

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Бардашов Данила Романович

**Факторы формирования почвенного органического вещества
западных ландшафтов лесостепи Окско-Донской
низменности**

Специальность 1.6.21. Геоэкология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата географических наук

Москва – 2026

Диссертация подготовлена на кафедре геохимии ландшафтов и географии почв географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

Научный руководитель:

Кречетов Павел Петрович

кандидат биологических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Линник Виталий Григорьевич

доктор географических наук, доцент,
Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук, заведующий лабораторией биогеохимии окружающей среды, главный научный сотрудник

Мячина Ксения Викторовна

доктор географических наук,
Оренбургский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, Институт степи Уральского отделения Российской академии наук, заведующая отделом природно-техногенных геосистем, ведущий научный сотрудник

Мешалкина Юлия Львовна

кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, факультет почвоведения, доцент

Защита диссертации состоится «14» мая 2026 г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета МГУ.016.9 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Россия, г. Москва, Ленинские горы, д.1, Главное здание МГУ, географический факультет, 18-й этаж, ауд. 1807.

E-mail: dissovetmsu016.9@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте АИС «Диссовет»: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3633>
Автореферат разослан «___» апреля 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат географических наук

М.А. Смирнова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень её разработанности. Лесостепь Восточно-Европейской равнины представляет собой мозаичный комплекс биогеоценозов, где органическое вещество почв формируется в условиях высокой пространственной неоднородности (Милюков, 1950; Орлов, 1974; Орлов и др., 1996). В западных комплексах Окско-Донской низменности создаются уникальные условия для аккумуляции почвенного органического углерода: мощные гумусовые горизонты достигают 0,3–1,3 м, содержание $C_{орг}$ в них может превышать 10% от общей массы (Самойлова, 1978а; 1981; Ахтырцев, 1999). Луговые и лугово-чернозёмные почвы нередко превосходят по запасам гумуса окружающие автоморфные чернозёмы (Розов, Вадковская, 1956; Самойлова, 1981).

Вместе с тем уже с конца XIX века отмечались признаки снижения плодородия и деградации органического вещества под влиянием распашки и нерационального землепользования (Измаильский, 1893; Докучаев, 2013). Наблюдения агрохимической службы России указывают на долговременное сокращение содержания ПОВ в пахотных почвах лесостепи (Ахтырцев и Кадер, 1967; Ахтырцев и др., 1981). Более 90% незалесённых земель в пределах лесостепи Окско-Донской низменности подвержены распашке, что усиливает потери углерода (Самойлова, 1981; Ахтырцев, 1999). На глобальном уровне установлено, что почвы, подвергшиеся сельскохозяйственному использованию, содержат на 25–75% меньше органического углерода по сравнению с ненарушенными аналогами (Захаров, 1927; Александрова, 1980). Совокупные потери $C_{орг}$ за период голоцена оцениваются в сотни миллиардов тонн (Lal, 2004; Batjes, 2016), что влияет на плодородия почв, устойчивость агроландшафтов и содержание парниковых газов в атмосфере (Когут, Семёнов, 2020; Семёнов и др., 2023).

Особое значение для функционирования почв лесостепи имеет гидроморфизм. В западных ландшафтах перераспределение влаги микрорельефом определяет специфику формирования органического вещества (Самойлова, 1970; Ахтырцев, 1983а; Дмитраков, Самойлова, 1973). Переувлажнение способствует накоплению углерода за счёт высокой биологической продуктивности и замедленной минерализации (Ахтырцев, Самойлова, 1983а; Красина, 2014), но в условиях избыточного гидроморфизма возможно формирование почв с низкими запасами углерода (Зайдельман, 2002; Никифорова, Степанцова, 2013). В Северной Америке (регион прерийных «потхоллов») показано, что гидроморфные почвы могут содержать вдвое больше углерода, чем автоморфные аналоги (Bansal et al., 2021; Chizen et al., 2024), однако для лесостепи Русской равнины подобные закономерности требуют уточнения.

Несмотря на обширные исследования (Орлов, 1974; Пономарёва, Плотникова, 1980; Александрова, 1980; Савич и др., 1980; Семёнов, 2015), остаются неясными механизмы пространственной неоднородности почвенного органического вещества и вклад отдельных факторов –

увлажнения, состава растительного покрова и типа землепользования – в формирование его запасов. Для западных комплексов лесостепи эта проблема особенно остра: именно здесь наблюдается максимальная вариабельность условий аккумуляции углерода, которая напрямую влияет на достоверность региональных и глобальных оценок углеродного баланса. Недостаточный учёт ландшафтной мозаики приводит к искажению картографических прогнозов и статистических моделей, а также снижает эффективность природоохранных и агротехнологических мер. В этих условиях актуальность настоящего исследования заключается в необходимости проведения детальной инвентаризации, выявления факторов формирования и построения прогностических моделей почвенного органического вещества западных комплексов Окско-Донской низменности.

Цель работы – выявить факторы накопления и пространственного распределения органического вещества в почвах западных комплексов лесостепи Окско-Донской низменности различной степени гидроморфизма с использованием методов имитационного и статистического моделирования.

Для достижения цели решались следующие **задачи**:

1) Провести инвентаризацию почвенного органического вещества западных комплексов на ключевом участке исследования: определить содержание и запасы органического углерода, оценить степень устойчивости к окислению, установить факторы аккумуляции органического вещества в почвах гидроморфного ряда.

2) Оценить секвестрационный потенциал различных типов почв западных комплексов и ранжировать их по способности накапливать углерод на основе имитационного моделирования.

3) Выявить влияние специфики ландшафтной организации территории на прогноз пространственной неоднородности содержания органического вещества в поверхностном горизонте почв, а также на точность региональных и глобальных оценок запасов углерода.

Научная новизна. Впервые проведено комплексное исследование пространственной организации почвенного органического вещества (ПОВ) и его фракционного состава с применением современных методов цифровой картографии, машинного обучения и имитационного моделирования. Установлено, что ведущим фактором, определяющим формирование, состав и запасы ПОВ в западных ландшафтах лесостепи Окско-Донской низменности, является перераспределение влаги, обусловленное микротопографическими особенностями территории. Показано, что секвестрационный потенциал почв западных комплексов находится в обратной зависимости от влажностного градиента, а пространственная неоднородность ПОВ значимо возрастает в ландшафтах экотонов, что снижает точность пространственных прогнозов.

