

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ М. В. ЛОМОНОСОВА
ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

На правах рукописи

Бардашов Данила Романович

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

Специальность 1.6.21. Геоэкология

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени
кандидата географических наук

Научный руководитель:
кандидат биологических наук, доцент
Кречетов Павел Петрович

Москва – 2026

Оглавление

Введение.....	4
Глава 1. Развитие представлений об органическом веществе почв лесостепных западин	10
1.1 Краткая история изучения почв западных ландшафтов Окско-Донской низменности	10
1.2. Почвенное органическое вещество, состав, фракции	14
1.3. Органическое вещество почв ландшафтов западных комплексов ...	17
Глава 2. Физико-географическая характеристика Окско-Донской низменности.....	36
2.1 Геолого-геоморфологическое строение.....	36
2.2 Климатические особенности лесостепи Окско-Донской низменности.	39
2.3 Растительность западных комплексов.....	44
2.4 Почвенный покров западных комплексов	47
2.5 Ландшафтная структура Окско-Донской низменности	54
Глава 3. Объекты и методы исследования.....	58
3.1. Материалы и методы полевых работ	58
3.2. Лабораторные работы.....	63
3.3. Данные и их обработка.....	65
3.4. Методы статистического моделирования.....	67
3.5. Методы имитационного моделирования (SoilGen)	75
Глава 4. Почвенное органическое вещество западных комплексов лесостепи Окско-Донской низменности и условия его формирования	77
4.1. Свойства почв западного комплекса лесостепи Окско-Донской низменности и их динамика за 50-летний период.....	77
4.2. Содержание и запасы органического вещества почв западных комплексов	88
4.3 Фракционный состав органического вещества почв западных комплексов по данным катенарных исследований.....	92
4.4. Факторы формирования почвенного органического вещества западных комплексов	95
Глава 5. Имитационное моделирование содержания и запасов почвенного органического вещества в ландшафтах западных комплексов.....	99
5.1. Параметризация модели SoilGen	99

5.2. Анализ чувствительности модели к параметрам опада	100
5.3. Результаты 50-летнего сценарного моделирования	101
5.4. Валидация модельных результатов 50-летнего эксперимента.....	106
5.5. Моделирование голоценовой динамики углерода почв западных комплексов	107
Глава 6. Пространственная неоднородность органического углерода почв западного комплекса лесостепи и её влияние на региональные оценки запасов	110
6.1. Исследовательский анализ данных и корреляции между предикторами и целевой переменной.....	111
6.2. Оценка производительности моделей.....	113
6.3. Сравнение моделей и оценка неопределенности.....	114
6.4. Распределение и вариабельность почвенного углерода в ландшафте	117
6.5. Значимость признаков	118
6.6. Мозаика углерода в поверхностном слое лесотепных почв.....	120
6.7. Сравнение подходов, очаги неопределенности и следствия для методологии отбора проб	123
6.8. Ограничения проведенных оценок и предложенных подходов и направления для будущих исследований	125
Заключение	128
Список Литературы.....	130
Обозначения и сокращения.....	141
Приложение 1.	144
Приложение 2.	145

Введение

Лесостепь, формируемая мозаикой биогеоценозов с различными преобладающими жизненными формами растений – травянистых, кустарниковых, древесных – является одной из наиболее экологически сложных природных зон умеренного климата (Милюков, 1950; Самойлова, 1981; Erdos, 2014). Восточно-Европейская лесостепь – один из наиболее земледельчески-освоенных экорегионов планеты (Самойлова, 1981, Erdos, 2014, 2017). Неоднородность лесостепных ландшафтов находит отражение в их компонентах – особенной пестротой отличаются растительный покров и почвы. Накопление органических остатков разнообразного происхождения формирует почвенный профиль и приводит в действие центральный процесс характерный для зональных почв этой природной зоны – гумусоаккумулятивный (Чендев, 2015). Центральным звеном и «отражающей поверхностью» «зеркала ландшафта» лесостепи выступает гетерогенное почвенное органическое вещество (ПОВ), содержание которого в мощном органоминеральном гумусовом горизонте зональных почв способно достигать 2 – 8% (Семенов и Когут, 2015; Lal, 2021).

Почвы лесостепи Окско-Донской низменности характеризуются исключительно высоким содержанием органического углерода, причем в верхнем гумусовом горизонте, способным достигать мощности от 0,3 до 1,3 м (Самойлова, 1981), его содержание может достигать 10 и более процентов от общей массы (Ахтырцев и Кадер, 1967). Луговые почвы Окско-Донской низменности превосходят окружающие черноземы по содержанию и запасам гумуса в наиболее важном верхнем слое до глубины 20-30 см (Новиков, 1952; Самойлова, 1981).

Тем не менее, уже в работах Александра Алексеевича Измаильского (в т.ч. «Как высохла наша степь» (1893) поднимаются вопросы снижения плодородия этих почв (Измаильский, 2013). Данные наблюдений, получаемые российской агрохимслужбой, указывают на существование тренда на снижение содержания ПОВ с самого начала периода наблюдений в распахиваемых почвах лесостепи (Stolbovoy, 2002; Столбовой, Филь, 2023). Непропорционально интенсивное использование лесостепных почв дополнительно усиливает потери ПОВ (Кириленко, Дронин, 2022). Более 90% незалесенных земель в пределах лесостепи Окско-Донской низменности подвержены распашке (Красина, 2014; Fil et al., 2021).

По оценкам Sanderman et al., 2017 на протяжении голоцена, с момента начала оседлой сельскохозяйственной деятельности на Земле и по настоящее время, потери Сорг в верхних 0–30, 0–100 и 0–200 см слоях почвенного профиля составили соответственно 37, 75 и 116 млрд. тонн С. Почвы,

подверженные сельскохозяйственной обработке, содержат на 25–75% меньше Сорг по сравнению с их ненарушенными аналогами (Lal, 2010). Экологические последствия столь масштабного снижения запасов органического вещества почв и последующего высвобождения углерода неочевидны (Xu et al., 2020). Сокращение содержания ПОВ в пахотных почвах способствует долговременному снижению их плодородия (Xu et al., 2020; Ling et al., 2025).

В ландшафтах Окско-Донской низменности доминирующими компонентами СПП являются гидроморфные почвы, образующие в сочетании с полугидроморфными аналогами переувлажненные земли (Ахтырцев, 1999). Существование сельскохозяйственного производства и переувлажненных земель остаётся одной из актуальных проблем агроландшафтов лесостепи (Chizen, 2024). В пределах ареала почв черноземного ряда в Евразии и на североамериканском континенте наблюдаются процессы деградации наиболее плодородных почв под влиянием гидроморфизма – «олуговения» (Воробьева и др., 2002; Красина, 2014; Chizen, 2024). Черноземы в течение двух-трёх лет трансформируются в лугово-черноземные или черноземно-луговые почвы с признаками слитизации, засоления и осолонцевания (Зайдельман и др., 1998; Степанцова, Красин, 2011).

Исследования, проведенные на территории Великих Равнин в Северной Америке – региона «Прерийных потхоллов» (Prairie pothole region), указывают на то, что гидроморфные почвы переувлажненных степных и лесостепных участков способны удерживать больше углерода ввиду более высокой биологической продуктивности растительных сообществ и сниженной микробиологической активности в анаэробных условиях (Badiou et al., 2011). Показано, что почвы прерийных подхоллов способны связывать в два раза больше органического углерода, чем их автоморфные аналоги (Euliss, 2006). В почвах Центрально-Черноземного биосферного заповедника также отмечен секвестрационный градиент почв, совпадающий с влажностным – выщелоченные чернозёмы депрессий отличались более высокими запасами углерода и более высоким углерод-связывающим потенциалом, чем типичные черноземы автономных позиций (Yurova et al., 2025).

В то же время, переувлажнение западных комплексов Окско-Донской низменности, где почвы автономных позиций уже демонстрируют признаки гидроморфизма, сопряжено с изменением преобладающих жизненных форм растений, а также формированием в пределах древесно-кустарниковых колков лугово-болотных почв и солодей, отличающихся существенно меньшими запасами углерода, чем соседствующие с ними лугово-черноземные почвы (Самойлова, 1981). Закономерности, зафиксированные для почв Северной

Америки, не могут быть напрямую перенесены на территорию Русской равнины.

Обширные исследования и режимные наблюдения, проводившиеся на Юге Тамбовской области в 60-80 гг. XX в. позволили достаточно подробно охарактеризовать гидрологические режимы западных комплексов и свойства луговых почв, в том числе содержание и состав органического вещества (Самойлова, 1979, 1981; Ахтырцев, 1999). Повышение температуры воздуха вкупе со снижением уровня грунтовых вод, наблюдаемое на исследуемой территории в течение последних 50 лет, вероятно, сказалось и на состоянии органического вещества почвы.

Накопление углерода в почве является важной экосистемной услугой, поскольку запасы углерода и *способность* почвы запасать углерод регулируют почвенное плодородие, устойчивое функционирование экосистем и атмосферное содержание парниковых газов (Lal et al., 1998). Однако, остается неясным, как накопление органического углерода в почве варьируется между разными экосистемами западного ряда. Неочевидно также, каков вклад различных факторов среды в формирование запасов и содержание органического углерода, каково соотношение механизмов влияния почвенной влаги на почвенное органическое вещество в западных ландшафтах лесостепи.

Оценка содержания и запасов органического углерода в почвах, а также анализ его пространственной вариабельности и секвестрационного потенциала являются собой необходимый элемент реализации задачи 6.5 «Стратегии долгосрочного развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 г.», предусматривающей моделирование процессов в климатической системе в глобальном, региональном и локальном масштабах. Интенсивный сценарий низкоуглеродного развития ориентирован на повышение поглощающей способности управляемых экосистем, в частности посредством внедрения практик, обеспечивающих аккумуляцию углерода в почвах сельскохозяйственных угодий и сокращение его потерь (Виноградова и др., 2022; Романенков и др., 2023). По словам Б.М. Когута (2021) «чтобы практически выполнить расчёты почвенной секвестрации углерода как для отдельных территорий, необходимо располагать определенной информацией, которая либо отсутствует, либо характеризуется как недостаточно достоверная». Существующие глобальные и региональные оценки не учитывают существующую внутриландшафтную неоднородность почвенного органического вещества (Doetterl et al., 2025), мозаичность которого в ландшафтах лесостепи особенно велика в результате сложного сочетания растительных сообществ (Сорокина, 2016; Zhu et al., 2019).

Цель исследования – выявить закономерности формирования, пространственного распределения и динамики почвенного органического вещества в почвах западных комплексов лесостепи Окско-Донской низменности различной степени гидроморфизма с использованием современных информационно-аналитических методов, техники и приборной базы, а также имитационного и статистического моделирования в целях оснащения методологии инвентаризации и пространственного прогноза содержания и запасов почвенного органического вещества в зоне лесостепи.

Задачи:

1. Провести инвентаризацию почвенного органического вещества западных комплексов на ключевом участке исследования: описать свойства почв, определить содержание и запасы органического углерода, установить факторы формирования органического вещества в почвах гидроморфного ряда.
2. Оценить секвестрационный потенциал различных типов почв западных комплексов и ранжировать их по способности связывать углерод на основе имитационного моделирования.
3. Охарактеризовать пространственную неоднородность почвенного органического вещества западных комплексов и выполнить пространственный прогноз содержания органического вещества в поверхностном горизонте для уточнения и развития методологии региональных и глобальных оценок запасов углерода.

Материалы и методы исследования. Объектом исследования является почвенный покров и отдельные почвы западных комплексов лесостепных ландшафтов Окско-Донской низменности. Диссертационная работа основана на данных экспедиционных исследований, проведенных в 2022-2025 г. по проекту № 22-77-10062 «Гидрологическая и секвестрационная функции почв западного комплекса лесостепи». Категориально-методологическая основа оценки углерод-связывающей способности почвы организована в соответствии с определениями глоссария межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) (IPCC, 2021), работ зарубежных и отечественных экспертов в области почвенного органического вещества (Когут, Семенов., 2020; Padarian et al., 2022; Don et al., 2024). В работе использованы описательный, сравнительно-географический, химико-аналитический, картографический, геоинформационный, статистический методы; методы математического моделирования.

В частности проведены полевые почвенные исследования; использованы различные методы лабораторного анализа почвы (Воробьева, 1998; Соколов 2009; Тимофеева, Юдина, 2025); методы геоботанического

описания (Тиходеева, Лебедева, 2022); методы статистической обработки данных, включающие методы статистического пространственного моделирования, в том числе – алгоритмы машинного и глубокого обучения (Minasny, Mcbratney, 2025); подходы цифровой почвенной картографии (McBratney и др., 2003). Использована имитационная модель почвообразования SoilGen (Finke, 2024).

Научная новизна исследования состоит в первом подробном описании закономерностей пространственной организации почвенного органического вещества гидроморфных ландшафтов лесостепи Окско-Донской низменности. Показано, что центральным фактором, определяющим формирование и функционирование почвенного органического вещества является перераспределение влаги, обусловленное микротопографическими особенностями территории. Также показано, что секвестрационный потенциал почв западных комплексов находится в обратной зависимости от влажностного градиента, т.е. в западных ландшафтах лесостепи ЕТР влага является лимитирующим фактором долговременного связывания углерода. Установлено, что пространственная неоднородность почвенного органического вещества значительно возрастает в ландшафтах экотонов, что сказывается на качестве прогноза пространственных статистических моделей.

Теоретическая и практическая значимость

Полученные результаты позволяют существенно уточнить имеющиеся региональные оценки содержания почвенного органического вещества. Значительно расширить методологический арсенал оценки секвестрационной способности почв и пространственного прогноза содержания и запасов почвенного органического вещества с учетом существующей внутриландшафтной неоднородности. Выявленные закономерности пространственной организации и взаимодействия факторов среды вносят вклад в генетическое почвоведение гидроморфных и полугидроморфных почв лесостепи.

Степень достоверности, апробация результатов и публикации

Полученные 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). По теме работы опубликовано опубликовано 7 работ, из них 5 статей, индексируемых в базах данных Scopus, Web of Science, RSCI

Личный вклад автора. Автор выполнял сбор фактических материалов в период с 2022 по 2025 г.; проводил полевые и лабораторные измерения,

подготавливал материалы для параметризации теоретических моделей, выполнял верификацию и калибровку моделей по данным полевых и дистанционных обследований, выполнял обработку полученных результатов.

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.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения и списка используемых источников. Работа изложена на 148 страницах, включая 38 рисунков и 7 таблиц. А также 2 приложения. Библиографический список содержит 145 источников, из них 74 на английском языке.

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 Юровой А.Ю., Филю П.П., Лозбенева Н.И. и отдельно Смирновой 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».

Глава 1. Развитие представлений об органическом веществе почв лесостепных западин

1.1 Краткая история изучения почв западных ландшафтов

Окско-Донской низменности

История изучения почв западных ландшафтов лесостепи восходит к началам систематических исследований почвенного покрова. В.В. Докучаев в «Русском черноземе» (1883), описывая почвы юга Тамбовской губернии, упоминает «едва заметные, крайне слабо очерченные котловинки» в которых отмечались почвы с маломощным светло-серым и подзолистым горизонтами, а также кочками на поверхности, обуславливая формирование этих «бесплодных лысин» длительным весенним застоём дождевой воды. В «Наших степях прежде и теперь» (1886) В.В. более подробно останавливается на «плоских округлых впадинах, разграниченных между собою небольшими, малозаметными возвышениями», распространёнными по всей территории лесостепной зоны Русской равнины, отмечая более постепенный характер переходов между почвенными горизонтами и отсутствие вскипания с кислотами почв в днищах западин. Описания западных почв встречаются в работах А.А. Измаильского (1900), в классификации Н.М. Сибирцева (1895). В своих классификациях луговые почвы лесостепей также описывают С.С. Неуструев (1916) и С.А. Захаров (1927), приводят их на уровне типа, ссылаясь при этом на труд Г.М. Тумина «Почвы Тамбовской губернии» (1915, ч.1). Упомянул о почвах лесостепных степных западин и В.Р. Вильямс (1939). Н.В. Орловский (1946) классифицировал гидроморфные и полугидроморфные почвы Западной Сибири.

Существенный вклад в развитие классификационных представлений внес Н. Н. Розов (1939), впервые выделивший лугово-чернозёмные почвы в самостоятельный тип, тогда как ранее их рассматривали лишь как разновидность высокогумусных чернозёмов.

Недостаточная глубина разрезов, использовавшихся при мелкомасштабном картографировании, не позволяла увидеть признаки оглеения в профиле многих западных почв (Иванова, 1976), из-за чего о западных гидроморфных почвах черноземного ряда, а также об их пространственном распространении, участии в почвенном покрове, длительное время было мало литературных сведений.

Первые систематические исследования луговых почв лесостепи относятся к 1950 гг. В работах Н.Н. Розова, Вадковской (1956), Е.Н. Ивановой приводятся первые подробные исследования структуры почвенного покрова

бессточных областей лесостепи. Среди морфологических признаков тогда отмечались признаки оглеения, обнаруживаемые на глубине 50-80 см сразу под гумусовым горизонтом. Е.Н. Иванова отмечала, что автоморфные черноземы Окско-Донской низменности в пределах Тамбовской области занимают лишь ограниченные ареалы в нешироких приречных и прибалочных зонах.

Изучение почвенного покрова в Тамбовской области активно велось на протяжении 1960-1980 гг. (Б.П. Ахтырцев и Б.Т. Джегерис (1959)), П.Г. Адерихин (1960), Е.М. Самойлова, Н.В. Якушевская (1969, 1970, 1972), В.К. Бугаевский (1972), А.Б. Ахтырцев (1974), А.Б. Ахтырцев и Г.М. Кадер (1975). Полугидроморфные почвы черноземного ряда стали выделяться при крупномасштабном картировании почв Тамбовской области (Красина, 2014). На данном этапе отмечен переход к детальным стационарным наблюдениям и режимным исследованиям, направленным на понимание функциональных взаимосвязей как внутри почвы, так и почвы с другими компонентами ландшафта.

Исследователями подробно охарактеризованы ряды почв возрастающего гидроморфизма, включающие полугидроморфные и гидроморфные почвы. Показана устойчивая зависимость пространственного распределения от морфометрических характеристик микрорельефа и сезонной динамики увлажнения, отмечалось значительное преобладание гидроморфных разновидностей почв черноземного ряда (Самойлова, Якушевская, 1970).

