет, включения – кротовины с материалом горизонта Вк, средний суглинок, граница слабоволнистая, переход резкий по появлению карбонатной присыпки и вскипанию.

АВ (AUB) – 40 (45)–80 (64) см. Свежий, влажнее предыдущего, окраска неоднородная: на буро-темно-сером фоне темно-серо-бурые пятна горизонта А

и охристо-бурые пятна кротовин с материалом горизонта Вк, структура глыбисто-ореховато-комковато-порошистая, корней мало (единичные), плотный, твердоватый, мягче предыдущего, новообразования: карбонатная присыпка, единичное карбонатное стяжение, средний суглинок, переход постепенный по плотности и окраске, а также появлению карбонатного мицелия.

Вк (ВСА) – 80 (64)–130 (102) см. Влажноватый, окраска неоднородная: на палево-буровато-сером фоне множество мелких белых пятнышек мицелия CaCO_3 (до 0,5 мм) и белоглазки (не единичные, но не более 10 штук на разрез), структура глыбисто-ореховато-комковатая с тенденцией к горизонтальной делимости, корней живых много (10–20 штук/дм²), плотный, твердоватый, новообразования: мицелий, белоглазка и присыпка, включений нет, средний к тяжелому суглинок, переход постепенный по окраске.

Вск (ВССА) – со 130 (102) см. Влажный, окраска неоднородная: на охристо-палево-буром фоне черные пятна червороин и разложившихся корней и множество белых пятнышек карбонатной присыпки, белоглазки и мицелия, структура комковато-ореховатая, плотный, мягкий, новообразования: карбонатная присыпка, мелкий мицелий и белоглазка очень мелкая, до 1–2 мм в диаметре, средний к тяжелому суглинок.

Чернозем типичный среднесмытый

1. Положение разреза в рельефе: склон южной экспозиции, водораздел, вогнутый склон, угол наклона земной поверхности 3,3–3,4°, расстояние от нулевого створа 485 (470) м (расстояние от дороги 505 (490) м). Координаты разрезов: 2017 год – N 51° 32' 23" E 036° 06' 35"; 2018 год – N 51° 32' 24" E 036° 06' 37".

2. Вскипание с 33 (25) см.

3. Название почвы по Классификации и диагностике почв СССР (1977): чернозем типичный умеренно теплый промерзающий мощный малогумусный среднесуглинистый на лёссовидных суглинках среднесмытый.

4. Описание горизонтов:

Апах (PU) – 0–20 см. Сухой, окраска однородная темно-серая, структура комковато-зернисто-порошистая, много мелких корней, верхние 10 см рыхлый, дальше более плотный, копролиты, большое количество пожнивных остатков в нижней части, средний суглинок, граница ровная, переход заметный по цвету и пожнивным остаткам.

АВ (AUB) – 20–54 (48) см. Свежий, окраска неоднородная: окраска неоднородная: на буровато-сером фоне пятна кротовин с очень темным серым материалом горизонта Апах и охристо-буро-палевым материалом горизонта Вк и белесые пятна и потеки, структура глыбисто-призмовидно-ореховато-комковато-зернисто-порошистая, живых корней много, плотный, твердоватый, средний суглинок, новообразования: карбонатная присыпка, карбонатные кутаны, карбонатный псевдомицелий, граница слабоволнистая, переход заметный по окраске.

Вк (BCA) – 48–120 см. Свежий, окраска неоднородная: на охристо-палевом фоне буроватые и серо-бурые пятна, структура глыбисто-призмовидно-комковато-порошистая, корней нет, плотный, мягкость между твердоватым и мягким, средний суглинок, новообразования: карбонатная присыпка, мицелий (изредка), белоглазка (много, 1–10 мм в диаметре).

Ск (ССА) – со 120 см. Влажный, окраска неоднородная: на бежево-палевом фоне множество белых пятен, структура глыбисто-призматическая, плотный, твердоватый, новообразования: CaCO_3 мицелий и белоглазка, тяжелый суглинок.

Чернозем типичный участка «Косимая степь»

Курская область обл., Курский р-н, ФГБУ «Центрально-Черноземный государственный природный биосферный заповедник имени профессора В.В. Алехина».

Макрорельеф: Среднерусская возвышенность. Мезорельеф: междуречье р. Сейм и ее притока р. Млодать, водораздел р. Дон и р. Девица. Микрорельеф: ровный с карстовыми блюдцами.