Теоретическая и практическая значимость. Разработанная методология, сочетающая полевые исследования, лабораторные химические

анализы, статистическое и имитационное моделирование, значительно расширяет арсенал оценки секвестрационной способности почв и пространственного прогноза ПОВ с учетом внутриландшафтной неоднородности. Полученные результаты позволяют существенно уточнить имеющиеся региональные оценки содержания и запасов почвенного органического углерода. Выявленные закономерности вносят вклад в генетическое почвоведение гидроморфных и полугидроморфных почв лесостепи и имеют практическое значение для разработки адаптивных систем землепользования и уточнения углеродного баланса агроландшафтов в рамках реализации климатической стратегии Российской Федерации.

Объекты и методы исследования.

В работе используется сочетание понятийной и методологической базы, разработанной в рамках методов цифровой почвенной картографии (McBratney и др., 2003), зарубежных и российских работ по управлению углеродными ресурсами, в частности – понятия секвестрации и депонирования (Когут и др., 2020; Lavallee et al., 2019; Семенов и др., 2023) и подходов к гидрологическому и имитационному моделированию почвообразования и углеродного цикла (Pitman, 1991; Selles и др., 1997; Володин, Лыкосов, 1998; Finke, 2024).

Исследование выполнено на основе данных съёмки с беспилотных летательных аппаратов, построенных на их основе цифровых моделей рельефа, архивных метеорологических материалов, ландшафтных и почвенных описаний, а также лабораторных и полевых измерений физических и химических свойств почв (в том числе фракционного состава гумуса и содержания органического углерода). Использованы данные автоматизированного мониторинга влажности и уровня грунтовых вод, статистические модели (машинное обучение, регрессионный анализ) и имитационные методы (модель SoilGen). Обработка данных выполнялась в QGIS, ArcGIS, SAGA GIS, Python и R.

Территория исследования охватывает большую часть Тамбовской области и частично территории Липецкой и Воронежской областей. Объектами исследования являются почвы ландшафтов западных комплексов лесостепи Окско-Донской низменности. Почвенный покров ключевого участка отличается выраженной мозаичностью и представлен разнообразными генетическими типами: чернозёмами квазиглеевыми (в том числе засоленными), агрочернозёмами квазиглеевыми (часто с признаками засоления и солонцеватости), агрочернозёмами глееватыми, агросолонцами темногумусовыми квазиглеевыми и глееватыми, а также грубогумусово-глеевыми почвами. Рельеф преимущественно слабоволнистый и плоский, западины весной заполняются тальми водами, создавая временные очаги переувлажнения. Климат умеренно континентальный, годовая сумма осадков колеблется в диапазоне от 400 до 600 мм. Из-за особенностей микрорельефа количество влаги, поступающей в почву, может различаться в 2-4 раза в

зависимости от положения в ландшафте, что определяет формирование локальных зон аккумуляции органического вещества.

Положения выносимые на защиту.

1. Основными факторами формирования состава и запасов органического вещества почв западных комплексов лесостепи являются структура растительного покрова, определяющая объём и состав поступающего опада, а также водный режим, детерминируемый микрорельефом.

2. Секвестрационный потенциал почв западных комплексов определяется сочетанием продуктивности растительного покрова, режима землепользования и условий увлажнения. Имитационное моделирование с использованием процессно-ориентированной модели SoilGen позволяет количественно оценить изменение секвестрационного потенциала почв западных комплексов при смене систем землепользования и растительности.

3. Пространственная неоднородность содержания органического углерода в полугидроморфных почвах статистически значимо превышает вариабельность в слабогидроморфных и гидроморфных позициях. Учёт межурочищных различий и ландшафтной структуры при построении пространственных моделей позволяет повысить точность региональных оценок содержания и запасов углерода.

Степень достоверности.

Результаты исследования основаны на большом объёме оригинального полевого и лабораторного материала, данных дистанционного зондирования и автоматизированного мониторинга, обработанных с применением современных методов статистического и имитационного моделирования. Основные результаты опубликованы в рецензируемых журналах, индексируемых в базах данных Scopus, Web of Science и Российского индекса научного цитирования «eLibrary Science Index», а также представлены в виде докладов на международных и российских научных конференциях.

Апробация работы. Результаты доложены на 8 научных конференциях, в том числе на международных (The 4th International ISMC Conference, Тяньцзинь, 2024; «Инновационные технологии в охране окружающей среды, изменении климата, повышении плодородия деградированных почв», Ташкент, 2025).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 печатных работ, из них 5 статей в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности и отрасли наук. Методическая основа фракционирования почвенного органического вещества по степени окисляемости представлена в работе (Бардашов и др., 2021), вклад автора – 70%. Результаты многолетнего мониторинга влажности и свойств лугово-чернозёмных почв Окско-Донской низменности опубликованы в работе (Смирнова и др., 2024), вклад автора – 30%. Генетические особенности и свойства почв западины с осветлённым горизонтом охарактеризованы в

работе (Смирнова и др., 2024), вклад автора – 30%. механизмы стабилизации органического углерода почвами рассмотрены в обзорной работе (Юдина и др., 2025), вклад автора – 15%. Закономерности трансформации органического вещества в верхнем горизонте и долгосрочного сохранения углерода в почвах чернозёмного ряда в зависимости от режима увлажнения вдоль микротопографического градиента установлены в работе (Yurova et al., 2025), вклад автора – 25%.

Личный вклад автора. Автор выполнял сбор фактических материалов в период с 2022 по 2025 г.; проводил полевые и лабораторные измерения, подготавливал материалы для параметризации имитационных и статистических моделей, проводил их калибровку на данных полевых и дистанционных обследований, верификацию и оценку неопределенности, выполнял обработку полученных результатов, написал текст работы.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка используемых источников, раздела, посвящённого обозначениям и сокращениям, двух приложений. Работа изложена на 148 страницах, включая 39 рисунков и 7 таблиц. Библиографический список содержит 145 источников, из них 75 на английском языке.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В главе 1 рассмотрены развитие представлений об органическом веществе почв лесостепных западин, история изучения почв западинных ландшафтов Окско-Донской низменности, а также современные концепции состава, фракционирования и секвестрационного потенциала почвенного органического вещества (ПОВ). Проведен сравнительный анализ закономерностей накопления ПОВ в западинных ландшафтах Русской равнины и североамериканского региона прерийных подходов (Prairie pothole region).

В главе 2 дана комплексная физико-географическая характеристика Окско-Донской низменности. Охарактеризованы геолого-геоморфологическое строение, климатические особенности, растительность, почвенный покров и ландшафтная структура региона.