Существенный вклад в изучение западинных почв лесостепи Окско-Донской низменности внесла Е.М. Самойлова. Под её руководством в 70-80 гг. XX в. были проведены детальные почвенные исследования и режимные наблюдения, установившие общие закономерности функционирования полугидроморфных почв западинного ряда и организации почвенного покрова – разработано представление о градиенте гидроморфизма почвенного покрова; систематизированы знания о пространственной организации почвенного покрова западинных комплексов – описаны структуры почвенного покрова территории; установлена ведущая роль сезонного переувлажнения в формировании почв западинных комплексов; описаны закономерности гумусонакопления в разных типах почв – различия в радиальном распределении почвенного органического вещества, его состава в почвах разной степени гидроморфизма. Проведены многолетние наблюдения водного режима луговых солонцов и солодей.

Информация о преобладании лугово-чернозёмных почв на территории Окско-Донской низменности была впервые обобщена на картографическом

уровне только при составлении Почвенной карты РСФСР 1988, ставшей результатом систематизации почвенных обследований, проводившихся под научным руководством Б. П. Ахтырцева и пришедшихся на пик увлажнённости 1960–1970-х гг.

Н.В. Денисова, Н.И. Лебедева (1978), изучали СПП в верховьях рек Матыры, Воронежа, на склоне р. Цны, пришли к выводу, что почвы днищ западин аналогичны генетически отличным серым глееватым, светло-серым лесным и дерново-подзолистым почвам.

Подробные почвенные исследования фактически прекратились в конце 1980-х гг. В период с 1990 по 2000 год публиковались работы Б.П. Ахтырцева и Ф.Р. Зайдельмана (1993) – преимущественно основанные на результатах исследований предыдущих лет. Было показано, что хроническое переувлажнение ведёт к оглеению нижней части профиля, снижению содержания подвижных форм питательных элементов и к заболачиванию.

В то же время в период 1990-2010 гг. значительные площади прежде распахиваемых полугидроморфных почв черноземного ряда не обрабатывались и оказались заняты сорными видами растений. В докторской диссертации Б.П. Ахтырцева (1999) подробно исследовано влияние гидроморфизма на свойства и гумусное состояние почв лесостепи.

Е.М. Самойловой и А.Б. Ахтырцевым были выделены группы почв по степени гидроморфизма. На основе данных полевых исследований и проведенных режимных наблюдений были выделены группы почв в зависимости от глубины уровня грунтовых вод: более 6 м – различные подтипы черноземов, 3–6 м – различные подтипы лугово-черноземов, 1,5–3 м – различные подтипы лугово-черноземных почв и других почв, 0–1,5 м – болотные и другие гидроморфные почвы. Это деление оказалось применимо для всей территории лесостепи Окско-Донской низменности (Самойлова, 1981).

Почвенный комплекс западин Тамбовской равнины получил детальное освещение в исследованиях В. К. Бугаевского (1972), А. Б. и Б. П. Ахтырцевых (1976, 1993), Е. М. Самойловой и И. В. Якушевской (1970), а также А. Д. Пряхина (1996-1997).

Активные исследования возобновились с середины 2000-х гг.: гидроморфные почвы региона исследовались во взаимосвязи с состоянием агроландшафтов, экологическими условиями их формирования (Зайдельман, Никифорова, Степанцова, 2002; Степанцова и др., 2006). С. Б. Сафронов (2008) подробно исследовал взаимосвязь гидроморфизма переувлажненных почв Окско-Донской низменности и их химического состава. А.В. Трубниковым

(2009) проведена работа по группировке полугидроморфных структур почвенного покрова южной лесостепи Окско-Донской низменности для проектирования адаптивно-ландшафтных систем земледелия и агротехнологий. Описана морфология западных почв, ухудшение агроэкологических условий при переходе от водораздельных поверхностей к западинам.

В 2010 гг. подробные исследования почв северной части Тамбовской равнины проводились А.Н. Никифоровой, Л.В. Степанцовой, В.Н. Красиным, Т.В. Красиной. В их диссертационных работах (Л.В. Степанцова, 2012, Т.В. Красина, 2014) детально описаны физические свойства и гидрологический режим почв этого региона. Исследована связь водного режима с продуктивностью сельскохозяйственных культур. Л.В. Степанцова и В.Н. Красин (2011) предложили количественный показатель глубины залегания грунтовых вод для оценки степени гидроморфности чернозёмов северной части Тамбовской равнины. По результатам длительных режимных наблюдений опубликованы работы Ф.Р. Зайдельмана о генезисе и деградации чернозёмов под влиянием переувлажнения (2012, 2013). Показано, как длительное увлажнение приводит к разгумусации верхних горизонтов, механическому уплотнению почвы и развитию вторичного засоления/солонцеватости в условиях замедленного дренажа. Ф.Р. Зайдельманом, Л.В. Степанцовой, А.Н. Никифоровой, В.Н. Красиным, Т.В. Красиной проводились дальнейшие исследования химических, физических свойств черноземовидных почв, их минералогического состава и морфологических особенностей под влиянием переувлажнения (2014, 2018, 2019); Подробно изучены процессы деградации органического вещества почв под влиянием переувлажнения (2015). Предложены минералогические и колориметрические критерии оценки гидроморфизма. (Zaidelman et al., 2019)

Одновременно проводился мониторинг климатических тенденций: отмечено, что в начале XXI века в лесостепи отмечается тренд на некоторое увлажнение климата (рост осадков) (Смирнова и др., 2024).

Ведутся работы по цифровому картографированию почвенного покрова (Н.И. Лозбенев, 2024) и применению дистанционного зондирования для выявления ландшафтной структуры почвенного покрова междуречий.

Водный режим почв западных комплексов лесостепи Окско-Донской низменности изучается в контексте гидрологического функционирования лесостепных ландшафтов Окско-Донской низменности с использованием систем автоматизированного мониторинга и высокоточной съемки с БПЛА (Филь, 2025)

1.2. Почвенное органическое вещество, состав, фракции

Под почвенным органическим веществом (ПОВ) принято понимать совокупность всех органических соединений, присутствующих в почвах, за исключением живых организмов (Орлов, 2005). В настоящей работе используется представление о почвенном гумусе, раскрытое ниже. В состав почвенного органического вещества входит органическое вещество растительных остатков, не утратившее анатомического сложения и преобразованное органическое вещество (ОВ) – гумус, под которым понимают совокупность всех органических соединений в почвенном профиле, утративших связь с элементами структурной организации клеток и тканей (Орлов и др., 1996). Гумус состоит из неспецифических, специфических гумусовых веществ и промежуточных продуктов гумификации (Семенов и Когут, 2015).

Почвенное органическое вещество неоднородно и подразделяется на различные компоненты или фракции в зависимости от критериев разделения (Орлов, 1996). Выделяют биологическое, химическое и физическое (в т.ч. механическое и термическое) фракционирование (Фарходов, 2024). Наиболее ранние попытки фракционирования имели химическую природу (Walkley, Black, 1933; Тюрин, 1951). Изучение пулов почвенного органического вещества методом химического фракционирования основано на последовательной экстракции компонентов с различной растворимостью, что даёт возможность не только количественно оценить пулы и установить их состав, но и препаративно выделить нужную фракцию.

В России одним из классических подходов является методика И.В. Тюрина (1951), основывающаяся на выделении гумусовых веществ в зависимости от природы их связи с минеральной частью почвы.

По И.В. Тюрину (1951) гумусовые вещества принято подразделять на несколько фракций, различающихся по растворимости и характеру связи с минеральной частью почвы. Гуминовые кислоты первой фракции (ГК-I) считаются наиболее подвижными: они легко извлекаются раствором щёлочи и включают как свободные соединения, так и связанные с подвижными формами оксидов железа и алюминия. Гуминовые кислоты второй фракции (ГК-II) обнаруживаются лишь после удаления кальция из почвы и, соответственно, отражают прочную ассоциацию органики с кальциевым комплексом. Третья фракция (ГК-III) отличается наибольшей устойчивостью и выделяется только при длительной обработке слабой щёлочью при нагревании; она связана с труднорастворимыми полуторными оксидами и глинистыми минералами.

Фульвокислоты также подразделяют на отдельные части, среди которых выделяют наиболее подвижные фракции, легко переходящие в раствор и способные к миграции по профилю, и более устойчивые, ассоциированные с минеральной матрицей. Дополняет картину негидролизующий остаток, представляющий собой ту долю органического вещества, которая не поддается экстракции ни кислотами, ни щелочами и характеризует наиболее конденсированные и стойкие компоненты гумуса (Тюрин, 1951; Пономарева, Плотникова, 1980).

Отдельное направление связано с фракционированием гумусовых веществ по степени окисляемости. В отечественной школе почвоведения применялся бихроматный метод И.В. Тюрина, модифицированный С.И. Савичем и С.Н. Соколовым, позволяющий разделять органическое вещество на части, различающиеся по устойчивости к химическому окислению бихроматом кальция.

В основе метода лежит различная устойчивость органических соединений к окислению $K_2Cr_2O_7$ в различных временных и температурных интервалах: трудноокисляемые соединения выделяются при 30-минутном нагревании при постоянной температуре 150-160°C, что соответствует полному окислению органического вещества, соединения этой группы соответствуют лигнинам, негидролизующему остатку при фракционировании. Среднеокисляемые соединения выделяются при пятиминутном окислении и соответствуют большинству соединений почвенного гумуса, а также липидам и некоторым полисахаридам. Легкоокисляемые соединения, выделяемые при 10-минутном окислении бихроматом кальция при комнатной температуре соответствуют большинству углеводов и другим соединениям с высокой биологической доступностью, достигающих высоких концентраций в свежих органических – животных и растительных остатках (Соколов, 2009; Савич и др., 1980).

В последние годы всё большее развитие получили методы физического фракционирования ПОВ, позволяющие выделять так называемые структурные пулы углерода, различающиеся по степени разложения, пространственной локализации и доступности для микроорганизмов (Семенов, 2023а; Lavallee et al., 2019). Наиболее общепринято выделение двух ключевых пулов: частично разложившегося органического вещества (particulate organic matter, POM) и минерал-ассоциированного органического вещества (mineral-associated organic matter, MAOM).

Пул POM включает свежие и частично разложившиеся растительные остатки, как свободные в почвенной массе, так и окклюзированные в агрегатах. Он считается относительно лабильным и характеризуется средним

временем оборота от нескольких лет до десятилетий. Напротив, пул МАОМ представлен тонкодисперсным органическим веществом преимущественно микробного происхождения, сорбированным на минеральных частицах. Благодаря физико-химическим взаимодействиям органики и минералов МАОМ формирует более стабильный резерв углерода с временем существования от десятилетий до столетий (Семенов и др., 2023б).

Функциональная роль этих пулов различна: РОМ отражает фазу активного поступления и минерализации углерода, в то время как МАОМ отвечает за его долговременное депонирование. При этом МАОМ демонстрирует тенденцию к насыщению, ограниченному свойствами минеральной матрицы (Georgiou et al., 2025), тогда как РОМ, менее связанный с минеральной частью, теоретически может накапливаться без ограничений (Холодов, 2023).

Изучение почвенного органического вещества в западных ландшафтах долгое время велось преимущественно в рамках классической гумусовой парадигмы, где внимание сосредоточивалось на составе, фракциях и механизмах гумификации. Однако современная повестка выходит за пределы этого круга вопросов. Сегодня почвы рассматриваются не только как объект локальных почвенно-генетических процессов, но и как активный компонент глобального углеродного цикла. Их способность аккумулировать и сохранять углерод напрямую связывается с проблемами климатических изменений и задачами их смягчения. В связи с этим в научный оборот входят новые категории – «секвестрация» и «депонирование углерода», отражающие не только внутренние свойства гумусового состояния почв, но и их роль в глобальном углеродном балансе и международных инициативах по управлению углеродом (Chizen, 2024; Don et al., 2023; Когут и др., 2020).

Секвестрация углерода – процесс фиксации атмосферного CO_2 в органическом веществе растений и его последующее включение в состав почвы. Секвестрированный углерод сохраняется в почвенных горизонтах от нескольких лет до десятилетий и отражает баланс между поступлением органических остатков и их минерализацией (IPCC, 2001; Когут и др., 2020).

Депонирование углерода подразумевает долговременное накопление органического вещества в формах, устойчивых к разложению: это могут быть органо-минеральные комплексы (МАОМ), глубинные погребённые горизонты или особо конденсированные соединения. Такой углерод исключён из быстрого биологического оборота и может сохраняться сотни и тысячи лет (Lavalley et al., 2019; Семенов и др., 2023).

Ключевое значение в этих процессах имеет стабилизация углерода - совокупность механизмов, препятствующих быстрой минерализации

органических соединений. Она включает физическую защиту (окклюзия РОМ в агрегатах), химико-минеральные взаимодействия (сорбция и комплексообразование с минералами) и биохимическую трансформацию органики в более стойкие соединения (Six et al., 2002; Cotrufo et al., 2013).

Для оценки возможностей почв в регулировании углеродного цикла вводится понятие секвестрационного потенциала – максимально возможного количества углерода, которое почва способна аккумулировать при данных природных и хозяйственных условиях. Этот потенциал ограничен как климатическими факторами (температура, влажность), так и свойствами почвенной матрицы (ёмкость сорбции, содержание глины, степень насыщения минеральных поверхностей органикой) (Georgiou et al., 2025).

Анализ почвенного органического вещества через призму секвестрации, депонирования и механизмов стабилизации позволяет оценить не только внутреннюю структуру ПОВ, но и потенциал различных типов почв и ландшафтов к аккумуляции и сохранению углерода. Это особенно важно при изучении вклада почв в глобальный цикл углерода и при разработке природоохранных и агротехнических стратегий смягчения климатических изменений (Когут и др., 2021; Don et al., 2023).

1.3. Органическое вещество почв ландшафтов западных комплексов

Особенные условия формирования гумуса западных почв отмечены ещё в работах классиков. В.В. Докучаев, в «Русском черноземе» указывает на формирование в переувлажнённых по весне почвах «котловинок» крайне маломощного органического горизонта мощностью 5-15 см над осветлённым горизонтом легкого гранулометрического состава, по всей видимости, описывая почвы, относимые в современной Классификации и диагностики почв России к солодам (2004).

Первые предметные исследования гумусового состояния луговых почв лесостепи проводились И.В. Тюриным (1937) и Н.Н. Розовым (1939), указавшим на исключительную мощность гидроморфных черноземовидных почв Окско-Донской равнины, превосходящих окружающие черноземы по запасам гумуса, что было подтверждено при изучении луговых лесостепных почв Заволжья П.М. Новиковым (1952), указывавшим на большую мощность гумуса в поверхностном горизонте, превышающую окружающие черноземы.

Изучение гумусного состояния луговых почв лесостепи Приднепровской низменности проводились под руководством К.К. Гедройца

(1930), И.Я. Григоренко, С.С. Раевской (1930), указывавших на меньшее содержание в них гумуса по сравнению с окружающими черноземами ввиду более легкого гранулометрического состава.

Органическое вещество осолоделых почв западин исследовалось Б.П. Ахтырцевым и Кадером (1967), описавших крайне богатый органическим углеродом поверхностный горизонт, морфологически представленный преимущественно грубым гумусом. Отмечено резкое снижение содержания углерода с глубиной и некоторое его возрастание в срединном горизонте, что может указывать на действие иллювиального процесса.

Исследования луговых почв Тамбовской равнины Л.М. Дмитракова и Е.М. Самойловой (1973) указывают на обогащение органическим веществом верхних горизонтов луговых почв до глубины 20-30 см. При этом с глубиной 40-50 см обследованные автоморфные аналоги содержат больше гумуса. Обогащение органическим веществом этих горизонтов в значительной степени связано накоплением полуразложившихся растительных остатков, свойственным гидроморфным почвам, что было подтверждено результатами микроморфологических исследований (Макеева и др., 1975; Ярилова и др., 1975). Показано, что распределение органического вещества в луговых почвах прямо связано с распределением корней в профиле (рис. 1). Высказано предположение, о реликтовом характере органического вещества в нижней части гумусового горизонта, подтверждённое результатами радиоуглеродного датирования (Рубилин, Козырева, 1974). Отмечено, что в более или менее выщелоченных луговых почвах с относительно глубоким (>5 м) уровнем залегания грунтовых вод в более отдалённых местах отмечается распределение гумуса более близкое к чернозему (Самойлова, 1981).

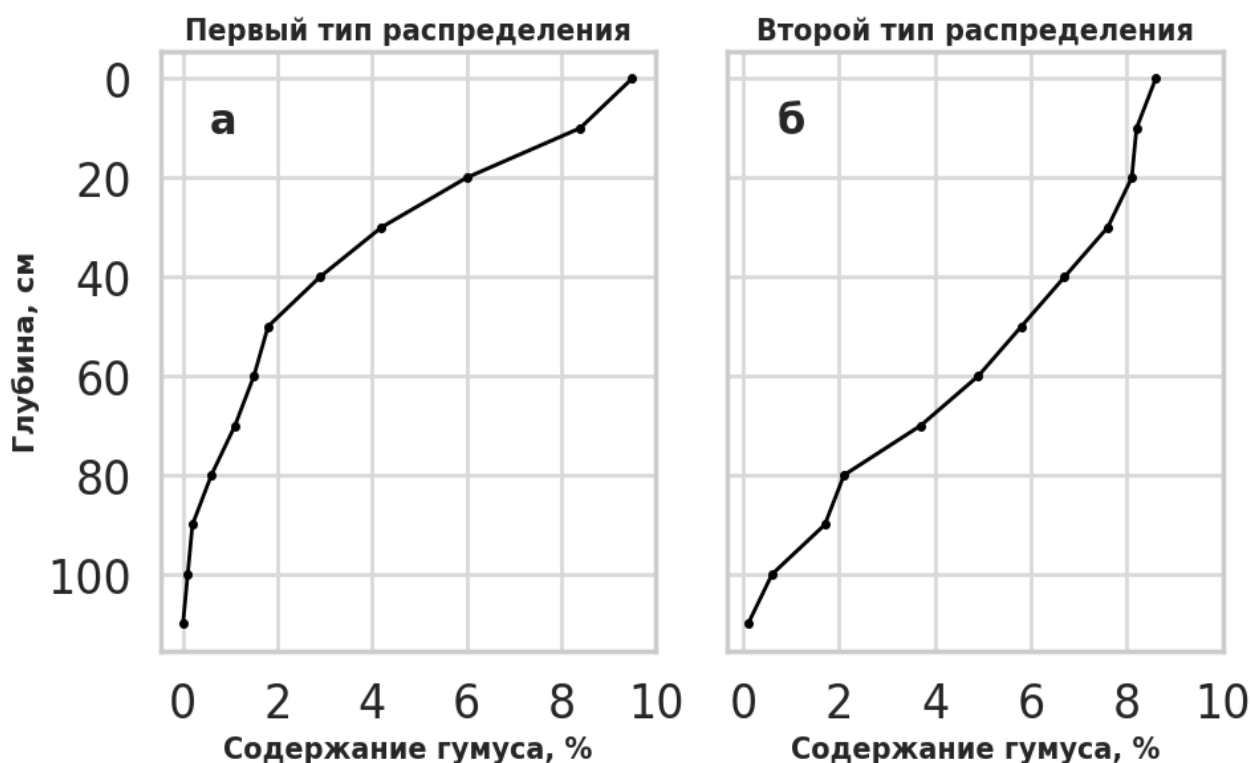


Рисунок 1. Основные типы распределения гумуса в профиле луговых почв западных комплексов Тамбовской лесостепи по данным Е.М. Самойловой: полугидроморфные черноземно-луговые почвы (а); выщелоченные лугово-черноземные почвы (б)

Исследованию гумусного состояния луговых почв тамбовской лесостепи посвящена диссертация Л.М. Дмитракова (1973). Высказывалось предположение о более полном протекании процесса гумусообразования в луговых почвах по сравнению с их черноземными аналогами. Автоморфные аналоги луговых почв Тамбовской лесостепи – типичные и выщелоченные черноземы имеют фульватно-гуматный и гуматный состав гумуса (Бирюкова, Орлов, 2004). В верхних горизонтах отношения Сгк:Сфк изменяются от 1,3 до 2,5, хотя в отдельных работах указывается и на более высокие значения этого отношения – до 2,8 (Шевченко, Щербаков, 1984).