Угодье: регулярно косимая разнотравно-злаковая степь. Проективное покрытие поверхности почвы травостоем около 100 %. Растительность: кострец береговой (*Bromus riparius* Rehmann), овсяница бороздчатая (*Festuca valesiaca* subsp. *sulcata* (Hack.) Schinz et R.Keller), подмаренник настоящий (*Galium verum* L.), шалфей луговой (*Salvia pratensis* L.), ирис карликовый (*Iris pumila* L.), адонис весенний (*Adonis vernalis* L.), горошек тонколистный (*Vicia tenuifolia* Roth.).

Координаты разреза: N 51° 34' 13.6" E 36° 05' 23.1".

Название почвы по Классификации и диагностике почв СССР (1977): чернозем типичный мощный умеренно теплый промерзающий среднегумусный тяжелосуглинистый на карбонатном лессовидном суглинке.

Название почвы по Классификации и диагностике почв России (2004): чернозем миграционно-мицелярный тяжелосуглинистый на карбонатном лессовидном суглинке.

Описание горизонтов (в скобках индексы горизонтов по Классификации и диагностике почв России (2004)):

Ад (AU₀) – 0–14 см. Сухой, окраска однородная темно-серая (3/1 10 YR), структура мелко-комковато-зернистая, неразложившиеся и полуразложившиеся растительные остатки, переплетен тонкими корнями трав, бусы агрегатов на корнях, тяжелый суглинок, рыхлый. Граница ровная, переход постепенный по плотности.

А1 (AU) – 14–40 см. Свежий, окраска неоднородная: основной фон темно-серый (3/1 10 YR) с редкими палевыми пятнами (червороины, кротовина), структура зернисто-мелко-комковатая с порошистостью, наличие копролитов, много тонких корней, плотнее предыдущего, тяжелый суглинок, при подсыхании на поверхности агрегатов проявляется скелетана. Граница ровная, переход постепенный по цвету и плотности.

A2 (AUb) – 40–75 см. Влажноватый, окраска неоднородная: на буровато-темно-сером фоне (2,5/1 5 YR) палевые пятна (7,5 YR), структура комковато-зернистая (ореховато-призматическая), плотнее предыдущего, корней мало, тяжелый суглинок. Граница ровная, переход постепенный по цвету.

AB (AUB) – 75–93 см. Влажноватый, окраска неоднородная: на буровато-темно-сером фоне палевые затеки, серые пятна диаметром 5–7мм (3/2 10 YR), структура крупных порядков плитчато-призматическая, распадается на мелко комки, тяжелый суглинок, корней мало, более рыхлый. Граница четкая, ровная.

B1к (B1ca) – 93–120 см. Влажный, окраска однородная палево-бурая, структура глыбисто-призматическая, плотный, тяжелосуглинистый, новообразования: псевдомицелий, выстилающий поверхность структурных отдельностей и пор.

Таблица 1 – Экспериментальные данные, использованные для верификации уравнения транспортирующей способности водных потоков малой глубины