В главе 3 описаны объекты и методы исследования. Представлены материалы и методы полевых работ, включая схему ключевого участка, методы заложения разрезов и автоматизированного мониторинга. Детально изложены методы лабораторных анализов, обработки данных, статистического (включая машинное обучение) и имитационного моделирования (модель SoilGen) для оценки динамики и запасов ПОВ.

В главе 4 охарактеризовано ПОВ западинных комплексов и условия его формирования. На основе собственных данных проанализированы свойства почв западинного комплекса и их динамика за 50-летний период, содержание и запасы ПОВ, его фракционный состав. Установлены и ранжированы ведущие факторы формирования ПОВ.

В главе 5 представлены результаты имитационного моделирования содержания и запасов ПОВ в ландшафтах западных комплексов с использованием модели SoilGen. Оценен секвестрационный потенциал различных почв и проанализированы сценарии его изменения при варьировании условий землепользования и поступления органического вещества.

В главе 6 проведен анализ пространственной неоднородности органического углерода почв западного комплекса лесостепи и её влияния на региональные оценки запасов. С использованием методов машинного обучения построены карты пространственного распределения ПОВ, оценена неопределенность прогнозов и значимость предикторов. Обсуждены следствия полученных результатов для методологии отбора проб и проведения региональных оценок углеродного пула.

В заключении систематизированы основные выводы диссертационной работы, подтверждающие положения, выносимые на защиту.

ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Первое защищаемое положение (основано на результатах глав 1, 4). 1.

Основными факторами формирования состава и запасов органического вещества почв западных комплексов лесостепи являются структура растительного покрова, определяющая объём и состав поступающего опада, а также водный режим, детерминируемый микрорельефом.

Для обоснования первого защищаемого положения была разработана многоуровневая методика, объединяющая полевые и лабораторные исследования, автоматизированный мониторинг влажности, статистический анализ и имитационное моделирование. Методологической основой исследования выступил катенарный подход, позволяющий изучать изменение свойств ПОВ вдоль градиента гидроморфизма – от автоморфных позиций к гидроморфным. В рамках данного подхода были заложены и детально изучены серии почвенных разрезов, отражающие всю полноту разнообразия почв западных комплексов

Ключевым элементом исследования стала интеграция данных автоматизированного мониторинга влажности почвы и уровня грунтовых вод. Полученные результаты выявили значительное иссушение почвенного профиля и опускание УГВ за 50-летний период, что привело к смене гидроморфного режима на чернозёмный в лугово-чернозёмных почвах (рис. 1). Особенно наглядно эти изменения проявились при сравнении с данными режимных наблюдений Е.М. Самойловой (1968-1973 гг.), когда при годовых осадках 470-510 мм глубины залегания грунтовых вод составляли от 0-2 м в увлажнённые годы до 1-4 м в засушливые. В настоящее время грунтовые воды залегают глубже 4-5 м.

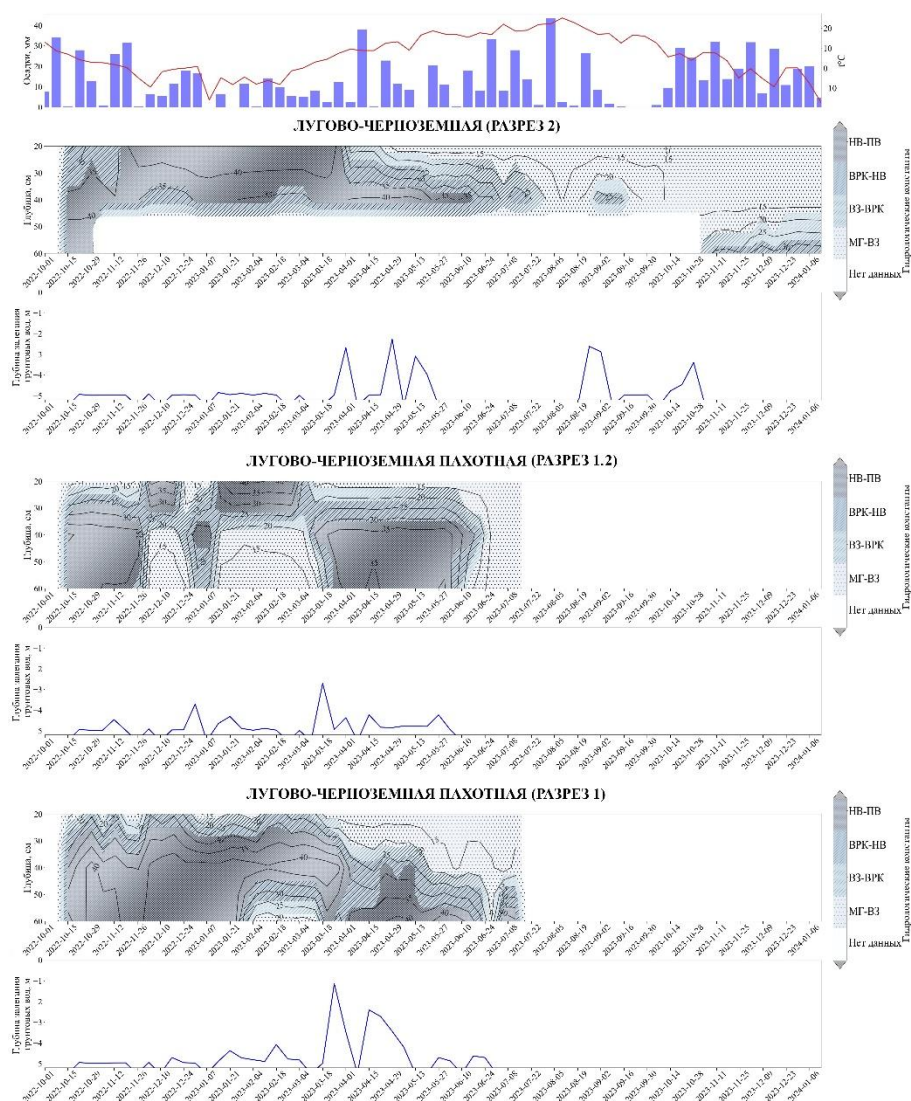
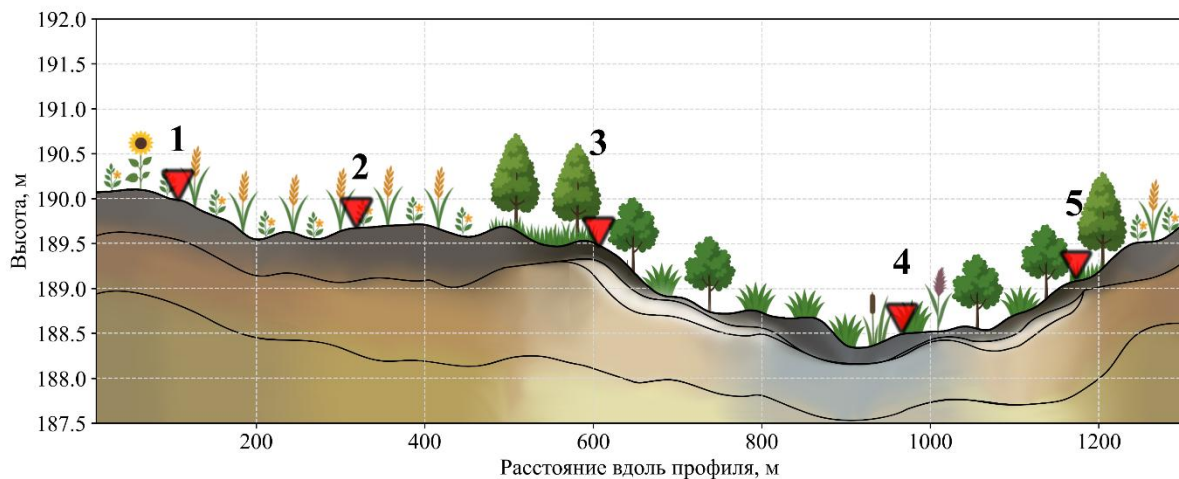