В работах Дмитракова (1973, 1974) показано, что по групповому составу гумуса черноземно-луговые почвы близки к типичным чернознам; гуминовые кислоты преобладают над фульвокислотами, а отношение Сгк:Сфк более широкое по сравнению с чернознами. В пределах всего гумусового горизонта оно близко к 2 или превышает его. Осолоделые почвы отличаются относительно сниженным содержанием органического вещества. Л.М. Дмитраковым установлено, что солоды лесостепи отличаются невысокими запасами гумуса из-за малой мощности гумусированного горизонта (до 100 т/га в 0–50 см). Максимальное накопление углерода отмечается в горизонте А₁, где его содержание достигает до 10%

органического вещества, тогда как в элювиальном горизонте оно резко снижается и лишь частично возрастает в иллювиальном. В гумусе солодей доминируют фульвокислоты, главным образом их наиболее подвижные фракции, тогда как доля гуминовых кислот невелика. Лишь в горизонте А₁ соотношение Сгк:Сфк может превышать единицу. Для осолоделых почв характерно сужение этого соотношения, увеличение содержания бурых гуминовых кислот и накопление негидролизуемых соединений в верхней части профиля, что автор связывает с влиянием процессов осолодения.

Е.М. Самойлова (1981) указывает на «характернейшее свойство» органического вещества всех луговых почв западных комплексов тамбовской лесостепи – расширение отношения Сгк:Сфк в нижней части гумусового горизонта до глубины 50 см, связывая фульватность верхней части профиля с высокой долей «молодого» органического вещества корневых остатков. Миграционная подвижность органического вещества почвы была принята невысокой по данным лизиметрических исследований (Бугаевский, 1972).

Показано, что в групповом составе луговых почв преобладает фракция связанная с кальцием (ГК-II), её содержание возрастает вниз по профилю, на глубине 50-70 см достигая 80% от совокупного содержания гумусовых кислот. В верхней части гумусового горизонта луговых почв наибольшая доля принадлежит «свободной» фракции гумусовых кислот ГК-I, отличающей эти почвы от черноземов (Самойлова, 1981) ввиду гидроморфизма и консервации процессов разложения органического вещества (Орлов, 1974). Показано, что убывание ГК-I с глубиной связано с ростом содержания карбонатов в профиле – в результате распределение этой фракции в осолоделых почвах и солодах более равномерно по глубине (Дмитраков, 1973). В работах Е.М. Самойловой не выявлено закономерностей в профильном распределении фульвокислот всех фракций, как и о количестве углерода в декальцинате.

Наиболее высокое содержание негидролизуемого остатка (до 40%) отмечено в засоленных почвах, в луговых незасоленных содержание гумина достигало 20-30%.

В работах Е.М. Самойловой, А.И. Зубковой и Н.Ф. Черкашиной (1970) и Л.М. Дмитракова (1973) показано, что содержание и запас гумуса в солонцах западных комплексов значительно ниже, чем в луговых почвах тех же комбинаций. Соотношение С:N в то же время значимо не отличается от такового в незасоленных луговых почвах. Примечательно, что по результатам этих исследований накопление гуминовых кислот отмечено именно в подсолонцовом горизонте, несмотря на высокую щёлочность среды и значительную степень насыщенности обменным натрием, составляющего до

50% суммы поглощенных оснований (Самойлова, 1981). Это указывает на специфику гумификации в данных условиях, когда наиболее стойкие компоненты органического вещества закрепляются в труднодоступной среде. Аналогичные закономерности были выявлены и в луговых солонцах Западно-Сибирской лесостепи (Базилевич, 1965). Соотношение и профильное распределение фракций гуминовых кислот в целом соответствует таковому в луговых незасоленных почвах. В отличие от луговых незасоленных почв в солонцах выделяется явное преобладание фракции фульвокислот, связанной с ГК-1. По сравнению с гуминовыми кислотами её относительное содержание меняется вниз по профилю слабее, хотя тенденция к уменьшению всё же фиксируется. По предположению Е.М. Самойловой (1981) накопление гумусовых веществ в подсолонцовом горизонте имеет реликтовый характер и связано с предшествующей – луговой стадией формирования солонца, ГК-II является основной фракцией в подсолонцовом горизонте (Градобоев, 1970). Показано, что ГК-II в подсолонцовом горизонте имеют средний возраст >7000 лет, что более чем в 3 раза старше ГК-II, выделенных из солонцового горизонта.

Таким образом, засоление приводит к сокращению запасов гумуса, сужению соотношения Сгк: Сфк и смещению состава гумусовых веществ в сторону более подвижных форм ПОВ.

Е.М. Самойловой и Л.В. Дмитраковым также впервые исследованы особые свойства полугидроморфных лесостепных почв, подверженных распашке: показано, что соотношение Сгк:Сфк всех луговых почв снижается в пахотных горизонтах, связывая это с тем, что распашка способствует фульватизации гумуса и ускоренной минерализации органического вещества. Отмечается, что «в целинных вариантах сохраняется реликтовый гумус, тогда как в пахотных почвах возрастает доля бурых гуминовых кислот и легкоокисляемых соединений», а «агротехника приводит к смещению состава гумуса в сторону менее устойчивых фракций».

Отмечено характерное увеличение мощности гумуса луговых почв Окско-Донской низменности по сравнению с аналогичными почвами Центральной Европы и Приднепровской низменности. Установлена тенденция увеличения процентного содержания и запасов гумуса в луговых почвах с ростом континентальности климата с запада на восток (Самойлова, 1981).

Известно, что режим влажности и аэрации является одним из основных факторов, регулирующих скорость и характер минерализации и стабилизации растительных остатков (Александрова, 1970, 1980). Степень стабилизации почвенного органического вещества зависит от соотношения процессов

анаэробноз, достигая максимальной выраженности при периодическом насыщении почвы водой с последующим ее полным иссушением (Дюшофур, 1970; Jilling et al., 2024).

А.Б. Ахтырцев продемонстрировал, что именно такие условия складываются в «переувлажненных землях» - западных ландшафтах лесостепи, но степень выраженности их, соотношение увлажнения и аэрации почв неодинаковы и зависят от условий дренированности.

В почвах западных комплексов лесостепи отмечается промывной, застойно-промывной и водозастойный водные режимы (Филь, 2025).

А.Б. Ахтырцев (1999) в диссертации приводит подробное описание гумусного состояния полугидроморфных и гидроморфных почв лесостепи Русской равнины. А.Б. анализирует факторы формирования ПОВ луговых почв лесостепи в условиях гидроморфизма. В анализ были включены массовые данные по сотням разрезов, обработанные методами вариационной статистики. Рассматривались мощность гумусового горизонта, содержание и запасы гумуса, распределение органического вещества по профилю относительно верхнего слоя, а также состав гумуса по схеме Тюрина-Пономарёвой.

А.Б. Ахтырцевым установлено, что гумусное состояние почв лесостепи определяется степенью гидроморфизма не менее существенно, чем зональными биоклиматическими условиями. Показано, что режим влажности и доступа воздуха регулирует скорость и характер гумификации растительных остатков; степень гумификации же достигает максимального выражения при периодическом чередовании иссушения-увлажнения.

На большом массиве статистических данных было доказано, что наиболее гумусированными почвами лесостепи являются не автоморфные чернозёмы, а полугидроморфные лугово-чернозёмные почвы (рис. 2). Автором показано, что они обладают большей мощностью гумусового горизонта (до 90–97 см), более высоким содержанием гумуса (8,7–8,9% в пахотном слое) и запасами до 700–750 т/га. Впервые высказано предположение о том, что оптимальные условия гумусонакопления формируются при небольшом поверхностном дополнительном увлажнении и глубине грунтовых вод 3–5 м.

А.Б. Ахтырцевым показано, что при дальнейшем нарастании гидроморфизма и подъёме уровня грунтовых вод происходит формирование чернозёмно-луговых почв, которые начинают постепенно уступать лугово-чернозёмным по мощности гумусового горизонта и запасам. Установлено, что в чернозёмно-влажно-луговых почвах наблюдается сокращение мощности

гумусового горизонта на 30–40 см и уменьшение запасов гумуса на 250–300 т/га. Отмечено, что в этих почвах характерно очень высокое содержание гумуса в верхнем 0–20 см слое (до 11,1%) и резкое его снижение с глубиной – почти в 5 раз на глубине 50–60 см.

На основании сопоставления данных о составе гумуса автором установлено, что для автоморфных чернозёмов характерен гумус гуматного типа с отношением Сгк:Сфк 1,8–2,5 и преобладанием гуминовых кислот, связанных с кальцием (ГК-II). Впервые показано, что в лугово-чернозёмных почвах возрастает доля гуминовых кислот до 43-57%, уменьшается доля фульвокислот до 18-25%, а отношение Сгк:Сфк увеличивается до 2,1-3,0.

А.Б. Ахтырцевым выявлено, что чернозёмно-луговые почвы достигают максимума по содержанию гуминовых кислот (51-58%) при расширении отношения Сгк:Сфк до 3-4. Одновременно установлено увеличение роли гумусовых кислот фракции 3 и подвижных фракций. Этот вывод совпадает с результатами исследований Л.М. Дмитраковой и Е.М. Самойловой, также высказавших предположение о расширении соотношения Сгк:Сфк в почвах – гидроморфных аналогах черноземов.

Самойлова выделяет более высокую долю «свободных» ГК-I в верхней части профиля луговых почв, тогда как у Ахтырцева эта фракция остаётся очень низкой (5–12%). Несоответствие, вероятно, объясняется региональными различиями гумусонакопления, поскольку в работе А.Б рассматриваются почвы Среднерусской равнины и северной части Окско-Донской низменности, тогда как Е.М. рассматривает почвы в её южной части.

Впервые высказано положение, что при переходе к чернозёмно-влажно-луговым почвам происходит резкое ухудшение условий гумификации: доля гуминовых кислот снижается до 38–50%, отношение Сгк:Сфк уменьшается до 1,7–2,0, возрастает содержание подвижных фракций (35–51%), а роль кальций-связанных форм резко сокращается. Автором сформулирована гипотеза, что постоянная высокая влажность уменьшает интенсивность биохимических процессов, способствует накоплению негидролизуемого остатка и ведёт к смещению типа гумуса от гуматного к фульватно-гуматному.

Сделан вывод, что полугидроморфные условия в почвах лесостепи являются оптимальными для стабилизации гумуса и его накопления, тогда как дальнейшее усиление гидроморфизма приводит к снижению содержания и запасов почвенного углерода. Экологический оптимум гумификации соответствует черноземно-луговым почвам с уровнем грунтовых вод от 3 до 6 м.

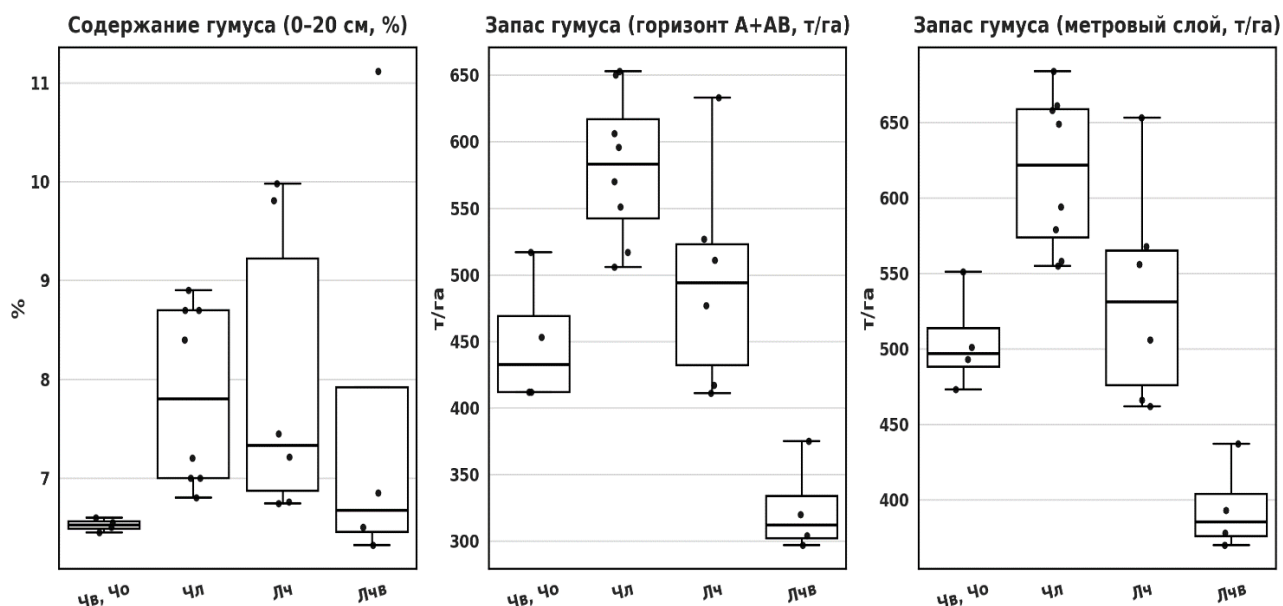


Рисунок 2. Результаты определения содержания и запасов гумуса в верхних гумусовых горизонтах и в метровом слое в почвах черноземного ряда возрастающего гидроморфизма Русской равнины по результатам сводного анализа А.Б. Ахтырцева. (Составлено по докторской диссертации А.Б. Ахтырцева (1999))

А.Б. Ахтырцев указывает, что состав гумуса черноземно-луговых солонцов фульватно-гуматный в верхних горизонтах, и гуматно-фульватный в солонцовых (Ахтырцев и др., 2004).

Упомянуто, что «лугово-чернозёмные почвы в пахотном состоянии сохраняют очень высокое содержание гумуса в верхнем 0-20 см слое, однако быстрее теряют углерод в нижних горизонтах» по сравнению с автоморфными аналогами. А.Б. отмечал также, что «в пахотных почвах отношение Сгк:Сфк сужается, доля подвижных гуминовых кислот I фракции снижается», и делал вывод о том, что сельскохозяйственное освоение переувлажненных земель усиливает воздействие гидроморфизма и снижает устойчивость гумусового состояния.

Т.В. Красина (2014) описала гумусное состояние черноземов типичных и оподзоленных, а также их гидроморфных аналогов – черноземовидных глееватых почв в юго-восточной части Тамбовской равнины. В описанных почвах – гидроморфных аналогах глубина уровня грунтовых вод достигает 1,5-4 м, что по степени увлажнения соответствует преимущественно черноземно-луговым почвам, описанным в работах Е.М. Самойловой и А.Б. Ахтырцева. В автоморфных черноземах глубина залегания грунтовых вод достигает 10 м и более.

По данным Т.В. Красиной в гидроморфных почвах юго-восточной части Тамбовской равнины в условиях гидроморфизма общее количество гумуса в верхних горизонтах черноземовидных оглеенных почв достоверно уменьшается на 10-20% по сравнению с чернозёмом типичным. Красина также подтверждает повышение гуматности гумуса при повышении увлажнения, отмечается, что гумус переходит из гуматно-фульватного в гуматный, а отношение Сгк:Сфк достигает 2.

Установлено, что общее содержание ПОВ и степень его гуматности последовательно снижаются от черноземовидной слабосолонцеватой слабооглеённой почвы к солонцу черноземовидному глееватому. В солонце черноземовидном глееватом, за исключением пахотного горизонта, гумус приобретает фульватный тип. В составе фульвокислот преобладает II фракция, ассоциированная с кальцием, более агрессивные фракции I и Ia вымываются вниз по профилю. В составе гуминовых кислот также доминирует II фракция, тогда как I фракция в условиях щёлочной реакции совместно с фульвокислотами мигрирует по профилю в нижние горизонты. Доля III фракции и нерастворимого остатка в солонцах черноземовидных глееватых остаётся небольшой (совокупно не более 20%), что указывает на высокую подвижность почвенного органического вещества в условиях заболачивания гидрокарбонатно-натриевыми водами.

В работе утверждается доминирование второй фракции ГК во всем профиле большинства гидроморфных почв черноземного ряда. Только в черноземовидной оподзоленной глееватой почве достигается описанное в более ранних работах (Самойлова, 1974) преобладание I-фракции ГК в верхних горизонтах и ее постепенное снижение вниз по профилю с пропорциональным возрастанием участия доли ГК-II в фракционном составе ПОВ. В остальных исследованных автоморфных и гидроморфных почвах с поверхности содержание фракции ГК-II кратно превышает ГК-I, с глубиной их соотношение еще более возрастает (рис. 3).

Абсолютное содержание всех фракций фульвокислот также заметно убывает с глубиной, однако значительно менее интенсивно чем гуминовые кислоты. ФК-I, ФК-Ia и ФК-III распределены по профилю относительно равномерно, их абсолютное содержание не изменяется либо возрастает с глубиной в черноземовидной глубокооглеенной почве.

Т.В. Красиной указывается на относительную активность внутрипрофильной миграции гумусовых веществ – преимущественно более лабильных, что расходится с представлениями Е.М. Самойловой (1981) о малой радиальной подвижности почвенного органического вещества в профиле. Расхождения во взглядах на миграционную способность

органического вещества, вероятно, связано с региональными особенностями обеих работ. Луговые почвы, описанные Т.В. отличаются более высоким уровнем грунтовых вод и несколько более высокой степенью гидроморфизма, гумус отличается большей фульватностью. Кроме того, в работе Т.В. показано, что существенный вклад в повышение миграционной способности гуматных веществ – свободной фракции ГК-I вносит осолонцевание.