V , м/с	H , м	V_w , м ³	M_H , кг	$M_{эксп}$, кг	d , м	V_k , м/с
1	2	3	4	5	6	7
Чернозем типичный участка «Косимая степь» (ЦЧЗ), в.-с.						
0,31	0,010	0,008	0,902	0,450	0,0015	0,22
0,36	0,010	0,011	0,902	0,433	0,0021	0,26
0,43	0,010	0,015	0,902	0,486	0,0018	0,24
0,55	0,009	0,021	0,902	0,613	0,0023	0,26
0,58	0,011	0,052	0,902	0,853	0,0019	0,24
Чернозем типичный участка «Косимая степь» (ЦЧЗ), к.-у.						
0,31	0,010	0,014	0,902	0,329	0,0031	0,31
0,36	0,010	0,013	0,902	0,366	0,0040	0,35
0,43	0,010	0,019	0,902	0,464	0,0038	0,34
0,55	0,009	0,024	0,902	0,542	0,0036	0,33
0,58	0,011	0,040	0,902	0,747	0,0029	0,30
Чернозем типичный несмытый, в.-с.						
0,29	0,009	0,008	0,851	0,319	0,0004	0,21
0,41	0,010	0,020	0,851	0,508	0,0004	0,21
0,33	0,011	0,025	0,851	0,616	0,0003	0,18
0,57	0,010	0,042	0,851	0,850	0,0003	0,19
0,64	0,010	0,042	0,851	0,851	0,0003	0,19
0,35	0,009	0,005	0,953	0,541	0,0002	0,17
0,45	0,010	0,008	0,953	0,843	0,0003	0,17
0,54	0,010	0,017	0,953	0,947	0,0002	0,16
0,58	0,010	0,020	0,953	0,951	0,0002	0,16
Чернозем типичный несмытый, к.-у.						
0,29	0,009	0,010	0,851	0,376	0,0017	0,23
0,41	0,010	0,016	0,851	0,352	0,0018	0,24
0,33	0,011	0,017	0,851	0,337	0,0018	0,24
0,57	0,010	0,036	0,851	0,660	0,0024	0,28
0,64	0,010	0,032	0,851	0,751	0,0028	0,30
0,26	0,010	0,003	0,953	0,381	0,0001	0,06
0,35	0,009	0,004	0,953	0,358	0,0008	0,16
0,45	0,010	0,008	0,953	0,506	0,0016	0,23
0,54	0,010	0,014	0,953	0,865	0,0020	0,25
0,58	0,010	0,014	0,953	0,949	0,0021	0,26
Чернозем типичный слабосмытый, в.-с.						
0,29	0,009	0,007	0,923	0,533	0,0002	0,16
0,32	0,010	0,011	0,923	0,558	0,0003	0,17
0,44	0,009	0,014	0,923	0,629	0,0003	0,18
0,58	0,010	0,033	0,923	0,913	0,0004	0,21
0,65	0,010	0,048	0,923	0,912	0,0004	0,21
0,26	0,010	0,002	0,956	0,783	0,0001	0,12
0,35	0,009	0,004	0,956	0,601	0,0002	0,15
0,45	0,010	0,007	0,956	0,913	0,0002	0,16
0,54	0,010	0,012	0,956	0,953	0,0003	0,17
0,58	0,010	0,021	0,956	0,941	0,0002	0,16

Окончание Таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7
Чернозем типичный слабосмытый, к.-у.						
0,29	0,009	0,009	0,923	0,281	0,0006	0,14
0,32	0,010	0,011	0,923	0,320	0,0013	0,20
0,44	0,009	0,017	0,923	0,320	0,0012	0,20
0,58	0,010	0,034	0,923	0,750	0,0033	0,33
0,65	0,010	0,039	0,923	0,774	0,0040	0,36
0,26	0,010	0,002	0,956	0,378	0,0001	0,06
0,35	0,009	0,004	0,956	0,363	0,0006	0,14
0,45	0,010	0,014	0,956	0,685	0,0017	0,23
0,54	0,010	0,017	0,956	0,950	0,0015	0,22
0,58	0,010	0,025	0,956	0,955	0,0019	0,25
Чернозем типичный среднесмытый, в.-с.						
0,32	0,008	0,007	0,914	0,371	0,0002	0,15
0,36	0,009	0,011	0,914	0,471	0,0003	0,20
0,45	0,010	0,019	0,914	0,822	0,0005	0,29
0,53	0,011	0,033	0,914	0,914	0,0007	0,29
0,65	0,010	0,046	0,914	0,888	0,0006	0,26
0,35	0,009	0,005	0,952	0,538	0,0002	0,15
0,45	0,010	0,006	0,952	0,861	0,0002	0,15
0,54	0,010	0,014	0,952	0,951	0,0002	0,16
0,58	0,010	0,020	0,952	0,947	0,0004	0,21
Чернозем типичный среднесмытый, к.-у.						
0,32	0,008	0,007	0,914	0,246	0,0006	0,13
0,36	0,009	0,010	0,914	0,284	0,0028	0,26
0,45	0,010	0,020	0,914	0,503	0,0014	0,28
0,53	0,011	0,033	0,914	0,865	0,0030	0,31
0,65	0,010	0,046	0,914	0,883	0,0033	0,31
0,26	0,010	0,002	0,952	0,303	0,0001	0,06
0,35	0,009	0,004	0,952	0,364	0,0011	0,18
0,45	0,010	0,007	0,952	0,532	0,0017	0,23
0,54	0,010	0,008	0,952	0,857	0,0016	0,23
0,58	0,010	0,013	0,952	0,951	0,0019	0,25