Рисунок 1. Динамика влажности и глубины залегания грунтовых вод лугово-черноземных почв на протяжении 01.10.2022-09.01.2024. В верхней части – осадки и температура в течение рассматриваемого периода, ниже – динамика объемной влажности (%), для отдельных почв. Почвенно-гидрологические константы: ПВ – полная влагоемкость, НВ – наименьшая влагоемкость, ВРК – влажность разрыва капилляров (0,7 НВ); ВЗ – влажность завядания; МГ – максимальная гигроскопичность (Смирнова и др., 2024)

Лабораторный анализ фракционного состава гумуса по методу Пономаревой-Плотниковой и соединений разной степени окисляемости по методу Савича-Соколова показал существенные изменения в составе ПОВ за последние пять десятилетий (рис. 2). В почвах западин и лугово-чернозёмных залежах возросла доля всех трёх фракций фульвокислот, а также первой фракции гуминовых кислот (ГК-I), наиболее подвижной и менее устойчивой. Одновременно значительно снизилась доля второй фракции гуминовых кислот (ГК-II), преимущественно связанной с кальцием. Наблюдаемое перераспределение отражает изменение условий трансформации органического вещества: увеличение доли ГК-I связано с сезонным поверхностным переувлажнением, создающим анаэробные условия и

препятствующим минерализации органического вещества, а снижение содержания ГК-II указывает на вынос кальция и карбонатов. Анализ соединений различной степени окисляемости по методу Савича-Соколова выявил, что в почвах западин избирательно накапливаются легко- и трудноокисляемые формы ПОВ, что указывает на консервацию слабо разложившегося органического вещества в условиях переувлажнения. В залежных и пахотных почвах преобладают соединения средней устойчивости, отражающие более активную трансформацию опада в гумусовые вещества

типы э/л элювиальный элювиально-аккумулятивный аккумулятивно-элювиальный элювиально-аккумулятивный



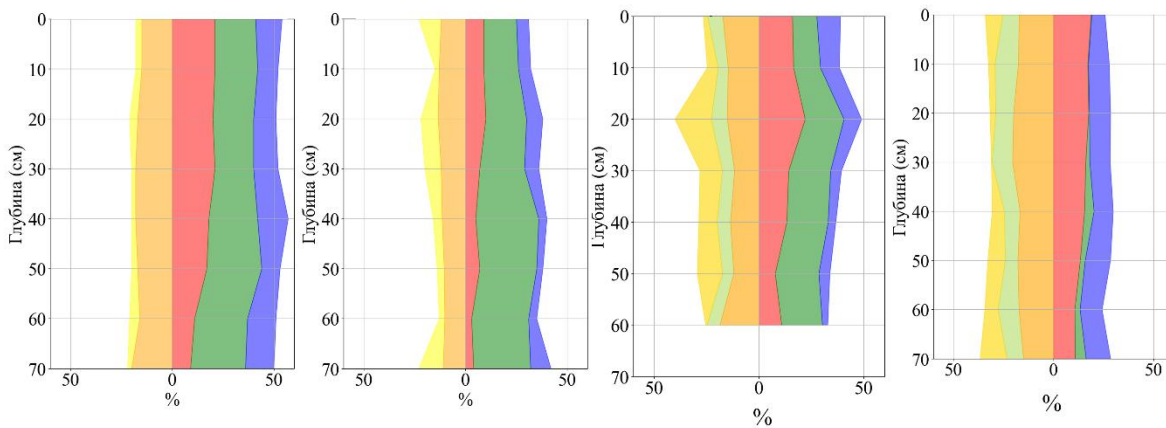
-  Осина обыкновенная
-  Осоки
-  Рогоз
-  Злаки
-  подсолнечник и другие культуры
-  Ива ломкая
-  неморальные травы
-  Камыш
-  разнотравье

Лугово-черноземная пахотная (1)

Лугово-черноземная (2)

Солодь луговая (3)

Дерновая глеевая (4)



ф2 ф3 ф1 г1 г2 г3

Рисунок 2. Фракционный состав и соотношение соединений по степени окисляемости органического вещества в почвах катены (ф1, ф2, ф3 – доля углерода фульвокислот; г1, г2, г3 – доля углерода гуминовых кислот, 1, 2, 3 фракции соответственно)

Множественный регрессионный анализ позволил установить, что ключевыми факторами пространственной вариации содержания органического углерода ($C_{орг}$) в верхнем горизонте являются показатели влажности (TWI и NDWI), чей вклад составил около 40% от объяснённой дисперсии (рис. 3, влажность: $0,3W+0,38P*0,24W = 0,4C$). Значимую роль играет также растительный покров, отражаемый индексами NDVI и сезонной динамикой вегетации. Совокупный вклад этих двух групп факторов существенно превышает объясняющую способность микротопографических показателей (TPI, TRI, уклон) и химических свойств (pH).