Т.В. отмечала, что «в пахотных почвах наблюдается снижение содержания органического вещества в верхних горизонтах по сравнению с целинными», а «агротехника усиливает внутрипрофильную миграцию гумусовых веществ, особенно подвижных фракций фульвокислот, что приводит к снижению доли ГК-III и гумина».

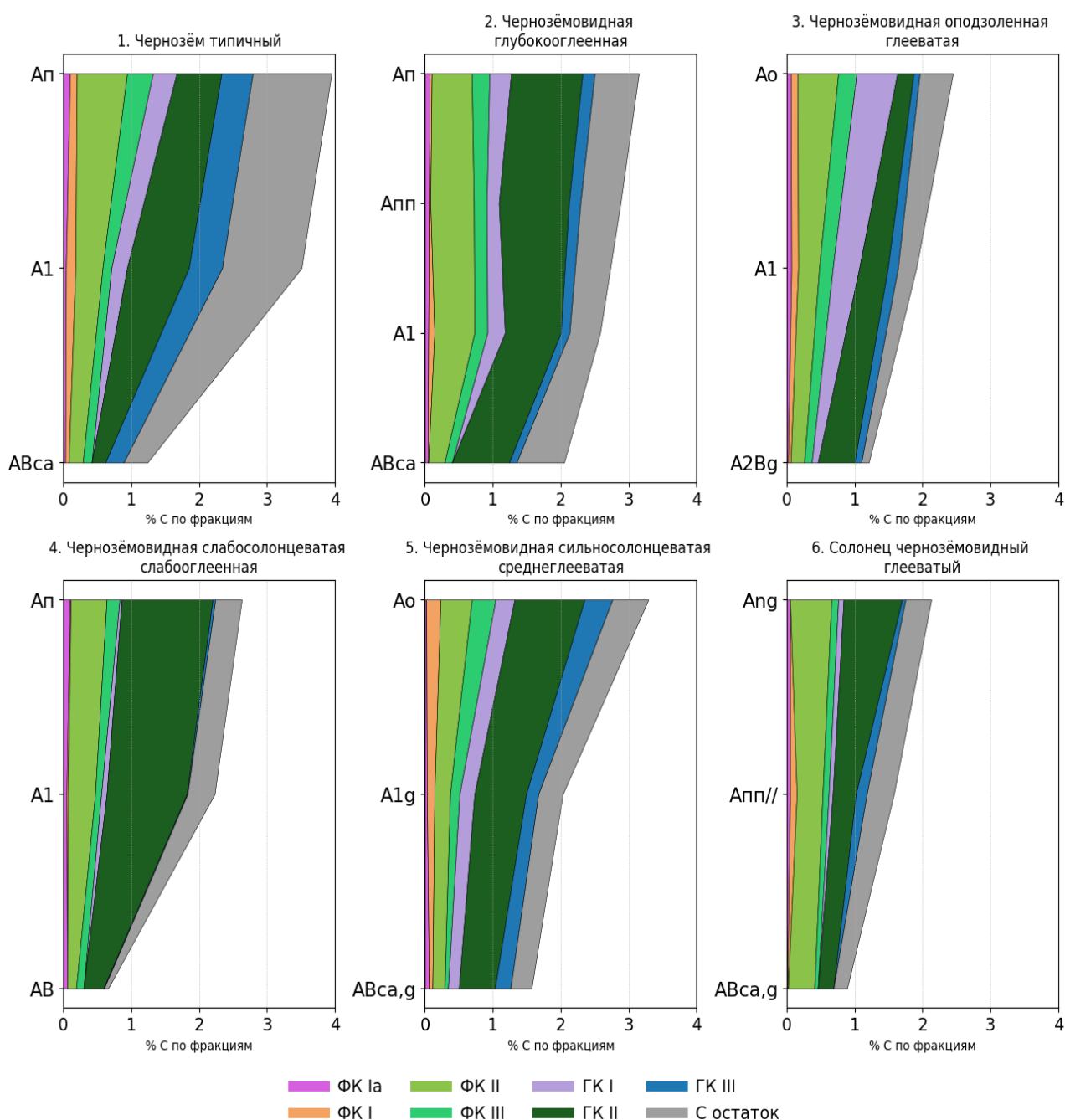


Рисунок 3. Фракционный состав гумуса по данным Т.В. Красиной (2014) в гумусированной части профиля почв юго-востока Тамбовской равнины (приведены абсолютные значения фракций гумуса, %). Почвы: 1 – чернозем типичный; 2 - черноземовидная глубокооглеенная; 3 – черноземовидная оподзоленная глееватая; 4 – черноземовидная слабосолонцеватая слабооглеенная; 5 – черноземовидная сильносолонцеватая среднеоглеенная; 6 – солонец черноземовидный глееватый.

Таким образом, работы, посвященные гумусному состоянию гидроморфных и полугидроморфных почв лесостепи Русской равнины, показывают, что максимум гумусонакопления связан не с автоморфными чернозёмами, а с полугидроморфными лугово-чернозёмными почвами при умеренно глубоком уровне грунтовых вод (около 3–6 м): в них выше мощность горизонтов А+АВ, содержание и запасы углерода, а сам гумус более гуматный с расширенным отношением С_{гк}:С_{фк} и ведущей ролью ГК-II (Ахтырцев, 1999; Самойлова, 1981). По мере усиления гидроморфизма и подъёма грунтовых вод при переходе к чернозёмно-луговым и чернозёмно-влажнoluговым почвам наблюдаются уменьшение мощности и запасов, очень высокая гумусность верхнего слоя 0–20 см и быстрое падение Сор_г с глубиной; в осолоделых и солонцовых вариантах верх профиля фульватизируется, а в подсолонцовых зонах возможна аккумуляция ГК реликтового происхождения (Митракова, 1973; Самойлова, 1981). При более высоком уровне грунтовых вод содержание гумуса значительно снижается (Красина, 2014).

Если Е.М. Самойлова отмечает, что верхние горизонты луговых почв содержат заметную долю ГК-I, что связывается с гидроморфизмом и консервацией разложения, то у А.Б. Ахтырцева вклад ГК-I меньше (5–12%) при общем преобладании ГК-II (Самойлова, 1981; Ахтырцев, 1999). В юго-восточной части Тамбовской равнины Т.В. Красина фиксирует статистически значимое снижение содержания органического углерода в верхних горизонтах чернозёмовидных оглеённых и солонцеватых оглеённых почв на 10–20% относительно чернозёма типичного, смещение состава к более подвижным фракциям (рост доли ФК I–Ia, сокращение ГК-III и гумина) и выраженную внутрипрофильную миграцию гумусовых веществ, особенно при осолонцевании (Красина, 2014). Эти эффекты слабее выражены на более дренированных участках, в менее гидроморфных почвах, рассмотренных в работах Самойловой (1981) и Ахтырцева (1999).

Авторы едины в том, что сельскохозяйственное использование гидроморфных и полугидроморфных почв ведёт к фульватизации гумуса, усилению миграции подвижных фракций и снижению доли устойчивых форм.

Органическое вещество почв прерийных подхоллов

Одним из наиболее изученных и близким по ландшафтным условиям к западным урочищам лесостепной части Окско-Донской низменности является регион «прерийных подхоллов» (PPR) в северной части Великих Равнин Североамериканского континента, однако формирующийся в условиях более высокого и устойчивого увлажнения (рис. 4). В наиболее влажных западных и северных частях региона днища большинства подхоллов - западин остаются стабильно затопленными на протяжении летнего периода, в них формируются болотные экосистемы (Hayashi et al., 2016, Chizen et al., 2025). Подхоллы считаются гидрологически изолированными в течение всего сезона, за исключением экстремально влажных лет (Hayashi et al., 2016).

Почвы этого региона по классификации WRB преимущественно относятся к реферативной почвенной группе Chernozems (USDA: Mollisols). В пределах ареала прерийных подхоллов прослеживается климатический градиент: друг друга сменяют почвенные подзоны Brown (Бурые – чернозёмы сухих степей), Dark Brown (тёмно-Бурые чернозёмы умеренно засушливых степей), Dark Grey (примено соответствуют выщелоченным черноземам и темно-серым лесным почвам лесостепи) и Black (чернозёмы влажной лесостепи) – примерно соответствующие выщелоченным и оподзоленным черноземам, однако, с менее выраженным подзолистым процессом (Mitchel, 2024; Chizen et al., 2025). Сменяющие друг друга почвенные зоны отражают переход от засушливых степей к более влажной лесостепи на севере Канадских прерий – основой выделения почвенных групп является цвет верхнего горизонта почв, наиболее богатого ПОВ (Pennock et al., 2010). В целом переход почвенных зон соответствует таковому на Русской равнине за исключением более резкого роста увлажнения, при движении с юга на север как в западном, так и в восточном направлении.

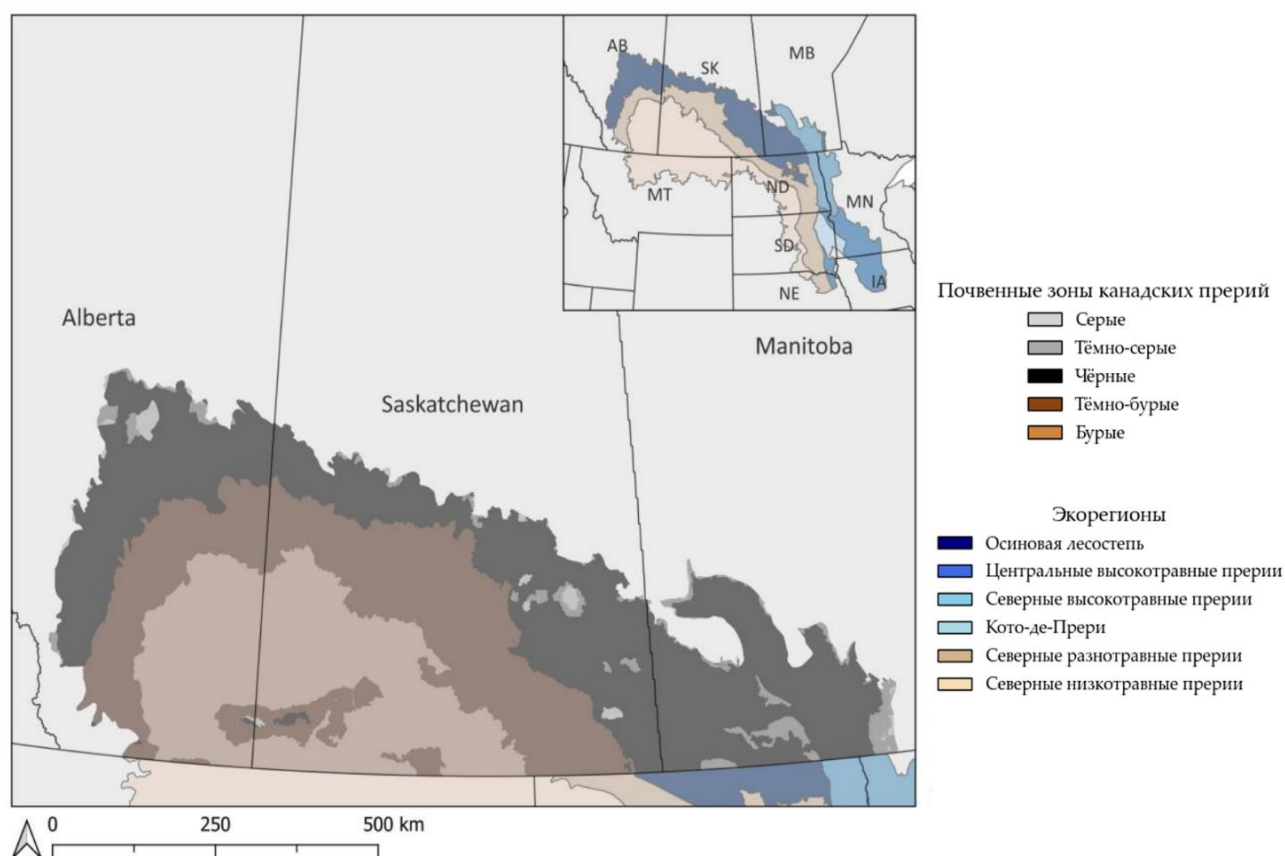


Рисунок 4. Экорегии и почвенные зоны канадской части Великих равнин в пределах ареала прерийных подголов (Составлено по Chizen et al., 2024).

В орографических понижениях эти почвы приобретают признаки периодического переувлажнения: формируются гидроморфные чернозёмы и лугово-чернозёмные почвы с признаками оглеения и соответствуют реферативной почвенной группе Gleysols. В наиболее увлажнённых участках западин – в их центральной части формируются Histosols с мощными (более 40 см) торфяными и перегнойными горизонтами, однако чаще органическое вещество накапливается в минеральных почвах в виде мощного гумусового горизонта.

Для этих почв характерны органоминеральные горизонты мощностью до 60-80 см на равнинах с содержанием ПОВ 4-6%, особенно там, где исторически произрастали высокотравные прерии

На целинных участках прерий почвенное органическое вещество накапливается в результате высокой продуктивности опада и значительной мощности корневых систем травянистых растений – преимущественно злаков (Millett et al., 2009; Pennock et al., 2010).

В восточной части региона высокотравная растительность формирует значительные объёмы органических остатков, поэтому там формируются

наиболее мощные и темные органоминеральные горизонты – зона Black по Канадской классификации (Chizen, 2025).

В западной части Великих Равнин, в условиях сухого климата и более низкой биологической продуктивности травянистых сообществ (*shortgrass prairie*), поступление растительного опада меньше, а разложение идёт быстрее, поэтому гумусовых веществ скапливается меньше, а органоминеральный горизонт окрашен более светло и имеет каштановый или бурый оттенок. Региональный градиент увлажнения и продуктивности растительности напрямую отражается на содержании углерода в почвах. Средние запасы почвенного углерода в верхних горизонтах понижений статистически выше в экорегионах высокотравных прерий, чем в засушливых короткотравных степях, что согласуется с влиянием климата и биомассы растительности (Pennock et al., 2010; Vansal et al., 2021).

Западинные ландшафты прерий отличаются исключительной пространственной пестротой и мозаичностью, обусловленной микрорельефом (Bedard-Naughn, 2009). На небольших расстояниях – десятки – первые сотни метров соседствуют дренированные возвышенности и заболоченные понижения. Водораздельные поверхности и выпуклые формы рельефа дренируются лучше: здесь формируются типичные степные почвы с относительно низким содержанием органического вещества (в среднем 2,5-5% С в органоминеральном горизонте) (Brown et al., 2017; Chizen et al., 2024). В понижениях влажность выше, грунтовые воды подходят ближе к поверхности, что создает анаэробные условия и замедляет разложение органики. В результате почвы западин функционируют как т.н. «ловушки углерода», где накопление органического вещества превышает скорость его минерализации (Chizen et al., 2024).

По классификации Стюарта и Кантеруда (1971) западины прерийных подхоллов подразделяются по продолжительности периода затопления. Эфемерно-затопленные (*ephemeral*) западины высыхают менее чем через месяц после снеготаяния; временно-затопленные (*temporary*) остаются затопленными в течение 1–2 месяцев после схода снежного покрова; сезонно-затопленные (*seasonal*) остаются затоплены на протяжении значительной части вегетационного периода; «полупостоянно»-затопленные (*semi-permanent*) и постоянно-затопленные (*permanent*) остаются затопленными в течение всего вегетационного периода, при этом последние не осушаются даже в самые сухие годы. Эти классы отражают не только различия продолжительности периода переувлажнения, но и связанные с ними особенности растительности, почвообразования и накопления почвенного органического вещества.

Содержание и распределение почвенного углерода напрямую связано с типом переувлажнения (рис. 5). Эфемерно-затопленные западины наиболее бедны органикой: после весеннего снеготаяния они достаточно быстро переходят в аэробное состояние и накопленные растительные остатки оказываются подвержены интенсивному микробиологическому разложению. Почвы временно-затопленных западин содержат несколько больше углерода по сравнению с их автоморфными аналогами, но морфологически их профили схожи. Максимальное накопление ПОВ характерно для почв сезонно-затопленных и постоянно-затопленных западин: длительный период переувлажнения поддерживает анаэробные условия и замедляет разложение органики, поэтому верхняя часть профиля этих почв представлена наиболее темными и мощными органоминеральными горизонтами. В пределах почвенной зоны Black такие почвы характеризуются также наибольшими запасы углерода: по данным Chizen et al. (2024), Почвы сезонно-затопленных западины содержат углерода в несколько раз больше, чем почвы эфемерно-затопленных. Таким образом, углеродное состояние подходов определяется не только климатической зональностью (Brown, Dark Brown, Black), но и конкретным гидрологическим классом западины, при этом именно сезонные «заболоченные земли» выступают как главные аккумуляторы углерода в пределах PPR.

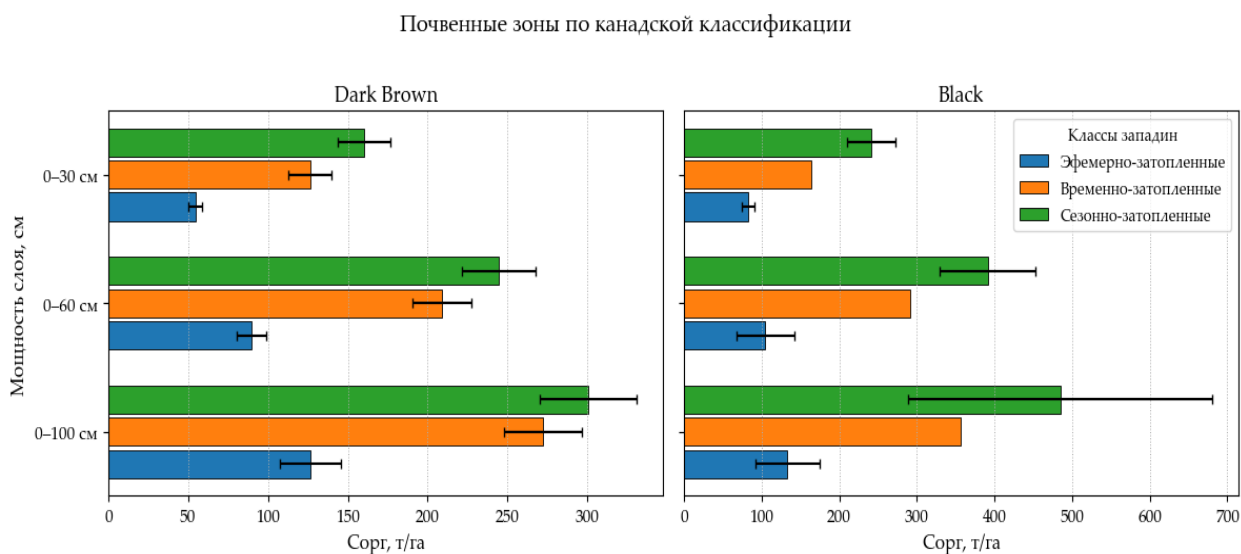


Рисунок 5. Запасы углерода в почвах западин региона прерийных подходов в почвенных зонах Dark Brown (слева) и Black (справа) в зависимости от классов западин в слоях 0-30, 0-60 и 0-100 см (Составлено по Chizen et al., 2024).