Примечание – в.-с. – воздушно-сухое, к.-у. – капиллярно-увлажненное исходное состояние образцов; V – средняя скорость потока; H – глубина потока; V_w – объем воды в эксперименте; M_n – масса навески в воздушно-сухом состоянии; $M_{эксн}$ – масса почвы; вынесенной потоком за пределы русла; \bar{d} – средневзвешенный диаметр агрегатов; вынесенных потоком за пределы русла; V_k – критическая скорость потока

Таблица 2 – Расчетные данные верификации уравнения транспортирующей способности водных потоков малой глубины

$\ln((V^2-V_k^2)/gH)$	$\ln\beta_{эксп}$	R	C	$1/\gamma$	$\beta_{эксп}$ кг/м ³	β	$ P $	$ P $
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Чернозем типичный участка «Косимая степь» (ЦЧЗ), в.-с.								
-0,70	4,05	0,87	36,03	-0,52	57,4	9,07	84,2	52,7
-0,46	3,69				40,2	10,12	74,8	
0,31	3,45				31,4	14,46	53,9	
0,96	3,38				29,4	19,52	33,6	
0,94	2,81				16,5	19,37	17,1	
Чернозем типичный участка «Косимая степь» (ЦЧЗ), к.-у.								
-5,51	3,17	0,50	22,61	-0,03	23,8	0,98	95,9	52,6
-2,76	3,37				29,1	3,49	88,0	
-0,31	3,21				24,9	10,83	56,5	
0,77	3,12				22,6	17,86	21,1	
0,83	2,93				18,6	18,37	1,5	
Чернозем типичный несмытый, в.-с.								
-0,72	2,00	0,90	12,53	0,46	7,4	9,00	21,5	13,0
0,25	2,47				11,8	14,09	19,4	
-0,31	2,66				14,3	10,86	24,1	
1,07	2,98				19,8	20,51	3,8	
1,32	2,99				19,8	23,12	16,8	
0,06	2,53				12,6	12,85	2,2	
0,57	2,98				19,6	16,35	16,6	
1,00	3,09				22,0	19,95	9,4	
1,17	3,10				22,1	21,48	2,9	
Чернозем типичный несмытый, к.-у.								
-1,00	2,35	0,86	12,78	0,46	10,4	8,11	22,2	16,9
0,12	2,28				9,8	13,50	38,3	
-0,75	2,24				9,4	9,06	3,3	
0,90	2,91				18,3	19,28	5,1	
1,16	3,04				20,9	21,70	4,0	
-0,43	2,36				10,6	10,49	0,8	
0,06	2,30				9,9	13,13	32,0	
0,44	2,64				14,1	15,58	10,7	
0,86	3,18				24,0	18,87	21,5	
1,03	3,27				26,4	20,39	22,7	
Чернозем типичный слабосмытый, в.-с.								
-0,37	2,39	0,74	13,73	0,25	10,9	12,53	15,2	12,8
-0,30	2,43				11,4	12,75	11,8	
0,62	2,55				12,8	16,00	24,6	
1,11	2,92				18,6	18,05	3,1	
1,35	2,92				18,6	19,15	2,8	
-0,61	2,77				16,0	11,81	26,1	
0,11	2,51				12,3	14,10	15,0	
0,61	2,92				18,6	15,95	14,4	
0,99	2,97				19,4	17,54	9,8	
1,16	2,95				19,2	18,29	4,7	