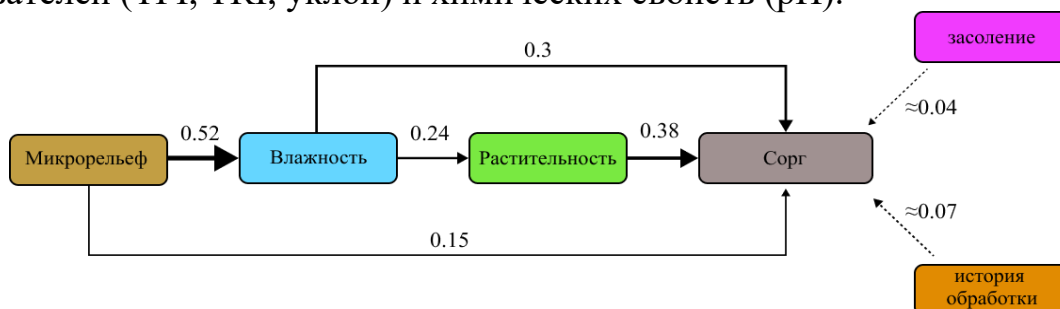


Рисунок 3. Схема взаимосвязей факторов, определяющих формирование содержания ПОВ в западных комплексах лесостепи по результатам множественного регрессионного анализа

Комплексное применение современных методов исследования позволило установить, что именно микрорельеф, определяющий пространственное перераспределение влаги, создаёт мозаику условий, в которых формируются различные пулы органического вещества: от лабильных в переувлажнённых днищах западин до более стабильных в лучше дренированных полугидроморфных позициях. Перераспределение влаги объясняет разнообразие не только морфологического строения почв, но и состава, запасов и устойчивости запасов углерода в ландшафтах западных комплексов лесостепи. Выявленная закономерность имеет фундаментальное значение для генетического почвоведения и практическое – для разработки точных методов оценки углеродного баланса и адаптивных систем землепользования.

Второе защищаемое положение (основано на результатах глав 3, 5).

Секвестрационный потенциал почв западных комплексов определяется сочетанием продуктивности растительного покрова, режима землепользования и условий увлажнения. Имитационное моделирование с использованием процессно-ориентированной модели SoilGen позволяет количественно оценить изменение секвестрационного потенциала почв западных комплексов при смене систем землепользования и растительности

Исторически исследования гумусного состояния почв Окско-Донской низменности, выполненные Е.М. Самойловой и А.Б. Ахтырцевым, фиксировали качественные различия между целинными и пахотными аналогами, отмечая фульватизацию гумуса и снижение доли устойчивых фракций при распашке. Однако количественный прогноз динамики углерода

при различных сценариях землепользования долгое время оставался недостижимым без применения современных методов моделирования.

Основным инструментом оценки динамики углерода стало имитационное моделирование с использованием процессно-ориентированной модели почвообразования SoilGen 2.26. Модель параметризована на основе полевых и лабораторных данных, полученных в ходе многолетних исследований на ключевых участках. Для параметризации органического блока модели использовались данные фракционного состава гумуса и соединений разной степени окисляемости.

Вычислительный эксперимент охватил 50-летний период (1972–2022 гг.) и был проведен для трех репрезентативных позиций катены: слабогидроморфной лугово-чернозёмной пахотной почвы, полугидроморфной лугово-чернозёмной залежной почвы и гидроморфной дерново-глеевой (грубогумусово-глеевой потечно-гумусовой) почвы западины. Выбор позиций обусловлен их значимостью в структуре землепользования и репрезентативностью для наблюдаемых на ключевом участке гидрологических режимов. Для каждой из позиций были разработаны детализированные сценарии, варьирующие общий объем ежегодного опада от 1,4 до 8,0 т/га/год и долю корневого опада от 65% до 90%. Сценарии отражали существующую неодинаковость в продуктивности и структуре растительного покрова в различных условиях – от интенсивного земледелия до сукцессий на залежах и гомеостаза естественных западинных экосистем.

Результаты моделирования выявили ряд фундаментальных закономерностей. Установлено, что динамика содержания углерода критически зависит от структуры опада (рис. 4): сценарии с высокой долей корневого опада (85-90%) обеспечивали максимальный прирост запасов $C_{орг}$ – до 75 т/га за 50-летний период в слое 0-60 см, до 60 т/га в слое 0-30 см. В то же время, при значительной (20-35%) доле надземного опада и его низком общем объеме (менее 3 т/га/год) прирост был минимальным или отсутствовал вовсе. Наблюдение подтверждает гипотезу о ключевой роли корневого опада многолетней луговой растительности в стабильной долговременной секвестрации углерода.

Моделирование позволило провести количественное ранжирование секвестрационного потенциала по типам землепользования (рис. 5). Расчеты по медианным сценариям показали, что наиболее значительный прирост углерода в слое 0-30 см достигается в залежной лугово-чернозёмной почве при разнотравно-злаковом покрове – 22,1 т/га. В почве западины под березово-осиновым колком – 15,8 т/га, а в пахотной почве – 10,2 т/га (табл. 1). Эти данные демонстрируют, что максимальный секвестрационный потенциал в условиях западинных ландшафтах лесостепи реализуется не в слабогидроморфных, равно как и не в собственно гидроморфных позициях, а в полугидроморфных залежных экосистемах с высокой продуктивностью травянистого покрова.