Стюарт и Кантеруд (1971) при классификации западинных ландшафтов отмечали, что в наиболее долго затопляемых полупостоянных водно-болотных угодьях (semi-permanent wetlands) формируется богатый органикой поверхностный горизонт высокой мощности, тогда как эфемерные (быстро

высыхающие) понижения по свойствам ближе к автоморфным почвам. Чем продолжительнее ежегодный период затопления, тем выше активность накопления ПОВ в анаэробных условиях. Показано, что постоянно затопленные западины благодаря стабильно влажным условиям характеризуются низкими темпами разложения органики и могут сохранять накопленный углерод в течение столетий (Gleason et al., 2008; Huang et al., 2023). Напротив, почвы эфемерно-переувлажненных западин (высыхающие менее чем через месяц после снеготаяния) переходят в аэробное состояние в начале лет, что ускоряет разложение: гумус на их дне быстро минерализуется после высыхания почвы (Gleason et al., 2008).

В почвах западин нередко встречаются погребённые горизонты (Chizen et al., 2024), формируемые в результате интенсивного переноса материала с автономных позиций при снеготаянии. В результате в разрезах в днищах подхоллов на глубинах более 30 см могут обнаруживаться реликтовые темноокрашенные горизонты с высоким содержанием углерода, которое зачастую превышает содержание в современном верхнем горизонте (Chizen et al., 2024). Исследование Korschuh (2013) в Саскачеване показало, что в ряде западин до половины от общего запаса углерода сосредоточено именно в погребенной части почвенного профиля.

В более влажных и прохладных частях прерии – преимущественно зоны Black и Gray – формируются наиболее мощные органоминеральные горизонты за счёт высокой продуктивности трав и замедленного разложения. При этом ПОВ отличается более высокой миграционной способностью из-за сниженной интенсивности разложения и повышения доли лабильных соединений, что способствует проникновению органических соединений глубже по профилю и увеличению мощности органоминерального горизонта (Zhang et al., 2017). Те же закономерности отмечаются для полугидроморфных почв в окраинных частях подхоллов и в нижних частях склонов более сухой части PRR – органическая часть почвы изначально более обогащена лабильными соединениями почвенного гумуса и соединениями POM (Bedard-Naughn et al., 2006; Brown et al., 2017).

Таким образом, почвы подхоллов обогащаются органическим веществом за счет усиления внутренней радиальной и внешней латеральной миграции. В целом микрорельеф обуславливает резкие различия в запасах и распределении почвенного органического вещества: по данным мета-анализов, один лишь гидрологический тип западины (эфемерное, временное, сезонное и т.д.) объясняет до ~27 % вариации запасов углерода в почве. Поэтому современные исследования углеродного баланса рекомендуют учитывать при моделировании ландшафтное положение и гидрологический режим

понижения как ключевые факторы формирования гумусового профиля (Chizen et al., 2024).

Исследования изменения факторов среды на состояние ПОВ подхоллов продемонстрировали, что осушение воздействует на водный и кислородный режим: почвы становятся более аэрированными, и микроорганизмы начинают более интенсивно разлагать ранее законсервированное органическое вещество. Эмиссия CO₂ возрастает, баланс углерода в западинах смещаются: из «аккумуляторов» углерода они превращаются в его источники (Tangen et al., 2015; Tangen & Bansal, 2019). При этом запасы углерода снижаются в долгосрочной перспективе. Наиболее высокие запасы углерода сохраняются только в нетронутых болотцах и прилегающих целинных участках (Bansal et al., 2021).

По данным Euliss et al. (2006), в почвах подхоллов при осушении и последующей распашке теряется в среднем 10 т С/га из верхних 15 см. Совокупные потери для PPR оцениваются в сотни миллионов тонн углерода. Среди причин – сокращение поступления корневых остатков однолетних растений, интенсификация деятельности микроорганизмов в результате аэрации почвы, разрушение агрегатов при вспашке, усиление процессов эрозии (Cortus et al., 2011). В результате запасы углерода в осушенных подхолах со временем приближаются к запасам фоновых почв на склонах (Brown et al., 2017). Осушение дополняет эффект распашки, усиливая перераспределение органики по профилю: часть гумуса мигрирует глубже, достигая срединных горизонтов.

В естественных условиях гумус формируется из устойчивых микробных продуктов и минеральных комплексов (Орлов, 1996). Осушение и распашка подхоллов ускоряют разложение наиболее лабильных соединений в составе ПОВ, смещая состав гумуса в сторону более стабильных соединений, устойчивость которых обусловлена преимущественно физическими механизмами. Спектроскопические исследования фиксируют снижение содержания в поверхностных почвенных горизонтах менее разложившихся остатков и относительное обогащение продуктами микробной трансформации (Chizen et al., 2024). Одновременно меняется почвенная биота, нарушаются циклы углерода и азота: возрастает роль аэробных бактерий, снижается доля грибов и анаэробных микробов, что дополнительно ускоряет минерализацию (Zhao et al., 2022). Соотношение фракций РОМ и МАОМ органического вещества не обнаруживает явных закономерностей при осушении почв подхоллов (Chizen et al., 2024).

Таким образом ненарушенные почвы днищ подхоллов являются основными аккумуляторами почвенного органического углерода для всей территории степной и лесостепной зоны Североамериканского континента.

Западные почвы лесостепи Русской равнины и почвы прерийных подхоллов Северной Америки демонстрируют как общие черты, так и региональные различия в накоплении и трансформации ПОВ. В обоих регионах микрорельеф и режим увлажнения, вместе формирующие водный режим почв, выступают ведущими факторами, определяющими запасы и качество ПОВ: почвы в днищах западин накапливают углерод в условиях анаэробного ингибирования разложения растительных остатков; органоминеральные горизонты полугидроморфных почв автономных позиций содержат меньше лабильных соединений характеризуются более устойчивыми формами ПОВ.

В западных комплексах лесостепи Русской равнины и Великих Равнин Североамериканского континента различаются оптимальные условия стабилизации и накопления почвенного органического вещества. Для лесостепных западин Русской равнины наибольшие запасы и мощность гумусового горизонта свойственны полугидроморфным лугово-чернозёмным почвам при глубине грунтовых вод 3-6 м. Здесь гумус имеет гуматный состав с высоким отношением С_{гк}:С_{фк} и ведущей ролью кальций-связанных фракций ГК-II, что обеспечивает его относительную устойчивость. При дальнейшем подъёме грунтовых вод и усилении гидроморфизма гумусность снижается, профиль фульватизируется, растёт доля подвижных фракций, а запасы углерода уменьшаются. Таким образом, максимальные запасы С_{орг} и максимальное содержание С_{орг} в поверхностном горизонте фиксируются в разных почвах.

В прерийных подхолах, напротив, максимальное содержание и запасы органического вещества отмечаются в наиболее гидроморфных условиях - в сезонно-затопленных и постоянно-затопленных западинах. Длительное затопление в течение вегетационного периода приводит к формированию мощных тёмноокрашенных органоминеральных горизонтов со значительными запасами углерода. По данным Chizen et al. (2024), сезонно-затопленные западины содержат углерода в несколько раз больше, чем эфемерно-затопленные (рис. 5). Постоянно-затопленные западины благодаря стабильно-анаэробным условиям способны сохранять углерод в течение столетий (Bansal et al., 2021). В то же время, запас лабильного углерода в почвах переувлажненных западин достаточно уязвимы: дренаж или высыхание переводят систему в аэробное состояние, и ранее законсервированный гумус быстро минерализуется.

По этой причине методики и модели, выработанные для прерийных подходов, оказываются неприменимыми к западным комплексам лесостепи Окско-Донской низменности. Здесь иной микрорельеф, иная пространственная мозаика почв, иная глубина и динамика грунтовых вод, иная продолжительность переувлажнения. Все это задает специфические механизмы формирования и трансформации ПОВ, которые нельзя объяснить в рамках анализа североамериканских аналогов. В данной работе именно эта специфика положена в основу схемы анализа факторов ПОВ и оценки секвестрационного потенциала.

Глава 2. Физико-географическая характеристика Окско-Донской низменности

2.1 Геолого-геоморфологическое строение

Территория Окско-Донской низменности вытянута между несколькими крупными орографическими единицами: Среднерусской и Приволжской возвышенностями на западе и востоке, долиной р. Оки на севере и Калачской возвышенностью на юге. Административно она охватывает Тамбовскую равнину и прилегающие районы Липецкой, Воронежской и Рязанской областей. Пологий и плоский рельеф водоразделов при малой интенсивности дренажа создаёт условия для застаивания влаги и широкого распространения гидроморфных почв, что определяет облик лесостепного ландшафта данного региона (рис. 6).

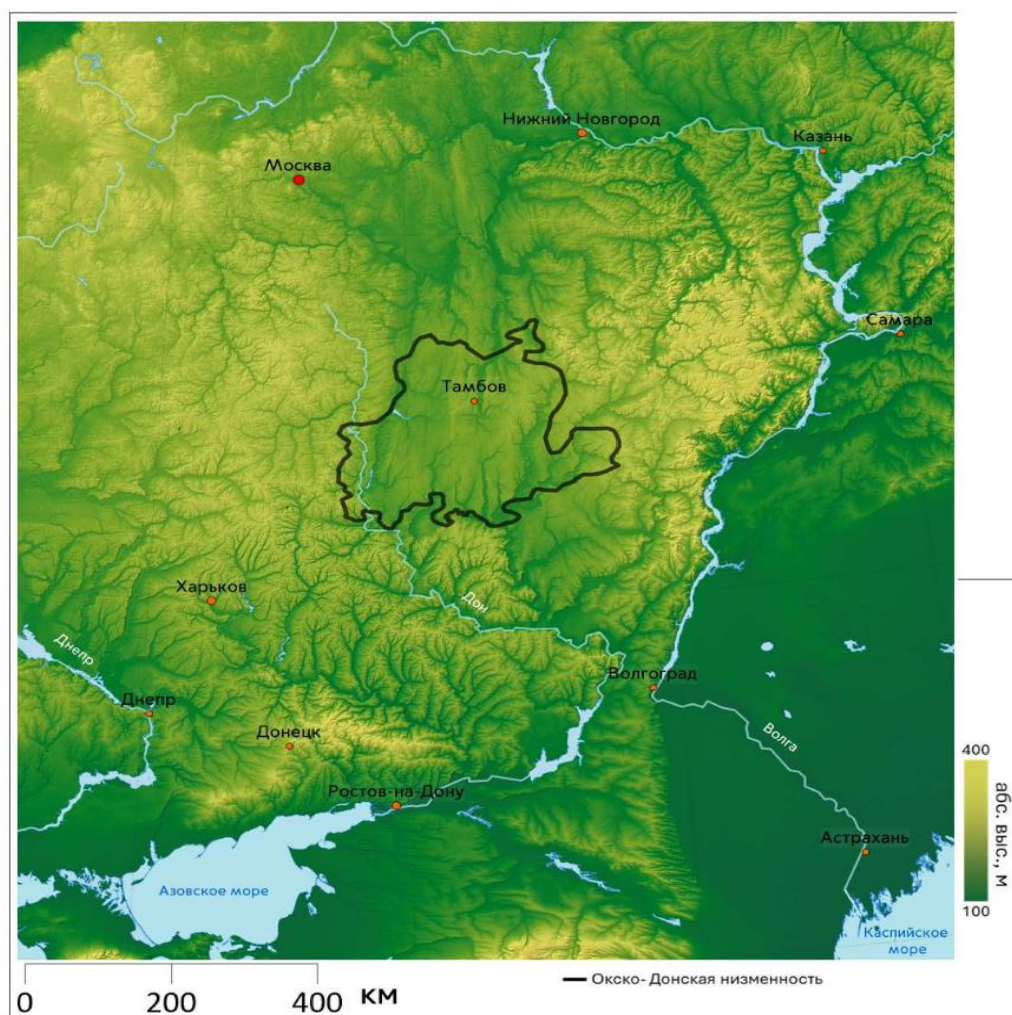


Рисунок 6. Рельеф и границы Окско-Донской низменности

Геологическое строение Окско-Донской низменности определяется длительным тектоническим погружением территории, начавшимся в неогене и обусловившим формирование мощного чехла рыхлых кайнозойских

отложений. В основании разреза на севере залегают карбоновые породы, в большинстве остальных районов – верхнедевонские; выше – песчано-глинистые толщи мела и юры. В южной части равнины, у Калачской возвышенности, появляются верхнемеловые отложения. Неогеновый ярус представлен ергенинской свитой опесчаненных суглинков, перекрытой суглинистой мореной мощностью 10-12 м (в верховьях Сухой Липовицы и Матыры – до 70 м). Донской выступ днепровского ледника практически не отразился в современном рельефе.

Современный рельеф низменности монотонен: водоразделы залегают на отметках 150-180 м, лишь на юго-западе, между реками Сухая Липовица и Матыра, поднимаясь до 200-219 м. Речные долины широкие, асимметричные, с врезом не более 50 м (рис. 7). Линейная эрозия выражена слабо – овраги и балки занимают 2-8% площади Тамбовской равнины, а на большей части территории эрозионные процессы практически отсутствуют. Характерная черта рельефа – неглубокие степные западины, которые весной аккумулируют талые воды.

Плейстоценовые оледенения по-разному преобразовали литологическую обстановку северной и южной частей территории. На севере морена выходит с глубины 2-3 м и перекрыта флювиогляциальными и аллювиальными отложениями, тогда как на юге она залегают на глубине более 10 м, а в покровной толще господствуют тяжёлые лессовидные суглинки и глины, выклинивающиеся на склонах долин. Повсеместно водоразделы несут чехол средних и тяжёлых лессовидных суглинков. Долинные зандры Цны, Битюга, Вороны и Савалы сложены более легкими водно-ледниковыми отложениями; по днищам долин развит тяжёлый аллювий (рис. 8).

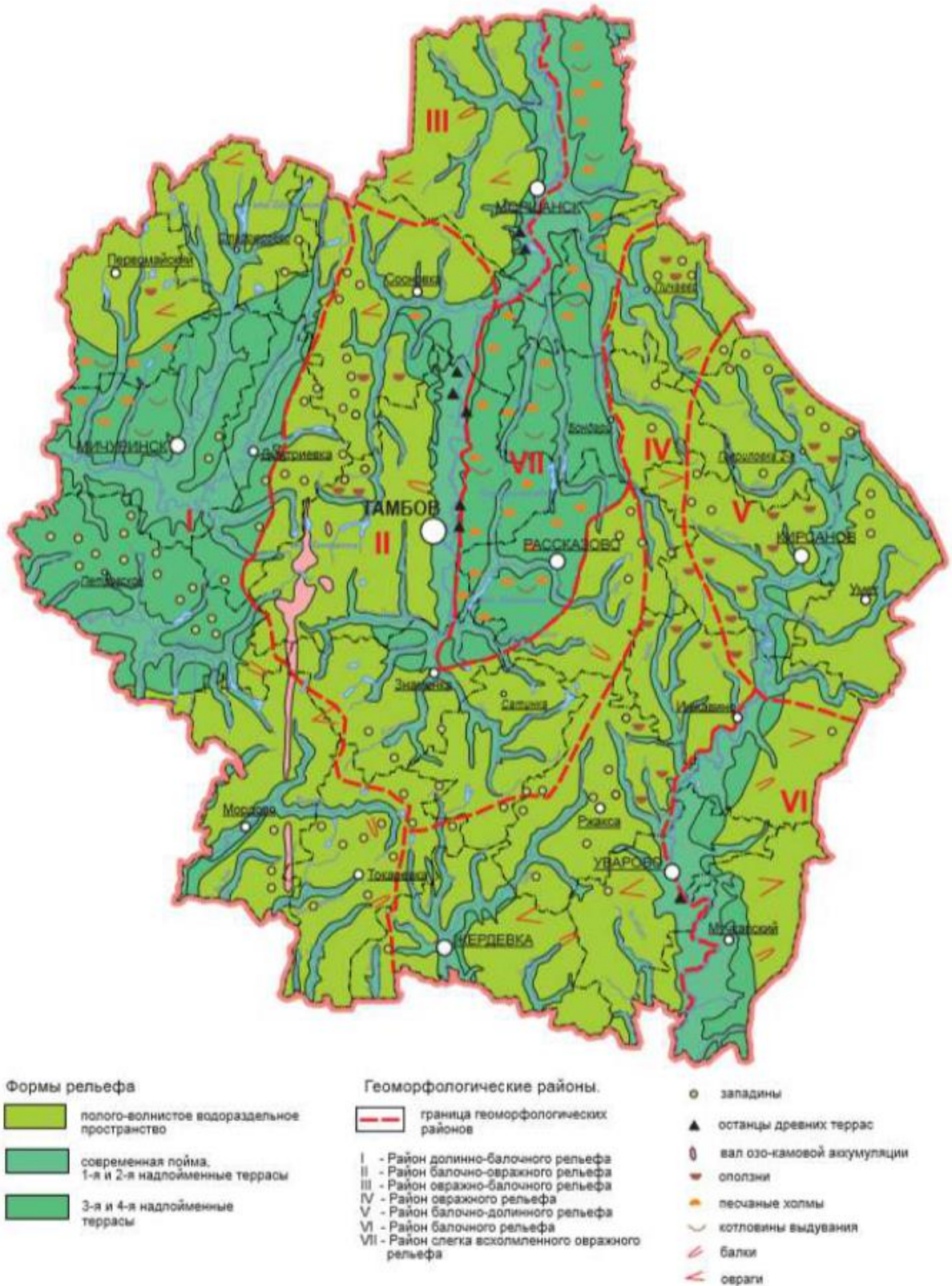


Рисунок 7. Геоморфологическая карта Окско-Донской низменности в пределах Тамбовской области. Авторы: Б.Е. Петухов, А.А. Липецких 2013.

сумма солнечной радиации в Тамбовской области варьируется от 968 кВт/м² на севере до 1070 кВт/м² на юге.

Средняя годовая температура воздуха в Окско-Донской низменности области варьируется от +6,4°C на севере области до +8,4°C на юге. Сумма температур за период с температурами выше +10°C на севере Тамбовской области составляет около 2700°C, а на юге может достигать более 3200°C. Длительность безморозного периода в Окско-Донской низменности составляет 168 дней (с конца апреля по начало октября), что несколько короче, чем в других районах Черноземья, например, в Белгородской области, где безморозный период может достигать продолжительности в 196 дней.