Окончание Таблицы 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Чернозем типичный слабосмытый, к.-у.								
-0,29	1,98	0,84	10,27	0,67	7,2	8,44	16,9	16,2
-0,46	2,10				8,2	7,54	8,0	
0,58	2,10				8,2	15,13	84,6	
0,87	2,96				19,2	18,37	4,5	
1,09	2,99				19,9	21,29	7,2	
-0,43	2,27				9,7	7,69	20,7	
0,14	2,23				9,3	11,26	20,8	
0,42	2,87				17,6	13,62	22,5	
0,93	3,19				24,4	19,10	21,6	
1,05	3,20				24,5	20,68	15,6	
Чернозем типичный среднесмытый, в.-с.								
-0,02	2,11	0,81	11,57	0,58	8,2	11,4	38,8	16,2
0,05	2,35				10,5	11,9	13,6	
0,18	2,90				18,3	12,9	29,6	
0,63	3,01				20,3	16,6	18,2	
1,27	2,98				19,7	24,1	22,3	
0,10	2,48				12,0	12,3	2,5	
0,61	2,95				19,1	16,5	13,8	
1,01	3,05				21,1	20,7	2,3	
1,11	3,05				21,1	21,9	4,2	
Чернозем типичный среднесмытый, к.-у.								
0,04	1,68	0,92	8,20	0,86	5,3	8,5	58,8	14,6
-0,34	1,82				6,2	6,1	0,6	
0,25	2,39				10,9	10,1	7,5	
0,57	2,93				18,8	13,3	29,1	
1,19	2,95				19,2	22,7	18,2	
-0,43	1,89				6,6	5,7	14,2	
-0,02	2,07				7,9	8,0	1,7	
0,42	2,45				11,6	11,7	1,5	
0,90	2,93				18,6	17,8	4,6	
1,04	3,03				20,7	20,0	3,2	

Примечание – в.-с. – воздушно-сухое, к.-у. – капиллярно-увлажненное исходное состояние образцов; $\ln((V^2 - V_k^2)/gH)$ и $\ln\beta_{эксн}$ – логарифмированные компоненты уравнения транспортирующей способности водных потоков малой глубины; использованные для его верификации; R – коэффициент корреляции Пирсона; C – эмпирический коэффициент; $1/\gamma$ – эмпирический показатель степени; $\beta_{эксн}$ – фактическая мутность потока; рассчитанная по результатам лабораторных экспериментов; β – транспортирующая способность потока; рассчитанная по верифицированному уравнению; $|P|$ – относительная ошибка расчета транспортирующей способности (по модулю); $|P|$ – средняя относительная ошибка расчета транспортирующей способности для серии опытов

В приложении приводятся морфометрические параметры агрегатов изученных почв по фракциям. Расшифровка кодов фракций:

CHKOSST – чернозем типичный участка «Косимая степь» (ЦЧЗ);

CHNESM – чернозем типичный пахотный несмытый;

CHSLAB – чернозем типичный пахотный слабосмытый;

CHSRED – чернозем типичный пахотный среднесмытый;

S1.22–S20.25 – скорость потока в экспериментах на большом эрозионном лотке (БЭЛ) и номер фракции;

S1.22 – 0,31 м/с, 1–2 мм;

S3.22 – 0,44 м/с, 3–5 мм;

S5.23 – 0,58 м/с, 2–3 мм;

S7.23 – 0,55 м/с, 2–3 мм;

S9.24 – 0,41 м/с, 1–2 мм;

S10.24 – 0,29 м/с, 1–2 мм;

S12.24 – 0,32 м/с, 1–2 мм;

S13.24 – 0,44 м/с, 1–2 мм;

S14.22 – 0,58 м/с, 3–5 мм;

S17.23 – 0,54 м/с, 2–3 мм;

S18.22 – 0,45 м/с, 3–5 мм;

S20.25 – 0,32 м/с, 0,5–1 мм;

FR – размер фракции агрегатов, не участвовавших в экспериментах на БЭЛ.

Таблица 1 – Описательные статистики фактора формы (*FF*) агрегатов черноземов типичных Курской области