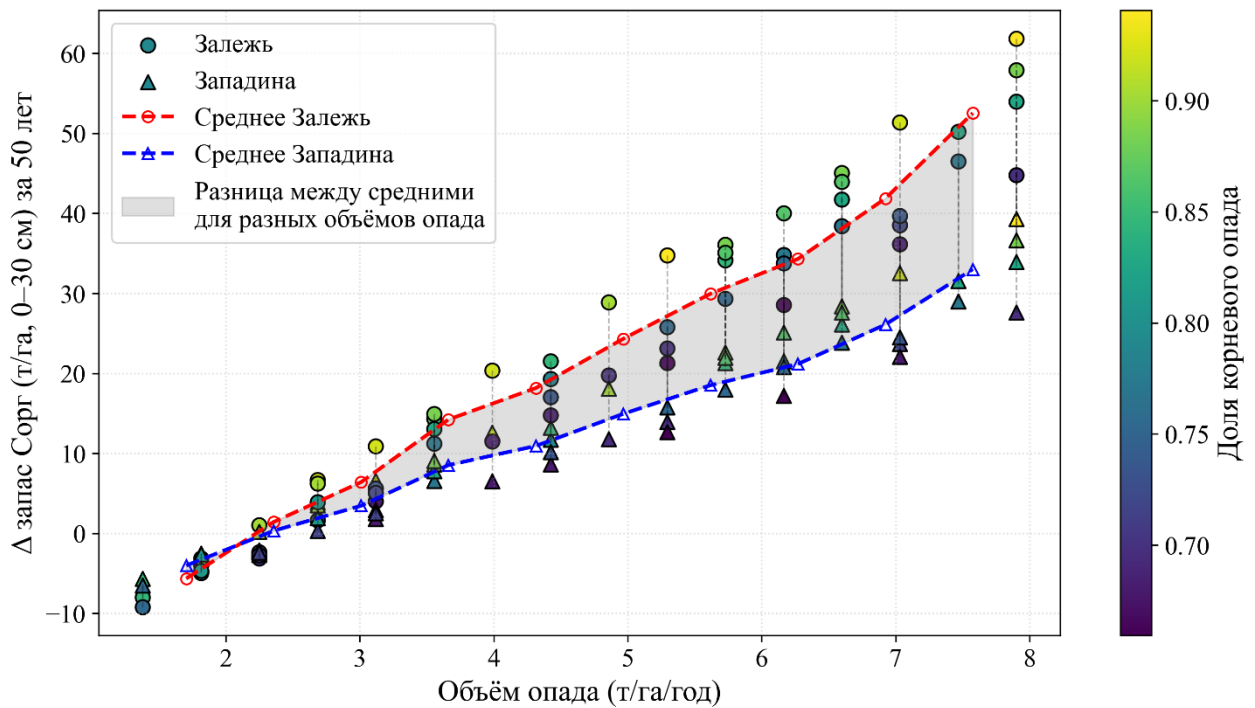


Рисунок 4. Сопоставление накопления (потери) углерода (т/га) в слое 0–30 см за 50-летний период моделирования в зависимости от различной доли корневого опада и объема опада (т/га/год) для органического вещества почв западины (синим) и залежи (красным)

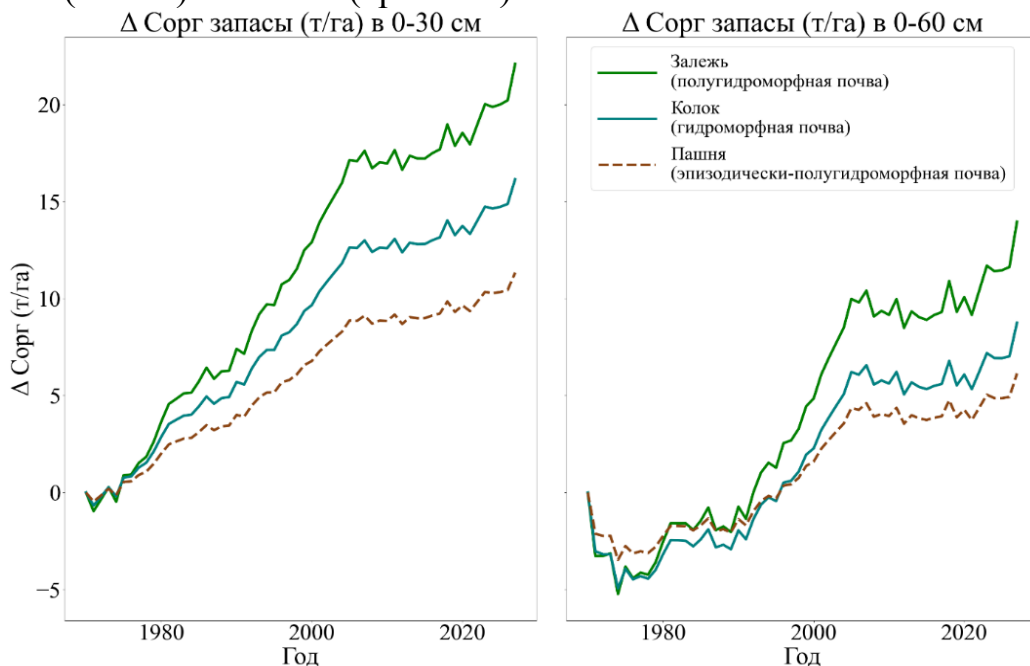


Рисунок 5. Динамика запасов органического углерода в почвах ключевого участка по данным модельного эксперимента

Временные ряды результатов моделирования выявили выраженный нелинейный характер процесса, с периодами стабилизации ("плато") продолжительностью до 5-7 лет, обусловленными неблагоприятными погодными условиями отдельных лет, что указывает на высокую чувствительность секвестрационного потенциала к межгодовой изменчивости гидротермического режима и объясняет противоречивость данных

краткосрочных полевых экспериментов, проводимых рабочей группой Е.М. Самойловой. Верификация модельных расчётов показала, что полученные значения $C_{орг}$ на конец периода находились в пределах доверительного интервала наблюдений для всех трёх разрезов.

Таблица 1 – Сводная таблица модельных сценариев

Сценарий	Опад (т/га·год)	Севооборот / землепользование	Растительность	Изменение $C_{орг}$ в 0–30 см за 50 лет	Изменение запасов $C_{орг}$ (т/га)
Западина (гидроморфные условия)	3–6	Естественное лугопастбищное использование, без пашни	Осоково-разнотравные сырые луга с осоками, рогозом, моховым подъярусом; на периферии – мезофильные виды	+1.2–1.8 % $C_{орг}$	+5...15
Залежь (полугидроморфные условия)	4–8	Залежи, естественное зарастание травами	Злаково-бобово-разнотравные сообщества с кострцом, клевером, типчаком и луговыми разнотравными видами	+0.5–1.2 % $C_{орг}$	+10...35
Пашня (полугидроморфные условия)	2–3	Севооборот (пшеница–подсолнечник–пар), интенсивная обработка	Однолетние злаки и сорные виды после уборки (<i>Chenopodium</i> , <i>Setaria</i> , <i>Echinochloa</i>)	–0.2...+0.3 % $C_{орг}$	–4...+6

Применение имитационного моделирования впервые позволило количественно оценить и сопоставить вклад различных сценариев землепользования в углеродный баланс почв западных комплексов. Показано, что вид землепользования и формируемый им тип растительного покрова выступают ведущим фактором, управляющим реализацией секвестрационного потенциала. Модель SoilGen демонстрирует свою эффективность как инструмент для прогнозной оценки последствий изменения агротехнологий и систем землепользования в лесостепных ландшафтах, создавая научную основу для разработки адаптивных стратегий управления углеродным циклом сложных агроландшафтов.

Третье защищаемое положение (основано на результатах главы 6). 3. Пространственная неоднородность содержания органического углерода в полугидроморфных почвах статистически значительно превышает вариабельность в слабогидроморфных и гидроморфных позициях. Учёт межурочищных различий и ландшафтной структуры при построении пространственных моделей позволяет повысить точность региональных оценок содержания и запасов углерода.