Атмосферные осадки в Окско-Донской низменности распределены в рамках диапазонов лесостепи неравномерно: на юге области медианное количество осадков около 560 мм, в то время как на севере их количество достигает 680 мм. Отмечен градиент с запада на восток, в среднем количество осадков за вегетационный период (с температурами выше +10°C) варьируется от 290 мм на востоке области до 340 мм на западе (рис. 9).

Зима в Окско-Донской низменности наступает в конце ноября, а высота снежного покрова достигает максимума в декабре или январе, составляя 10-50 см. Средняя температура января на юго-западе области составляет -5,2°C, а на северо-востоке – до -8,5°C. Абсолютные минимумы температуры могут достигать -34°C на северо-востоке области, что указывает на более континентальный климат в этой части региона по сравнению с более южными и западными территориями, например, в Белгородской области, где температура в январе может быть около -5°C (рис. 10).

Лето в Окско-Донской низменности жаркое, со средней температурой июля от +20,4°C на севере до +23°C на юге. Абсолютные максимумы температуры в июле могут достигать +39,5°C на востоке области, что сходно с показателями в более южных регионах Центрального Черноземья. Сумма атмосферных осадков за период с температурами выше +10°C варьируется от 340 мм на западе области до 290 мм на востоке.

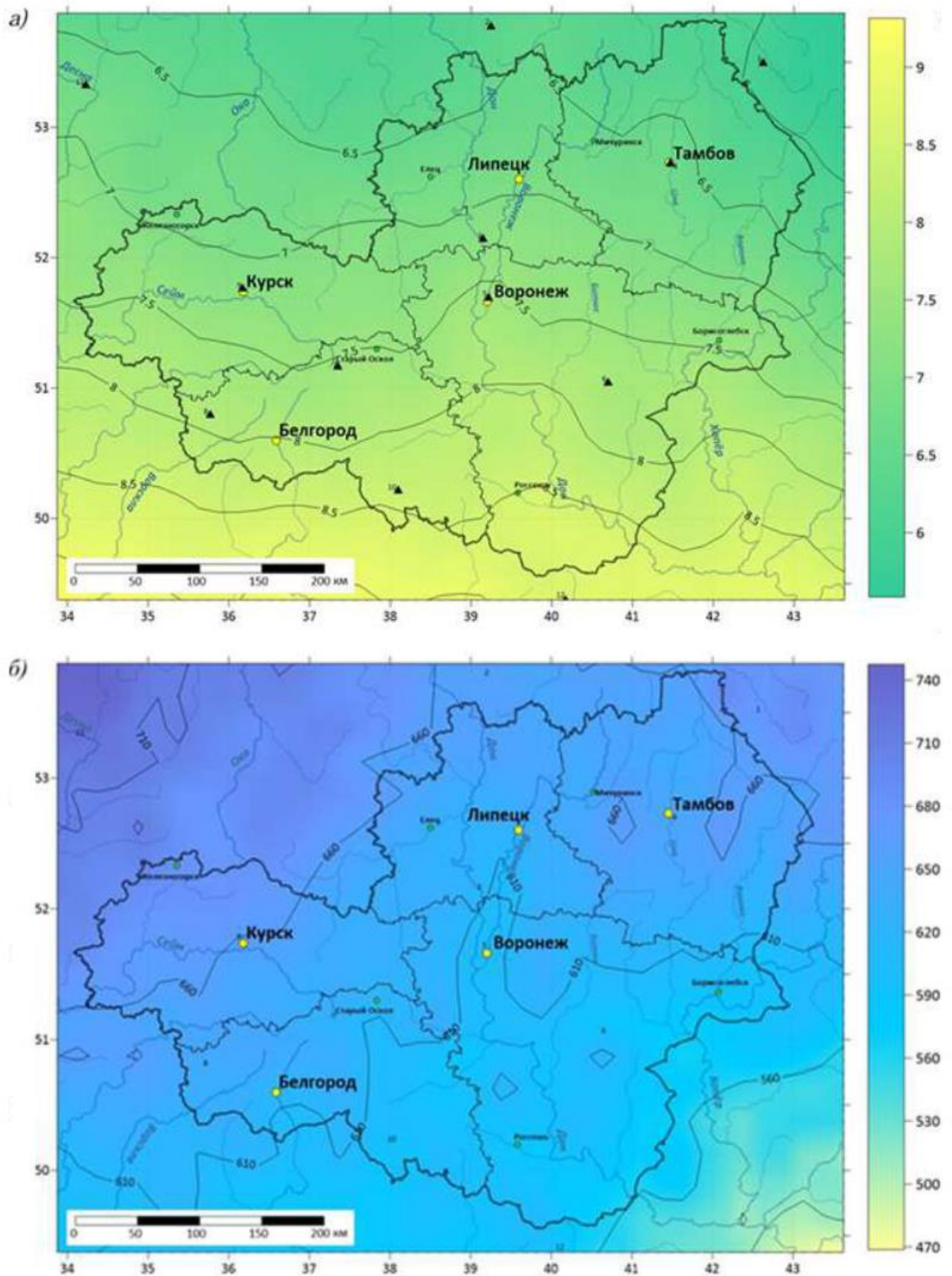


Рисунок 9 – Среднегодовая температура воздуха (а) и годовая сумма осадков (б) Центрального Черноземья (ERA 5)

Засушливость территории по ГТК Селянинова, коэффициенту увлажнения Н.Н. Иванова-Г.Н. Высоцкого и радиационному индексу сухости М.И. Будыко увеличивается с северо-запада на юго-восток (рис. 10).

В южной части области часты суховеи, которые проявляются в основном в мае и августе. Это явление, при котором сухие и горячие ветры с восточной составляющей оказывают влияние на состояние почвы и растений, повышает риск засухи в летний период.

Среднегодовое количество осадков может варьировать на 150–200 мм, от 400 до 600 в год. Вариабельность поступающих осадков вкупе с изменяющимися водосборными площадями западин приводит к тому, что объём поступающей в отдельную западину влаги способен варьироваться более чем в 2 раза в разные годы.

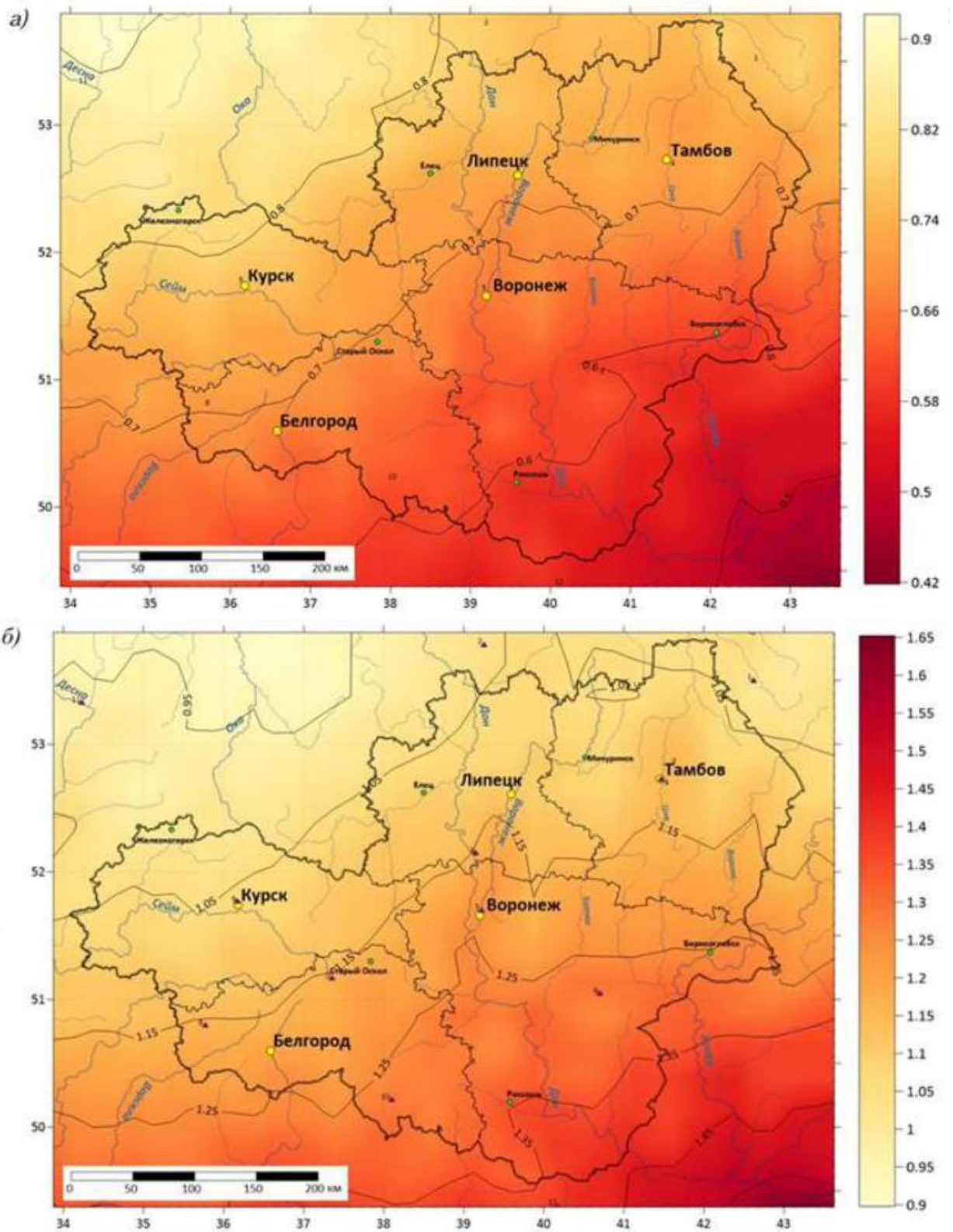


Рисунок 10 – Коэффициент увлажнения Н.Н. Иванова-Г.Н. Высоцкого (а) и радиационный индекс сухости М.И. Будыко (б) (ERA 5)

С точки зрения внутригодовой и межсезонной динамики снежного покрова Окско-донская низменность также характеризуется высокими показателями изменчивости. В зависимости от особенностей года устойчивый снежный покров может формироваться как в середине ноября (1954), так и в конце декабря (2005) так и иногда не сформироваться вообще (2007). Мощность снежного покрова в случае его наличия, перед снеготаянием может варьироваться от 3 см (2020) до 80 см (1945), как и дата схода снежного покрова от середины февраля (2000) до середины апреля (2006). В таких изменчивых климатических условиях в пределах почв приуроченным к одним и тем же типам местности из года в год формируются различные гидротермические условия их функционирования (рис. 11).

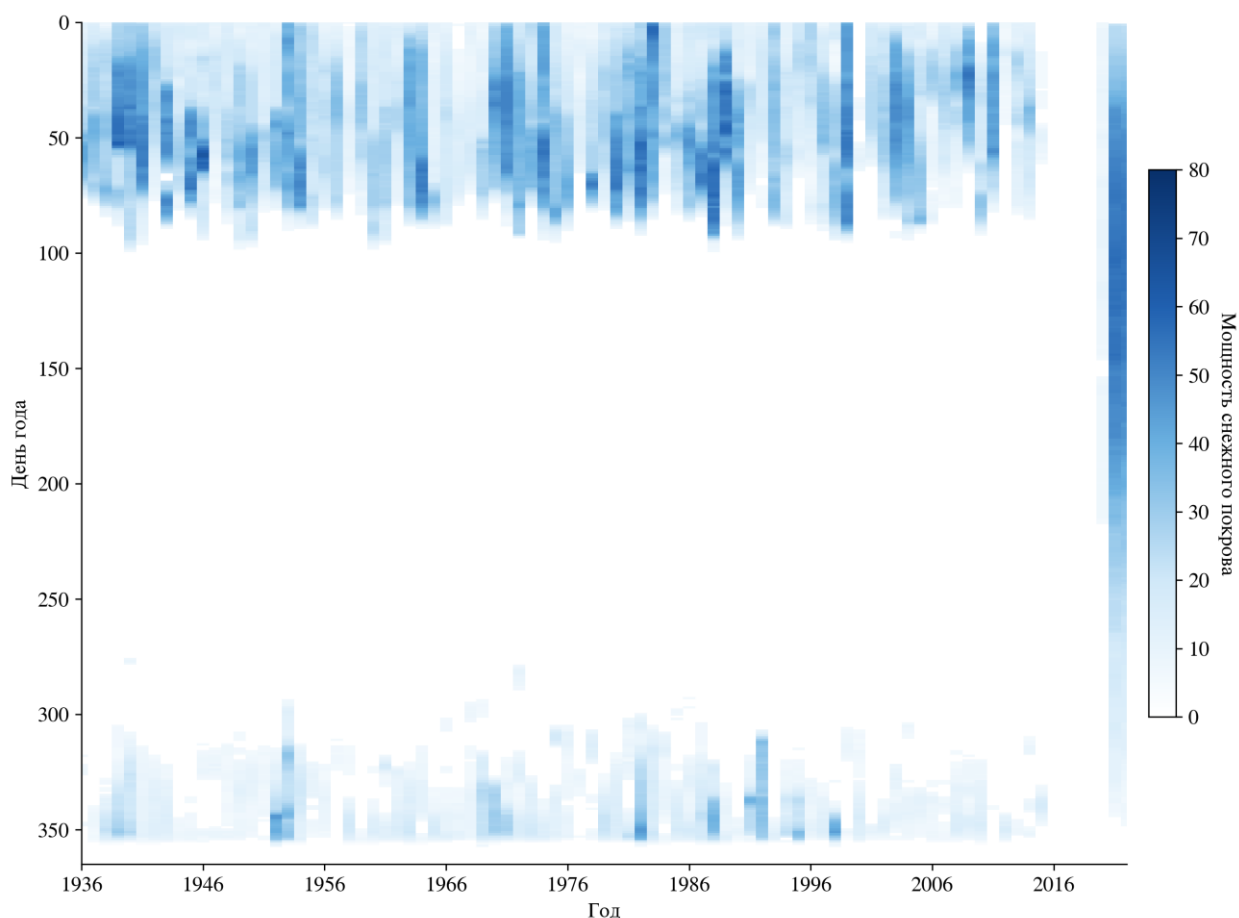


Рисунок 11. Диаграмма изменчивости снежного покрова данным метеостанции г. Тамбов

2.3 Растительность западных комплексов

Растительный покров западных комплексов недренируемого типа местности в пределах лесостепи Тамбовской области отличается выраженной микроразнообразием, обусловленной положением по рельефу и длительностью застоя влаги. Основу формируют лугово-болотные и лугово-чернозёмные сообщества, варьирующие от злаково-разнотравных лугов на периферии до

осоково-разнотравных сырых лугов и древесных группировок в центральных понижениях (Самойлова, 1972; Ахтырцев и др., 1981).

Периферийные части западин заняты дерновинно-луговыми сообществами с участием *Bromus arvensis*, *Elytrigia repens*; по мере понижения рельефа на склонах возрастает доля влаголюбивых злаков (*Beckmannia eruciformis*, *Festuca valesiaca*) и осок; днища приурочены к осоково-разнотравным “сырым лугам” с *Carex spp.*, *Leersia oryzoides* и моховым подъярусом (Самойлова, Якушевская, 1970; Красина, 2014).

По мере приближения к днищу увеличивается доля влаголюбивых видов. На пологих склонах западин появляются *Beckmannia eruciformis* и *Festuca valesiaca*, образующие мозаичные сочетания с осоками. Здесь же отмечается постепенное обогащение травостоя влаголюбивым разнотравьем, что соответствует изменению условий водного режима – более продолжительному застою влаги весной и осенью (Самойлова, 1980).

Днища западин заняты сообществами осоково-разнотравной растительности, описываемыми как «сырые луга» (Самойлова, 1972; Смирнова, 2025). Они приурочены к лугово-болотным и торфяно-глеевым почвам, характеризуются обилием *Carex spp.*, *Leersia oryzoides* и других влаголюбивых злаков, нередко сопровождаются моховым подъярусом (рис. 12). В этих условиях злаковая составляющая травостоя редуцирована, и доминируют виды, приспособленные к длительному переувлажнению и слабой аэрации почвы.

На отдельных участках крупных западин, где застой влаги наиболее продолжителен, формируются луговые солоды и осолоделые луговые сообщества. В их растительном покрове отмечается участие влаголюбивых осок и трав, менее типичных для луговых сообществ, но устойчивых в условиях оглеения и начальных стадий осолодения (Ахтырцев, Адерихин, Ахтырцев, 1981).

По краям более крупных понижений нередко развиваются древесные втяжки (рис. 13). Здесь встречаются берёзово-осиновые группировки (*Betula pendula*, *Populus tremula*), формирующие локальные острова древесной растительности в пределах лугового покрова. Под их пологом сохраняются влаголюбивые злаки и травы, включая *Beckmannia eruciformis* и *Sporobolus aculeatus* (Самойлова, 1981; Smirnova et al., 2024).



Рисунок 12. Характерный облик растительности в днище западины



Рисунок 13. Граница между западиной и залежью – характерная смена видов в травянистом ярусе

2.4 Почвенный покров западных комплексов

Описание истории изучения почвенного покрова рассматриваемого участка приведено в разделе 1.1. Ниже представлено предметное обобщение сведений о почвенном покрове западин Окско-Донской лесостепи.

Структура почвенных комплексов в пределах крупных западин – как правило, покрытых древесно-кустарниковой растительностью и не затронутых пахотным использованием – была всесторонне описана А. Б. Ахтырцевым (1974а, 1982). В западинах наблюдается микрizonaльность, выражающаяся в кольцевом расположении почвенных типов. Такая структура обусловлена спецификой увлажнения, различной по интенсивности и продолжительности.

Мелкие и неглубокие западины (диаметром от нескольких до 20–35 метров и глубиной до 30–36 см) характеризуются, как правило, незначительной дифференциацией почв. Здесь доминируют выщелоченные черноземно-луговые с поверхностно-глеево-элювиальными признаками и слабо выраженной дифференциацией по профилю.

Для временно затопляемых западных болот, которые насыщаются влагой весной и осенью, а в летний период пересыхают, характерны торфяно-глеевые и лугово-болотные выщелоченные почвы. Эти почвы развиваются не только в днищах западин, но и на их склонах, вытесняя серые поверхностно-глеевые почвы к периферийным участкам (Ахтырцев А. Б., 1873, 1974б, 1981).