Код фракции	Фракция, мм	<i>N</i>	\bar{x}	Дов. -95,000%	Дов. +95,000%	<i>Me</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>	$x_{0,25}$	$x_{0,75}$	$x_{0,75} - x_{0,25}$	σ_x^2	σ_x	<i>SE</i> \bar{x}
CHKOSST.S1.22	1-2	28	0,565	0,522	0,607	0,565	0,30	0,79	0,480	0,64	0,16	0,012	0,110	0,021
CHKOSST.S3.22	3-5	16	0,483	0,419	0,547	0,470	0,24	0,68	0,415	0,59	0,18	0,014	0,120	0,030
CHKOSST.S5.23	2-3	11	0,545	0,462	0,627	0,540	0,30	0,74	0,500	0,67	0,17	0,015	0,122	0,037
CHKOSST.FR.1_2	1-2	27	0,581	0,547	0,614	0,590	0,34	0,70	0,530	0,65	0,12	0,007	0,084	0,016
CHKOSST.FR.2_3	2-3	15	0,482	0,418	0,546	0,470	0,32	0,65	0,360	0,59	0,23	0,013	0,115	0,030
CHKOSST.FR.3_5	3-5	14	0,435	0,372	0,498	0,450	0,25	0,64	0,370	0,49	0,12	0,012	0,109	0,029
CHNESM.S7.23	2-3	16	0,484	0,438	0,530	0,510	0,30	0,63	0,440	0,54	0,10	0,007	0,086	0,022
CHNESM.S9.24	1-2	30	0,628	0,587	0,669	0,650	0,44	0,86	0,540	0,71	0,17	0,012	0,109	0,020
CHNESM.S10.24	1-2	16	0,534	0,498	0,570	0,535	0,41	0,64	0,510	0,58	0,07	0,005	0,068	0,017
CHNESM.FR.1_2	1-2	28	0,505	0,459	0,551	0,530	0,17	0,69	0,450	0,59	0,14	0,014	0,119	0,022
CHNESM.FR.2_3	2-3	14	0,422	0,349	0,495	0,455	0,25	0,60	0,280	0,53	0,25	0,016	0,127	0,034
CHSLAB.S12.24	1-2	22	0,501	0,447	0,556	0,515	0,22	0,72	0,460	0,56	0,10	0,015	0,122	0,026
CHSLAB.S13.24	1-2	13	0,501	0,408	0,593	0,470	0,31	0,78	0,390	0,56	0,17	0,023	0,153	0,043
CHSLAB.S14.22	3-5	19	0,453	0,414	0,492	0,470	0,28	0,55	0,410	0,52	0,11	0,007	0,081	0,019
CHSLAB.FR.1_2	1-2	20	0,569	0,536	0,601	0,570	0,42	0,67	0,535	0,62	0,09	0,005	0,070	0,016
CHSLAB.FR.3_5	3-5	33	0,496	0,468	0,524	0,500	0,33	0,66	0,450	0,55	0,10	0,006	0,079	0,014
CHSRED.S17.23	2-3	51	0,531	0,506	0,556	0,540	0,33	0,72	0,480	0,60	0,12	0,008	0,090	0,013
CHSRED.S18.22	3-5	14	0,480	0,429	0,531	0,475	0,31	0,63	0,420	0,51	0,09	0,008	0,088	0,024
CHSRED.S20.25	0,5-1	65	0,606	0,585	0,626	0,610	0,42	0,75	0,540	0,67	0,13	0,007	0,083	0,010
CHSRED.FR.0.5_1	0,5-1	87	0,586	0,569	0,602	0,590	0,40	0,73	0,530	0,65	0,12	0,006	0,077	0,008
CHSRED.FR.2_3	2-3	15	0,421	0,384	0,457	0,420	0,28	0,50	0,370	0,47	0,10	0,004	0,066	0,017
CHSRED.FR.3_5	3-5	13	0,516	0,480	0,553	0,500	0,43	0,63	0,470	0,57	0,10	0,004	0,060	0,017

Примечание – *N* – число наблюдений, \bar{x} – среднее значение, Дов. -95,000% и Дов. +95,000% – левая и правая границы доверительного интервала для среднего соответственно, *Me* – медиана, *Min* и *Max* – минимальное и максимальное значение соответственно, $x_{0,25}$ и $x_{0,75}$ – нижний и верхний квартиль соответственно, $x_{0,75} - x_{0,25}$ – межквартильный размах, σ_x^2 – дисперсия выборки, σ_x – стандартное отклонение, *SE* \bar{x} – стандартная ошибка

Таблица 2 – Описательные статистики степени изометричности (*Rdn*) агрегатов черноземов типичных Курской области