Высокая пространственная неоднородность содержания органического углерода в полугидроморфных почвах по сравнению с почвами автоморфных и гидроморфных позиций делает региональные оценки содержания и запасов углерода без учёта межурочищных взаимодействий некорректными.

Традиционные подходы, основанные на усреднении данных по типам почв или ландшафтными зонам, зачастую не учитывают внутриландшафтную вариабельность, что может приводить к систематическим ошибкам в расчетах. Проведенное исследование выявило закономерность: максимальная пространственная неоднородность содержания органического углерода

характерна именно для полугидроморфных почв западных комплексов, занимающих промежуточные положения в катенах и функционируют как экотоны между дренированными выположенными водораздельными поверхностями и переувлажненными днищами западин.

На основе данных 474 точек были построены и проанализированы карты пространственного распределения $C_{орг}$ с оценкой неопределенности. Была выявлена градация вариабельности $C_{орг}$ в зависимости от типа биотопа. В луговых сообществах, занимающих полугидроморфные позиции, коэффициент вариации достигал 19,98% при среднем содержании $C_{орг}$ 57,02 г/кг, что существенно превышало вариабельность в других биотопах. Для сравнения, в условиях пашни и залежи коэффициент вариации составлял 16,18%, а в колках с древесной растительностью – 14,16%. Эта позиция характеризуется исключительной мозаичностью факторов, влияющих на $C_{орг}$: градиентов влажности, продуктивности растительного покрова и ботанического состава, что и обуславливает повышенную вариабельность содержания органического углерода почвы.

Обучение и тестирование ансамбля линейных, основанных на деревьях решений и нейросетевых моделей машинного обучения с использованием пространственной кросс-валидации продемонстрировало, что ошибка прогноза закономерно возрастает в экотонах. Значения среднеквадратичной ошибки RMSE для различных алгоритмов варьировали от 2,8 до 4,1 г/кг, коэффициент детерминации R^2 достигал 0,65 (нейросеть LSTM-CNN-MLP) (рис. 6), максимальные ошибки прогноза совпадали с контурами полугидроморфных почв. Анализ важности признаков методом SHAP выявил, что ключевыми предикторами пространственного распределения $C_{орг}$ являются топографический индекс влажности и вегетационные индексы, что подчеркивает ведущую роль градиента увлажнения и продуктивности растительности в формировании пространственной мозаики $C_{орг}$.

Анализ неопределенности и расчет доверительных интервалов предсказания наглядно продемонстрировали, что зоны наибольшей неопределенности прогноза характеризуются значениями $PIR > 30$ г/кг $C_{орг}$ и пространственно совпадают с контурами полугидроморфных почв. Именно в этих ландшафтных позициях региональные оценки, основанные на экстраполяции точечных данных, являются наименее надежными и требуют разработку более частой сетки пробоотбора.

Проведение корректных региональных оценок запасов углерода в лесостепной зоне невозможно без учета межурочищных взаимодействий и ландшафтной структуры. Игнорирование повышенной вариабельности в экотонных зонах приводит к недооценке неопределенности и существенным ошибкам в оценках запасов углерода, что требует фундаментального пересмотра стратегии отбора проб для охвата пространственной неоднородности. Необходима разработка специализированных подходов к картографированию содержания $C_{орг}$, учитывающих ландшафтную позицию и особенности гидрологического режима территории.

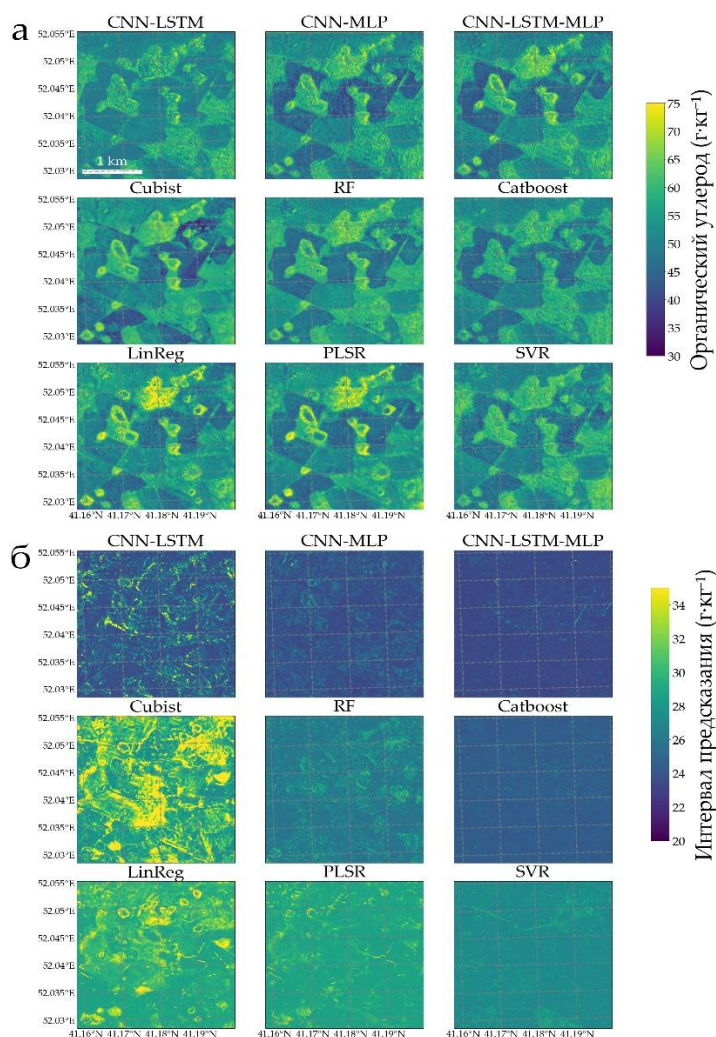


Рисунок 6. а – полученные карты Сорг, г/кг для оцениваемых моделей, б – полученные карты интервала прогнозирования (PIR, г/кг) для оцениваемых моделей

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для почв западных комплексов лесостепи Окско-Донской низменности на основе комплексного анализа морфологических, химических и физико-химических свойств почв, изучения фракционного состава органического вещества, сопоставления факторов формирования углеродного пула и проведения моделирования динамики содержания углерода с использованием имитационных моделей была проведена оценка секвестрационного потенциала изученных почв в условиях современного климата и хозяйственного использования.

Проведённые исследования позволили сделать ряд ключевых выводов. Содержание органического углерода в исследованных почвах имеет выраженную пространственную неоднородность, связанную с положением почв в катене и степенью их гидроморфизма. Максимальные значения зафиксированы в почвах понижений – луговых солодах и чернозёмно-луговых почвах, где наблюдается аккумуляция слаборазложённых в условиях

переувлажнения органических остатков. В слабогидроморфных позициях запасы углерода значительно ниже вследствие более активной минерализации.