Переходная полоса между северной – Окской – и южной – Донской – частями равнины отличается особенно сложным, мозаичным почвенным строением. В эту зону входят южные части Никифоровского района, северные участки Знаменского, Петровского, Тамбовского и Рассказовского районов Тамбовской области, а также фрагменты территории Грязинского района Липецкой области. В пределах этой зоны наблюдается снижение степени выщелоченности почв. Здесь наиболее распространены черноземы слабо- и средневыщелоченные, а также лугово-черноземные почвы. Сильновыщелоченные черноземы, широко распространённые в северной части равнины, встречаются крайне редко. Типичные черноземы и лугово-черноземные почвы занимают существенную долю почвенного покрова: от 10 % в Тамбовском и Рассказовском районах до 25–30% в Петровском районе.

Наряду с этим, в составе почвенного покрова встречаются отдельные участки с солончаковыми почвами, а в западинах – серые глеево-элювиальные, лугово-болотные и солодовые разновидности (Ахтырцев А. Б., Адерихин П. Г., Ахтырцев Б. П., 1981), что указывает на высокую вариативность и сложную микроморфологию западных ландшафтов.

Структура почвенного покрова значительно варьирует в направлении с запада на восток. В западной части переходной зоны, занимающей плоское междуречье Воронежа и Матыры с абсолютными высотами 135–150 м, широко распространены выщелоченные и типичные лугово-черноземные и черноземно-луговые почвы, формирующие типичные ячейки почвенно-пространственных паттернов (СПП). Для западного отрога переходной полосы, где преобладает междуречный недренируемый тип местности, характерно почти повсеместное распространение лугово-черноземных и черноземно-луговых почв. Соотношение почвенного покрова в отдельных участках варьирует в следующих пределах: лугово-черноземные выщелоченные почвы – 35-50 %, обычные – 0-40 %, черноземно-влажнoluговые – 1-10 %, солоды – 0,5-1 %, лугово-болотные – 0,3-0,9%. На юге равнины почвенный покров представлен сочетаниями лугово-черноземных почв (обычных, карбонатных и солонцеватых), черноземно-луговых почв (обычных, карбонатных, солонцеватых, а также солончаковатых), а также типичных и карбонатных черноземов в сочетании с почвами западин. Засушливость климата, локально залегающие засоленные породы и наличие грунтовых вод с повышенной минерализацией способствуют развитию процессов засоления, осолонцевания и осолодения в западинах, что приводит к формированию мозаичного почвенного покрова, включающего черноземно-луговые солонцы, солончаки, черноземно-луговые засоленные и солонцеватые почвы, солоды, осолоделые и лугово-болотные почвы. В составе лугово-черноземных почв и черноземов преобладают тучные и среднегумусные мощные и среднemocные глинистые разновидности (Ахтырцев А. Б., 1973, 1974б, 1981).

Структура почвенного покрова тесно связана с типами местности. Для междуречного недренированного типа местности характерны сложные пятнисто-кольцевые депрессионные паттерны. Структурный фон формируют лугово-черноземные почвы в сочетании с черноземно-луговыми: первые приурочены к выровненным, слабодренированным междуречьям и слабopологим склонам, вторые окаймляют различные понижения и покрывают плоско-вогнутые участки водоразделов, лощины, лиманы. Эти почвы формируют обширные и изоморфные ареалы. Характерными компонентами структуры почвенного покрова являются сложные западинные комплексы и мелко мозаичные структуры почв.

Структура почвенно-пространственных паттернов южной части Окско-Донской низменности значительно усложнена западинными комплексами и высокой степенью мелко мозаичности. Характеристики составляющих их компонентов и сложность строения почвенного покрова коррелируют с

разнообразием морфологии, гидрологических условий, этапов развития и биотического состава западин.

Почвы западин низменности представлены в различных сочетаниях луговыми, заболоченными и осолоделыми почвами. В южных провинциях равнины в почвенном покрове западин формируются ареалы солонцеватых почв. Почвенный покров западин формируется под влиянием внутренних факторов их функционирования, определяемых глубиной вреза, режимом увлажнения, особенностями растительного покрова и ионным составом грунтовых вод.

В крупных, но неглубоких западинах (площадью несколько гектаров) доминируют черноземно-луговые корковые, мелкие и среднестолбчатые солонцы. Часто они имеют солончаковые свойства и характеризуются содовым засолением. Такие депрессии испещрены солонцовыми пятнами диаметром от 2-3 до 15-25 м. Поверхность этих пятен понижена на 10-15 см, местами на 30-35 см, по сравнению с черноземно-луговыми солончаковато-солонцеватыми почвами, демаркирующими их границы. В наиболее пониженных участках западин периодически формируются осолоделые солонцы (рис. 14).

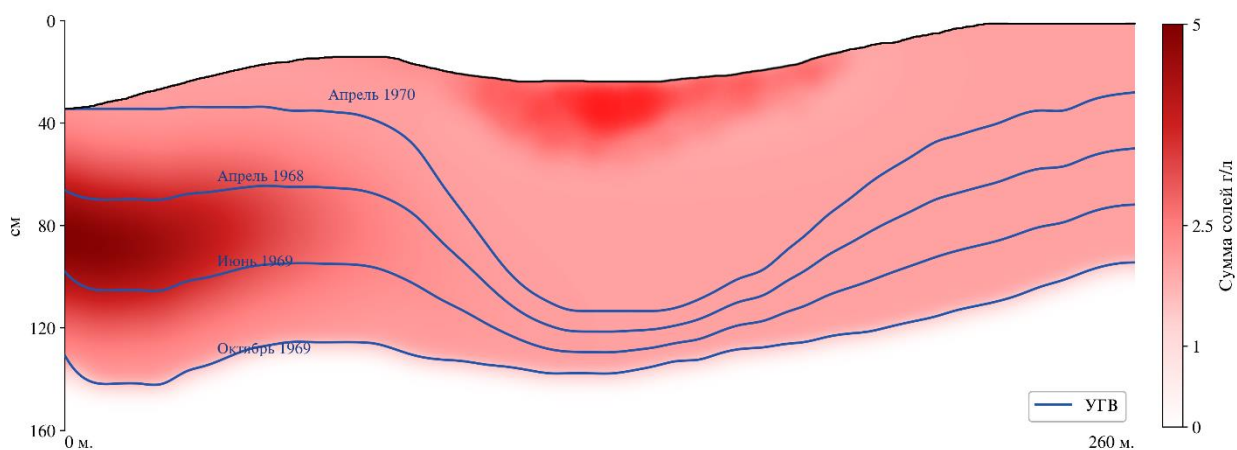


Рисунок 14. Распределение солей и динамика уровней грунтовых вод в характерном для Окско-Донской низменности профиле. По данным Е.М. Самойловой и др 1972 г.

Из-за слабой концентрации поверхностных вод в таких крупномасштабных слабоврезанных понижениях осолодение выражено слабо, тогда как процессы засоления и осолонцевания проявляются более интенсивно. Источники ионов Na различны. В исследованиях Е. М.

Самойловой, В. К. Бугаевского, В. И. Макеевой (1972) описана динамика вод вниз по уклону западин, в ходе которой они обогащаются двууглекислой содой, теряя гидрокарбонаты кальция и магния. Эти минерализованные воды застаиваются в понижениях на глубине 1-3 м, а последующий капиллярный подъем приводит к засолению и осолонцеванию почв.

Наиболее типичными для территории Окско-Донской низменности являются западины не больших размеров – с диаметром до 150-300 м и глубиной вреза от 0,5 до 2 м. Благодаря морфологическим особенностям, такие понижения эффективно аккумулируют поверхностные воды, нередко превосходя в этом более обширные, но слабоврезанные депрессии. В весенний и осенний периоды западины заполняются водой, а в летнее время, как правило, пересыхают. Воды, собирающиеся в этих формах рельефа, слабо минерализованы и обогащены гидрокарбонатами кальция и магния, что создает условия для осолодения, лессиважа и локального оглеения верхних горизонтов.

Глубоковрезанные западины характеризуются преобладанием гидроморфных почв: лугово-болотных, луговых солодей, черноземно-луговых почв с признаками засоления и осолонцевания, а также серых лесных остаточно-осолоделых почв с отдельными пятнами осолодевающих солонцов. Более упрощённые по морфологии западины – диаметром до 250 м и глубиной около 70 см – имеют ограниченный набор почвенных элементов. Здесь преобладают серые лесные остаточно-осолоделые и черноземно-луговые почвы, организованные в кольцевые микроструктуры. При этом лугово-болотные и лугово-осолоделые почвы, как правило, в таких формах рельефа отсутствуют (Ахтырцев Б. П., 1982). Кроме того, отдельными участками встречаются лугово-черноземные выщелоченные почвы суглинистого и легкосуглинистого механического состава. Они характеризуются пониженным содержанием физической глины – от 30-35 % до 20-25 %, а в нижней части профиля на глубине около 1 м часто залегают супесчаные и песчаные отложения. В гумусовом горизонте преобладают фракции песка (до 64-66%) и ила (в пределах 13-17%), причём по мере углубления содержание песчаных частиц увеличивается.

Лугово-черноземные почвы отличаются сложным генезисом. В процессе их формирования чередовались фазы активного элювиирования и его ослабления, что было обусловлено колебаниями влажности и интенсивностью инфильтрации поверхностных вод (Ахтырцев А. Б., Ахтырцев Б. П., Пряхин А. Д., 1996, 1997). Анализ распределения ила по профилю указывает на частичный вынос тонкодисперсных частиц из верхней части почвы в более глубокие, некарбонатные горизонты. В гумусовом

горизонте содержание ила на 5–7% ниже по сравнению с подстилающими слоями. Наблюдаемое различие связано с процессами лессиважа, оглинивания, а также с воздействием сельскохозяйственной обработки, способствующей водному и ветровому выносу тонких частиц. На больших глубинах вариативность содержания ила объясняется неоднородностью аллювиальных и делювиальных отложений, слагающих нижние горизонты (Ахтырцев, 1999) (рис. 14).

Почвенный покров западных комплексов Окско-Донской лесостепи

Западные комплексы недренируемого типа местности лесостепи Окско-Донской низменности характеризуются преобладанием полугидроморфных и гидроморфных почв. Как отмечала Е. М. Самойлова, «автоморфные чернозёмы занимают лишь ограниченные ареалы в нешироких приречных и прибалочных зонах, тогда как основная масса междуречных пространств сложена лугово-чернозёмными почвами с признаками оглеения» (Самойлова, Якушевская, 1970). Уже в ранних работах подчёркивалось, что почвы западных комплексов даже в автономных позициях сохраняют гидроморфный характер вследствие «слабого развития латерального стока и сезонного застоя влаги» (Ахтырцев, 1974а).

Структура почвенного покрова таких комплексов выражается в закономерной микроразнообразности. По данным А. Б. Ахтырцева, «структура западин определяется спецификой сезонного увлажнения и выражается в кольцевом расположении почвенных разновидностей» (Ахтырцев, 1982). На периферии понижений господствуют лугово-чернозёмные и чернозёмно-луговые почвы, в центральных частях – лугово-болотные и солодовые разновидности. Такая микроразнообразная организация почвенного покрова отражает «ряды почв возрастающего гидроморфизма» (Самойлова, 1980), что наглядно демонстрирует катена, иллюстрирующая последовательную смену почв от слабооглеённых к болотным и солодам (рис. 15).

Систематизация исследований Самойловой и Ахтырцева позволила выделить группы почв по глубине залегания грунтовых вод: более 6 м – чернозёмы различных подтипов, 3–6 м – лугово-чернозёмные, 1,5–3 м – лугово-болотные и чернозёмно-луговые, 0–1,5 м – болотные и солодовые почвы (Самойлова, Ахтырцев, 1970). Это деление оказалось применимым для всей территории лесостепи и подчёркивает ведущую роль водного режима в организации почвенного покрова, а также принято в настоящей работе в качестве основного критерия дифференциации почв по степени выраженности гидроморфизма.

Важным компонентом западных комплексов являются луговые солоды и луговые осолоделые почвы. По наблюдениям Е. М. Самойловой,

«солоды занимают днища западин и отличаются белёсой окраской иллювиальных горизонтов, свидетельствующих о процессах лессиважа и разрушения структурных элементов» (Самойлова, 1972). Эти разновидности формируются в условиях длительного застоя поверхностных и грунтовых вод и служат индикатором наиболее выраженного гидроморфизма.

Широкое распространение в структуре западинных комплексов имеют также лугово-болотные почвы. Они формируются при весеннем и осеннем застое влаги и отличаются наличием торфяно-глеевых горизонтов и выраженной сезонной динамикой. «Даже в условиях пашни эти почвы сохраняют черты гидроморфизма, проявляющиеся в редуцированной окраске профиля и конкрециях окислов железа» (Ахтырцев, 1981). На периферии понижений встречаются дерновые глеевые почвы, которые, по определению Самойловой и Якушевской (1969), «служат индикатором кратковременного сезонного переувлажнения».

Пространственная структура западинных комплексов подтверждается данными крупномасштабного картографирования. Как отмечали А. Б. и Б. П. Ахтырцевы, «в составе почвенного покрова недренируемых междуречных пространств господствуют лугово-чернозёмные, лугово-болотные и солодовые разновидности, формирующие сложные сочетания и пятнисто-кольцевые депрессионные структуры» (Ахтырцев, Адерихин, Ахтырцев, 1981) (рис. 16).

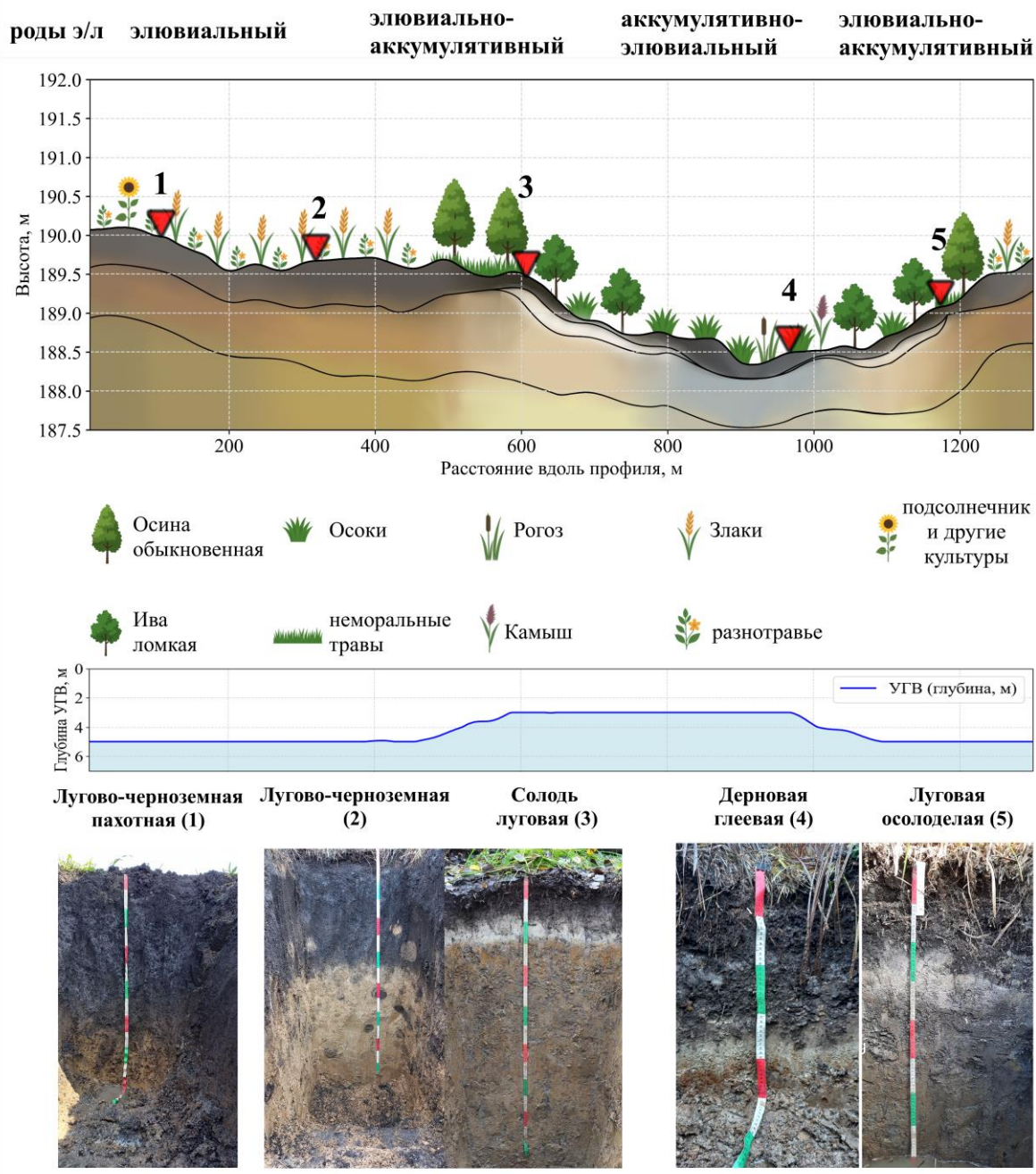


Рисунок 15. Катена, с возрастающим по степени гидроморфности (слева направо) рядом почв междуречий Окско-донской низменности

Таким образом, почвенный покров западных комплексов недренируемого типа местности представляет собой систему тесно сопряжённых полугидроморфных и гидроморфных почв, организованных по градиенту гидроморфизма – от лугово-чернозёмных до осолоделых и болотных. Его пространственная и микронеональная структура определяется морфологией западин, глубиной грунтовых вод и сезонной динамикой увлажнения, что последовательно подчёркивалось в работах Самойловой и Ахтырцева.