Код фракции	Фракция, мм	<i>N</i>	\bar{x}	Дов. -95,000%	Дов. +95,000%	<i>Me</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>	$x_{0,25}$	$x_{0,75}$	$x_{0,75} - x_{0,25}$	σ_x^2	σ_x	<i>SE</i> \bar{x}
CHKOSST.S1.22	1-2	28	0,657	0,618	0,697	0,656	0,421	0,832	0,611	0,706	0,095	0,011	0,103	0,019
CHKOSST.S3.22	3-5	16	0,549	0,497	0,600	0,555	0,409	0,716	0,463	0,611	0,148	0,009	0,096	0,024
CHKOSST.S5.23	2-3	11	0,674	0,621	0,727	0,684	0,540	0,807	0,623	0,727	0,103	0,006	0,079	0,024
CHKOSST.FR.1_2	1-2	27	0,607	0,571	0,642	0,613	0,432	0,799	0,527	0,676	0,148	0,008	0,090	0,017
CHKOSST.FR.2_3	2-3	15	0,616	0,558	0,674	0,617	0,429	0,779	0,533	0,704	0,171	0,011	0,105	0,027
CHKOSST.FR.3_5	3-5	14	0,549	0,507	0,591	0,543	0,453	0,711	0,472	0,612	0,140	0,005	0,073	0,020
CHNESM.S7.23	2-3	16	0,582	0,534	0,631	0,592	0,449	0,697	0,497	0,678	0,181	0,008	0,091	0,023
CHNESM.S9.24	1-2	30	0,673	0,633	0,712	0,697	0,447	0,889	0,597	0,724	0,126	0,011	0,105	0,019
CHNESM.S10.24	1-2	16	0,594	0,534	0,654	0,589	0,371	0,764	0,489	0,685	0,196	0,013	0,113	0,028
CHNESM.FR.1_2	1-2	28	0,649	0,613	0,686	0,678	0,451	0,793	0,566	0,718	0,152	0,009	0,093	0,018
CHNESM.FR.2_3	2-3	14	0,527	0,470	0,585	0,508	0,399	0,722	0,441	0,584	0,143	0,010	0,099	0,027
CHSLAB.S12.24	1-2	22	0,563	0,518	0,607	0,551	0,375	0,774	0,482	0,626	0,143	0,010	0,101	0,022
CHSLAB.S13.24	1-2	13	0,593	0,514	0,671	0,575	0,379	0,833	0,547	0,636	0,089	0,017	0,130	0,036
CHSLAB.S14.22	3-5	19	0,523	0,458	0,588	0,504	0,254	0,715	0,416	0,646	0,230	0,018	0,134	0,031
CHSLAB.FR.1_2	1-2	20	0,597	0,555	0,640	0,604	0,400	0,781	0,556	0,656	0,100	0,008	0,090	0,020
CHSLAB.FR.3_5	3-5	33	0,560	0,524	0,595	0,565	0,383	0,744	0,469	0,630	0,161	0,010	0,101	0,018
CHSRED.S17.23	2-3	51	0,560	0,527	0,592	0,546	0,339	0,793	0,473	0,639	0,166	0,013	0,115	0,016
CHSRED.S18.22	3-5	14	0,561	0,489	0,634	0,536	0,331	0,799	0,465	0,654	0,189	0,016	0,126	0,034
CHSRED.S20.25	0,5-1	65	0,666	0,643	0,689	0,683	0,409	0,858	0,632	0,725	0,094	0,009	0,093	0,011
CHSRED.FR.0.5_1	0,5-1	87	0,642	0,622	0,662	0,642	0,411	0,841	0,573	0,707	0,134	0,009	0,093	0,010
CHSRED.FR.2_3	2-3	15	0,532	0,477	0,587	0,500	0,421	0,723	0,463	0,582	0,118	0,010	0,099	0,026
CHSRED.FR.3_5	3-5	13	0,628	0,564	0,692	0,616	0,369	0,803	0,592	0,711	0,119	0,011	0,105	0,029

Примечание – *N* – число наблюдений, \bar{x} – среднее значение, Дов. -95,000% и Дов. +95,000% – левая и правая границы доверительного интервала для среднего соответственно, *Me* – медиана, *Min* и *Max* – минимальное и максимальное значение соответственно, $x_{0,25}$ и $x_{0,75}$ – нижний и верхний квартиль соответственно, $x_{0,75} - x_{0,25}$ – межквартильный размах, σ_x^2 – дисперсия выборки, σ_x – стандартное отклонение, *SE* \bar{x} – стандартная ошибка

Таблица 3 – Описательные статистики коэффициента изрезанности поверхности (U) агрегатов черноземов типичных Курской области