В почвах залежей формируются наиболее благоприятные условия для длительного депонирования углерода. В пахотных почвах содержание углерода в верхнем горизонте ниже по сравнению с залежью, однако за счёт увеличения плотности суммарные запасы в метровой толще не уступают залежным аналогам.

Фракционный анализ органического вещества показал, что за последние десятилетия во всех типах почв возросла доля фульвокислот и первой фракции гуминовых кислот; содержание второй фракции гуминовых кислот, связанной с кальцием, снизилось, что указывает на возрастание роли анаэробных условий в стабилизации углерода. В западинах создаются условия для избирательного накопления труднорастворимых форм углерода, тогда как в залежных и пахотных почвах преобладают соединения средней устойчивости.

Ведущую роль в формировании пространственной мозаики содержания углерода играют уровень увлажнения почвы (около 40% объяснённой вариации) и структура растительного покрова. Влияние рельефа и химических свойств (рН, карбонатность) вторично, но вносит вклад в стабилизацию органики через формирование кальций-гуматных комплексов.

Имитационное моделирование с использованием SoilGen показало, что при переводе пахотных земель в залежь секвестрационный потенциал возрастает. За 50-летний период накопление углерода в залежи составило 22,1 т/га, в западинах – 15,8 т/га, на пашне – 10,2 т/га. Накопление происходило нелинейно: периоды интенсивного роста сменялись плато и фазами замедления, отражая реакцию ПОВ на климатические изменения. По различным сценариям вычислительного эксперимента за 50 лет в зависимости от объёма и доли корневого опада потенциал накопления Сорг варьирует от нуля до 60 т/га.

Максимальные запасы углерода характерны для полугидроморфных лугово-чернозёмных почв, тогда как в гидроморфных западинах наблюдается более высокая доля труднорастворимых соединений, обеспечивающая долговременное связывание. Секвестрационный потенциал определяется балансом между объёмом аккумуляции и устойчивостью накопленного углерода.

Вариабельность $S_{орг}$ в полугидроморфных почвах статистически значимо превышает вариабельность в слабогидроморфных и гидроморфных позициях. При мониторинге содержания почвенного углерода необходимо учитывать структурную мозаичность ландшафта и использовать подходы к моделированию, способные отражать эту неоднородность. Учёт межурочищных различий и ландшафтной структуры при построении пространственных моделей позволяет повысить точность региональных оценок содержания и запасов углерода. Региональные оценки углеродного баланса без учёта межурочищных различий и переходных зон могут быть существенно искажены.

Благодарности. Автор выражает благодарность научному руководителю кандидату биологических наук П.П. Кречетову, сотрудникам географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова и Почвенного института им. В.В. Докучаева, в частности Юрову А.Ю., Филю П.П., Лозбеневу Н.И. и отдельно Смирнову М.А. за поддержку в подготовке диссертационной работы, сборе полевых материалов, выполнении анализов и модельных расчетов. Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РНФ № 22-77-10062 «Гидрологическая и секвестрационная функции почв западного комплекса лесостепи».

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базе ядра Российского индекса научного цитирования «eLibrary Science Index»:

1. Бардашов Д. Р., Кречетов П. П., Смирнова М. А. Органическое вещество почв горных ландшафтов Алтая (на примере Тигирекского заповедника) // Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2021. – № 6. – С. 40–50. EDN: KZMFZD; Импакт-фактор 0,25 (SJR); вклад автора 70%; 0,69 п.л.

2. Смирнова М. А., Бардашов Д. Р., Филь П. П., Лозбенев Н. И., Доброхотов А. В. Сезонная и многолетняя динамика влажности лугово-черноземных почв (Окско-Донская низменность) // Почвоведение. – 2024. – № 10. – С. 1343–1360. EDN: JXZVPQ; Импакт-фактор 3,02 (РИНЦ); вклад автора 30%; 1,13 п.л.

Smirnova M. A., Bardashov D. R., Fil P. P., Lozbenev N. I., Dobrokhotov A. V. Seasonal and multi-year dynamics of soil moisture in meadow-chnozem soils (Oka-Don lowland) // Eurasian Soil Science. – 2024. – № 10. – С. 1343–1360. EDN: JXZVPQ; Импакт-фактор 0,475 (SJR); вклад автора 30%; 1,25 п.л.

3. Смирнова М. А., Плотникова О. О., Бардашов Д. Р., Терская Е. В. Генетические особенности лесостепных почв с осветлённым горизонтом (на примере почвы западины Окско-Донской низменности) // Вестник Томского государственного университета. Биология. – 2024. – № 66. – С. 22–41. EDN: PMJOVQ; Импакт-фактор 0,17 (SJR); вклад автора 30%; 1,25 п.л.

4. Юдина А. В., Ключева В. В., Тимофеева М. В., Семенов М. В., Бардашов Д. Р., Кочнева М. А., Романенко К. А. Физические механизмы стабилизации углерода почвами (обзор) // Бюллетень Почвенного института имени В. В. Докучаева. – 2025. – № 124. – С. 309–366. EDN: ZJVQFC; Импакт-фактор 0,29 (SJR); вклад автора 15%; 3,63 п.л.

5. Yurova A. Y., Smirnova M. A., Kozlov D. N., Bardashev D. R., Lozbenev N. I., Stepanenko V. M. Faster topsoil organic matter transformation accompanies long-term carbon preservation in virgin Chernozems // Geoderma Regional. – 2025. – Vol. 40. – e00914. EDN: RIBFAP; Импакт-фактор 0,93 (SJR); вклад автора 25%; 1,7 п.л.

Иные публикации по теме диссертации:

6. **Бардашов Д.Р.**, Смирнова М.А. Предсказание содержания органического углерода в почвах лесостепи с использованием методов глубокого обучения // Вестник аграрной науки Узбекистана. – 2025. – № 3 (21/2). – С. 206–210. Вклад автора 90%; 0,5 п.л.

7. **Бардашов Д.Р.**, Смирнова М.А., Лозбенев Н.И., Филь П.П. Многолетняя динамика и индикаторы гидроморфизма полугидроморфных почв западных комплексов Тамбовской лесостепи // Почвы и окружающая среда: сб. науч. тр. Всерос. науч. конф. с международным участием. – Новосибирск: ИПА СО РАН, 2023. – С. 442–445. EDN: SQXKUG; вклад автора 60%; 0,4 п.л.