Код фракции	Фракция, мм	N	\bar{x}	Дов. -95,000%	Дов. +95,000%	Me	Min	Max	$x_{0,25}$	$x_{0,75}$	$x_{0,75} - x_{0,25}$	σ_x^2	σ_x	$SE\bar{x}$
CHKOSST.S1.22	1-2	28	1,352	1,294	1,409	1,328	1,124	1,837	1,256	1,442	0,185	0,022	0,148	0,028
CHKOSST.S3.22	3-5	16	1,476	1,362	1,591	1,458	1,212	2,055	1,304	1,553	0,249	0,046	0,215	0,054
CHKOSST.S5.23	2-3	11	1,380	1,259	1,502	1,355	1,159	1,823	1,219	1,412	0,193	0,033	0,181	0,054
CHKOSST.FR.1_2	1-2	27	1,324	1,280	1,368	1,303	1,197	1,717	1,239	1,372	0,133	0,012	0,111	0,021
CHKOSST.FR.2_3	2-3	15	1,472	1,371	1,573	1,461	1,244	1,774	1,298	1,673	0,375	0,033	0,182	0,047
CHKOSST.FR.3_5	3-5	14	1,555	1,429	1,681	1,490	1,251	2,014	1,431	1,643	0,212	0,048	0,218	0,058
CHNESM.S7.23	2-3	16	1,456	1,378	1,534	1,399	1,259	1,813	1,363	1,515	0,152	0,021	0,146	0,036
CHNESM.S9.24	1-2	30	1,276	1,232	1,320	1,243	1,081	1,511	1,183	1,356	0,174	0,014	0,118	0,021
CHNESM.S10.24	1-2	16	1,378	1,329	1,427	1,367	1,250	1,557	1,312	1,405	0,093	0,008	0,092	0,023
CHNESM.FR.1_2	1-2	28	1,450	1,353	1,547	1,375	1,204	2,400	1,305	1,491	0,186	0,063	0,250	0,047
CHNESM.FR.2_3	2-3	14	1,599	1,442	1,757	1,477	1,292	2,004	1,377	1,902	0,525	0,074	0,273	0,073
CHSLAB.S12.24	1-2	22	1,451	1,351	1,552	1,392	1,179	2,111	1,336	1,474	0,137	0,052	0,227	0,048
CHSLAB.S13.24	1-2	13	1,456	1,330	1,582	1,457	1,132	1,786	1,341	1,595	0,254	0,044	0,209	0,058
CHSLAB.S14.22	3-5	19	1,507	1,431	1,583	1,453	1,347	1,902	1,391	1,570	0,179	0,025	0,157	0,036
CHSLAB.FR.1_2	1-2	20	1,335	1,292	1,377	1,320	1,218	1,550	1,273	1,370	0,097	0,008	0,091	0,020
CHSLAB.FR.3_5	3-5	33	1,434	1,391	1,477	1,416	1,231	1,753	1,344	1,494	0,150	0,015	0,121	0,021
CHSRED.S17.23	2-3	51	1,387	1,351	1,423	1,361	1,180	1,730	1,288	1,440	0,152	0,016	0,128	0,018
CHSRED.S18.22	3-5	14	1,463	1,380	1,545	1,452	1,255	1,803	1,407	1,544	0,137	0,021	0,143	0,038
CHSRED.S20.25	0,5-1	65	1,294	1,271	1,317	1,278	1,158	1,546	1,220	1,356	0,136	0,009	0,093	0,012
CHSRED.FR.0.5_1	0,5-1	87	1,316	1,297	1,336	1,302	1,174	1,576	1,240	1,379	0,140	0,008	0,092	0,010
CHSRED.FR.2_3	2-3	15	1,556	1,479	1,633	1,534	1,416	1,898	1,455	1,634	0,178	0,019	0,139	0,036
CHSRED.FR.3_5	3-5	13	1,398	1,349	1,447	1,410	1,258	1,526	1,322	1,453	0,131	0,007	0,082	0,023

Примечание – N – число наблюдений, \bar{x} – среднее значение, Дов. -95,000% и Дов. +95,000% – левая и правая границы доверительного интервала для среднего соответственно, Me – медиана, Min и Max – минимальное и максимальное значение соответственно, $x_{0,25}$ и $x_{0,75}$ – нижний и верхний квартиль соответственно, $x_{0,75} - x_{0,25}$ – межквартильный размах, σ_x^2 – дисперсия выборки, σ_x – стандартное отклонение, $SE\bar{x}$ – стандартная ошибка