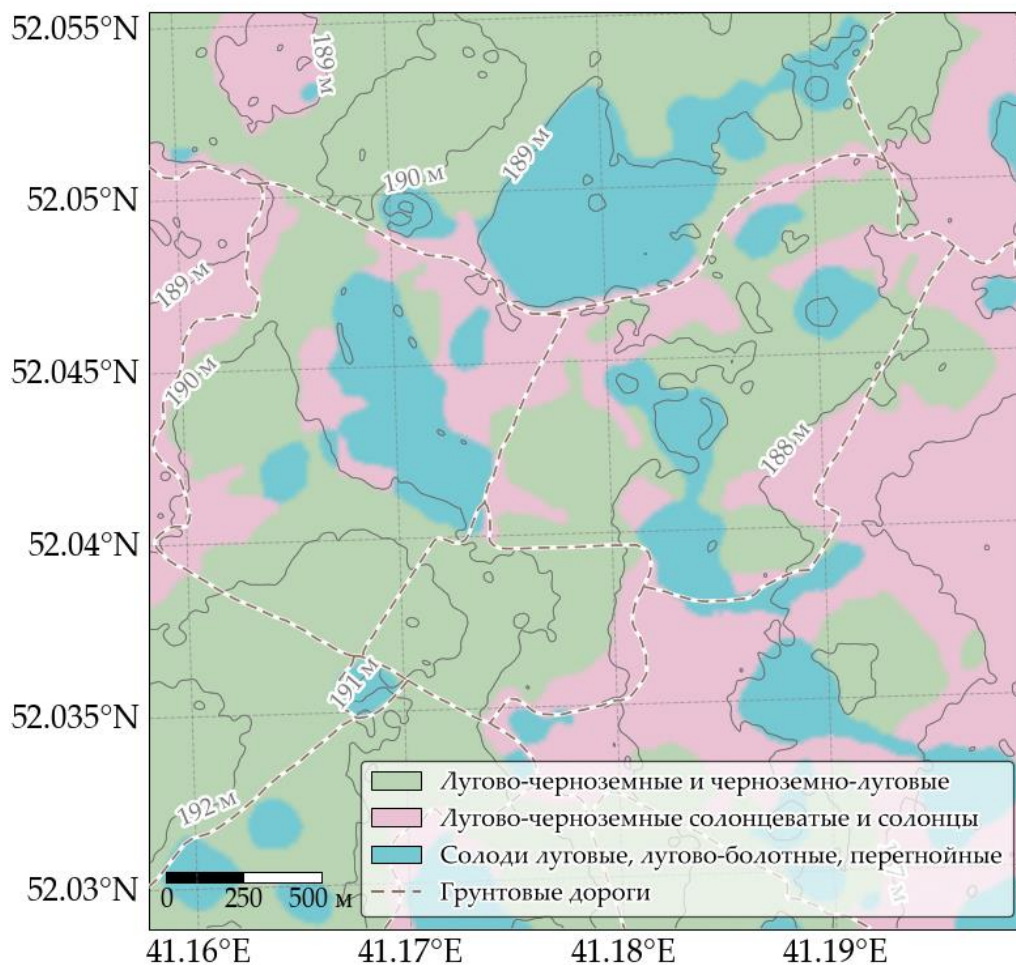


Рисунок 16. Карта почвенного покрова западного комплекса лесостепи Окско-Донской низменности на примере ключевого участка Е.М. Самойловой (3x3 км)

2.5 Ландшафтная структура Окско-Донской низменности

Ниже приведена краткая характеристика ландшафтной структуры Окско-Донской низменности. Чтобы подчеркнуть уникальность условий недренируемого типа местности, к которому относится объект исследований, целесообразным является охарактеризовать также и другие типы местности, характерные для рассматриваемого региона.

Ландшафтная структура Окско-Донской низменности является результатом сложного взаимодействия геологического строения, рельефа, гидрологического режима и биотических факторов. Территория низменности, расположенная между долинами Оки и Дона, формировалась в течение длительной геологической истории, включая плейстоценовые оледенения, оставившие моренные и водно-ледниковые отложения и широкие

аккумулятивные равнины (Герасимов, 1951; Красин, 2014). Современный облик определяется сочетанием междуречных пространств с выровненными поверхностями, речных долин с развитой террасной системой, а также многочисленных замкнутых понижений – западин, формирующих микро мозаичную организацию территории (Самойлова, 1981; Ахтырцев, 1999).

В западной части низменности доминирует долина р. Воронеж с густой сетью притоков и системой пойм и террас (Красина, 2014). Центральные районы характеризуются относительно выровненными междуречьями высотой 175–180 м (местами до 219 м), осложнёнными балками и оврагами. Восточные части имеют иной облик: лотковидные равнины рек Цны, Елани и Савалы с повышенными восточными бортами и слабо выраженными водоразделами, напоминающими плато. Дальше на восток лежат пониженные участки долин Вороны и Хопра, где проходят водораздельные линии бассейнов Дона и Волги (Добровольский, Урусевская, 2004).

Четвертичная история низменности сыграла ключевую роль в её формировании. Во время днепровского оледенения территория была покрыта ледником толщиной до 400–500 м; его массы сформировали моренные суглинки и водно-ледниковые пески, определившие характер дренированности и микрорельефа (Герасимов, 1951). Толщина моренных покровов в междуречьях обычно не превышает 2–3 м, но в погребённых долинах достигает 15–20 м.

Современные почвенно-растительные комплексы тесно связаны с литологическим составом пород. На плакорных пространствах, сложенных лёссовидными суглинками, развиты типичные и выщелоченные чернозёмы, отличающиеся высокой мощностью гумусового горизонта. В поймах рек формируются аллювиальные и заболоченные почвы с луговыми сообществами и ольшаниками, на песчаных террасах – сосновые боры (Орлов, 2005). Склоны балок и долин подвержены эрозии и покрыты мозаикой кустарниковой и лугово-степной растительности.

Внутри низменности выделяются несколько типов местности. Поймы представляют собой полосы шириной до 4–6 км, сложенные разнозернистым аллювием с торфяными толщами и старицами. Террасы формируют ступенчатую систему: нижние сложены песками и заняты сосняками, верхние суглинистые, покрытые дубравами и луговыми степями. Склоновые ландшафты приурочены к бортам долин и отличаются эрозионной расчленённостью (Красина, 2014; Степанцова, 2012).

Наибольшие площади занимают плакорные междуречные равнины, сложенные лёссовидными суглинками. Здесь господствуют типичные и

выщелоченные чернозёмы, являющиеся основной сельскохозяйственной зоной региона (Ахтырцев, 1999). Однако особое значение имеют междуречные недренируемые равнины, где уровень грунтовых вод поднимается до 0–5 м. В этих условиях формируются лугово-чернозёмные почвы с оглеением, а также солонцы и солоды, организующие западинные комплексы (Самойлова, 1981; Пряхин, 1997).

Западины – ключевой элемент ландшафтной структуры низменности. Они представляют собой блюдцеобразные формы глубиной 0,3–2 м и диаметром от десятков до сотен метров; крупные поды достигают километров и обладают выраженной микрizonaльностью. Весной и осенью западины заполняются водой, летом часто пересыхают, однако днища сохраняют влагу даже в засушливые периоды. Эти условия формируют анаэробные горизонты и способствуют накоплению органического вещества (Самойлова, 1981; Ахтырцев, 1999; Zaidelman et al., 2019).

Структура почвенно-пространственных паттернов южной части низменности особенно усложнена западинными комплексами и высокой микромозаичностью. Характер строения определяется глубиной вреза, продолжительностью затопления и химизмом грунтовых вод. В крупных западинах доминируют чернозёмно-луговые и солонцеватые почвы, часто испещрённые пятнами солонцов. В наиболее пониженных участках встречаются осолоделые разновидности (Ахтырцев, 1974; Самойлова, Якушевская, 1970). В мелких западинах диаметром до 150–300 м формируются лугово-чернозёмные и серые лесные почвы, эффективно аккумулирующие поверхностные воды. Более глубокие западины заняты лугово-болотными почвами, луговыми солодами и чернозёмно-луговыми с признаками засоления (Красина, 2014).

Ландшафтная структура Окско-Донской низменности отличается чёткой широтной зональностью. В северных частях преобладают выщелоченные чернозёмы и серые лесные почвы, в центральных – лугово-чернозёмные и чернозёмно-луговые, в южных провинциях – солонцеватые и засоленные (Ахтырцев Б.П., Ахтырцев А.Б., 1993; Филь, 2025). Распределение определяется сочетанием климата, литологии и гидрологического режима.

Современное землепользование тесно связано с этой структурой: плакорные чернозёмы полностью распаханы, поймы используются как сенокосы, а западины ограничено эксплуатируются под пастбища и сенокосы (Степанцова, 2012; Филь, 2025). При этом западины играют важную роль в поддержании регионального водного баланса и биоразнообразия, служа резервуарами влаги и местами аккумуляции органического вещества.

Сельскохозяйственное использование ландшафтов западных комплексов Окско-Донской лесостепи

В пределах крупных западин, как правило покрытых древесно-кустарниковой растительностью, распашка практически отсутствует; такие формы «не затронуты пахотным использованием» и сохраняют естественные микроразнообразия почв и растительности (Ахтырцев, 1974а; 1982). В мелких и неглубоких западинах встречаются пахотные варианты лугово-чернозёмных и чернозёмно-луговых почв, но их эксплуатацию ограничивают режим сезонного переувлажнения и колебания уровня грунтовых вод (Самойлова, Якушевская, 1970; Ахтырцев, 1981).

В междуречных недренируемых типах местности структурный фон формируют лугово-чернозёмные в сочетании с чернозёмно-луговыми почвами; они «окаймляют различные понижения и покрывают плоско-вогнутые участки водоразделов, лощины, лиманы» (то есть слабонаклонённые, слабо вогнутые плакорные поверхности у бортов западин) (Ахтырцев, 1981). В этих позициях фиксируются пахотные разновидности, тогда как днища заняты лугово-болотными и солодовыми почвами, что технологически сдерживает распашку (Самойлова, 1980; Ахтырцев, Адерихин, Ахтырцев, 1981).

В крупных, но слабоврезанных депрессиях характерны чернозёмно-луговые солонцы (корковые, мелкие, среднестолбчатые), часто солончаковатые, с содовым типом засоления; поверхность их пятен понижена на 10–15 см (местами до 30–35 см) относительно окружающих почв, что делает такие массивы технологически неоднородными и ограничивает обработку в центральных пятнах (Самойлова, Бугаевский, Макеева, 1972). В глубоковрезанных формах преобладают лугово-болотные, луговые солоды и чернозёмно-луговые почвы с признаками засоления и осолонцевания; распашка здесь эпизодична (Ахтырцев, 1982).

В конце XX – начале XXI вв. «значительные площади прежде распаханых полугидроморфных почв чернозёмного ряда не обрабатывались и оказались заняты сорными видами растений», что отражает сокращение интенсивности хозяйственного использования наиболее влажных участков распаханой территории и их закрепление под естественные луга и залежи (Ахтырцев, Зайдельман, 1993). Суммарно, землепользование в западных комплексах определяется глубиной вреза, длительностью застоя влаги и степенью солонцеватости/засоления: пашня устойчива на бортах и периферии понижений, ограничена или отсутствует в днищах (Ахтырцев, Адерихин, Ахтырцев, 1981; Самойлова, 1981).

Глава 3. Объекты и методы исследования

3.1. Материалы и методы полевых работ

Полевые работы проводились в 2022-2025 гг. в течение года. при этом работы проводились по сезонам: зимние и весенние выезды проводились для мониторинга уровня снежного покрова, оценка гидрологического режима выполняли отбор проб почв Основной ключевой участок «Самойлова» (центр – 52°2'30" N, 41°11' E) расположен в Токаревском районе Тамбовской обл., в пределах недренируемого междуречья (между реками Битюг и Эртиль). Участок площадью около 3×3 км представляет собой пологую низменность без выраженной эрозионной сети: поверхность плоская, осложнённая многочисленными замкнутыми блюдцеобразными западинами глубиной 1-3 м (диаметром 20-500 м) и неглубокими понижениями (до 0,5 м). В литологическом отношении преобладают лессовидные суглинки. Больше половины площади ключевого участка занимает пашня (зерновые, подсолнечник, кормовые травы), на залежах и лугах распространены разнотравно-злаковые и влажно-луговые травянистые сообщества; в неглубоких западинах встречаются березово-осиновые колки. В крупных западинах (диаметром >100 м) развиты осоково-травяные болота и молодые осинники, мелкие западины (до 50 м) часто распаханы. В структуру севооборота на пашнях входят зерновые культуры, подсолнечник и кормовые травы.

В пределах ключевого участка было заложено 18 опорных почвенных разрезов до вскрытия горизонта почвообразующей породы и 474 точки поверхностного опробования. Кроме того, заложено 164 буровые скважины глубиной до 1,2-2 м. С учётом калибровочных разрезов за пределами ключевого участка общее число разрезов достигало 24.

Точки описаний и отбора проб выбирались по принципу максимального охвата ландшафтного разнообразия. Использовался катенный подход, где вдоль выбранного уклона – от выложенной водораздельной поверхности до днища западины – закладывается ряд почв возрастающего гидроморфизма, охватывающих полное почвенное разнообразие западинного комплекса. Для расположения точек поверхностного опробования использовался подход *multiple properties representative sampling* – точки отбирались с учётом их степени принадлежности к классам среды на основе переменных, полученных по данным дистанционного зондирования (рельеф, влажность почв, вегетационные индексы, фенологические параметры, связанные со структурой растительных сообществ и т.п.), что позволило балансировать между репрезентативностью и минимизацией избыточности выборки (Zhang et al., 2022; Ning et al., 2025). Для расположения разрезов был использован

принципиально схожий алгоритм MaxVol, применяемый для максимизации факторных различий между точками и одновременной минимизации числа точек опробования (Petrovskaya et al., 2021). Его преимущество заключается в возможности минимизировать точки опробования до минимального числа на большой территории с несущественной потерей репрезентативности, что особенно важно при высокой трудоемкости пробоотбора, характерной для работы с полнопрофильными почвенными разрезами на почвах тяжелого гранулометрического состава.

В каждом разрезе выполнялось полное морфологическое описание почвенного профиля в соответствии с руководством по полевому описанию почв (Шишов и др., 2004; Мазиров и др., 2012). Особое внимание уделялось признакам гидроморфизма: отмечались железистые и марганцевые конкреции, формы и число карбонатных новообразований. Описание профилей проводилось с обозначением глубины каждого слоя и типа почвы по генетическим признакам по классификациям СССР 1977, России 2004, WRB. Образцы брались послойно: рассыпные пробы массой 100-150 г брались из каждого горизонта (через каждые 10 см до глубины 1 м) для химических и биологических исследований. Монолиты диаметром 5-10 см отбирались для определения физических параметров внутри выделенных генетических горизонтов. Отбор проб в разрезах выполнялся с поверхности через каждые 10 см до глубины 150-160 см. Отбор поверхностных проб производился с глубины 0-15 см. В тексте работы, в разделе 4.1. морфологическое описание почв приводится в соответствии с Классификацией и Диагностикой почв России 2004 г. В остальных разделах описание приводится согласно классификации и диагностике почв СССР (1977).

Принадлежность почв к группам по степени гидроморфизма определялась на основании глубины залегания грунтовых вод в соответствии с классификацией Е.М. Самойловой (1981), А.Б. Ахтырцева (1999): эпизодически-гидроморфные (слабогидроморфные) ($УГВ > 5-6$ м), полугидроморфные (3-5 м), гидроморфные (1,5-3 м) и сильногидроморфные ($< 1,5$ м), в качестве уточняющих критериев степени выраженности гидроморфизма использовались морфологические признаки – новообразования, описанные Смирновой и др., 2024. Автоморфные чернозёмы, как и сильногидроморфные почвы в пределах ключевого участка отсутствуют.

В пределах участка в трёх точках также выполнялся автоматизированный мониторинг влажности (рис. 17 а)

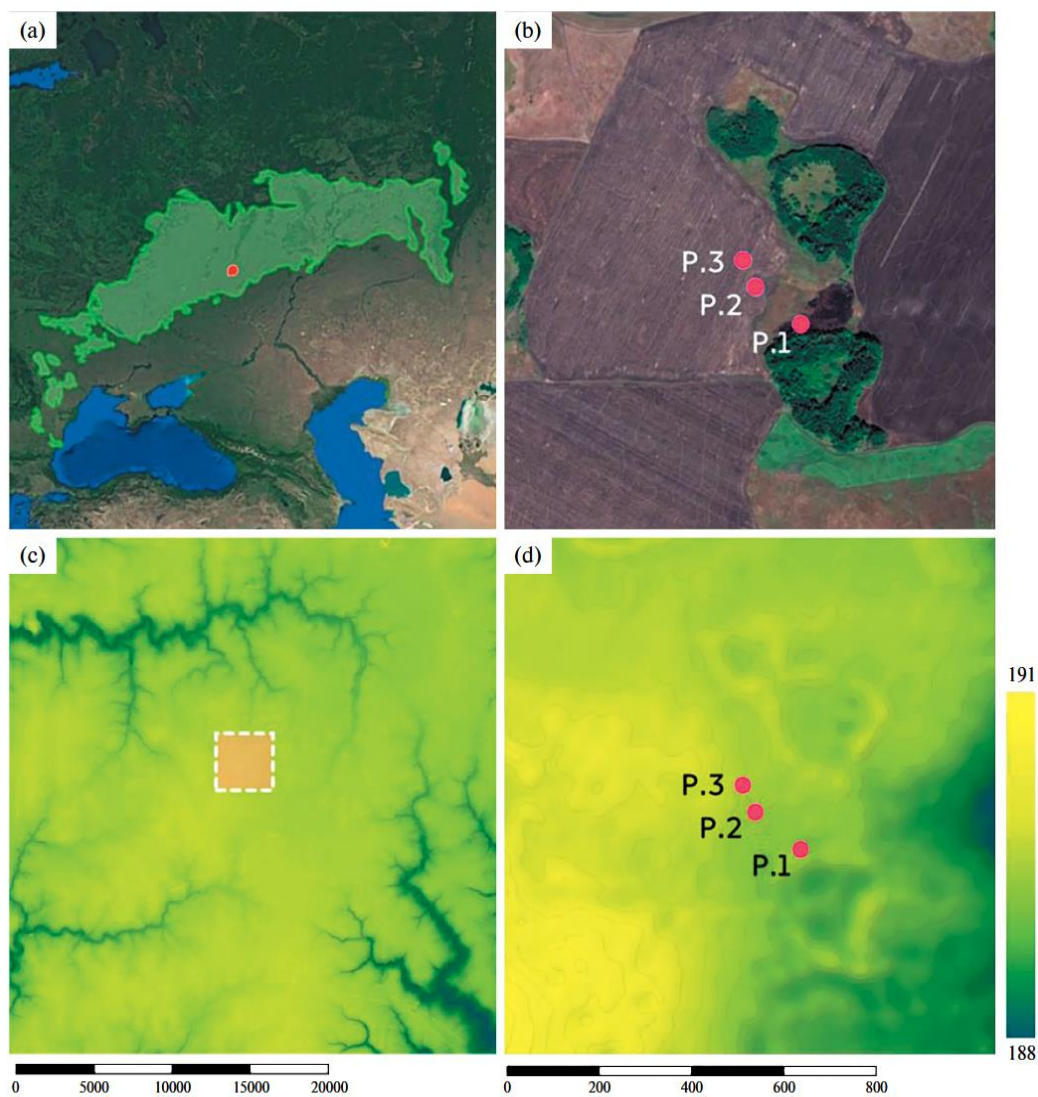


Рис. 17 а. Ключевой участок в пределах экорегиона лесостепи (а – в пределах лесостепи (границы лесостепи даны по Erdős et al., 2017; б – точки мониторинга влажности в пределах недренируемого типа местности Окско-Донской низменности; с – космический снимок с указанием положения точек мониторинга; d – рельеф участка с указанием точек мониторинга).

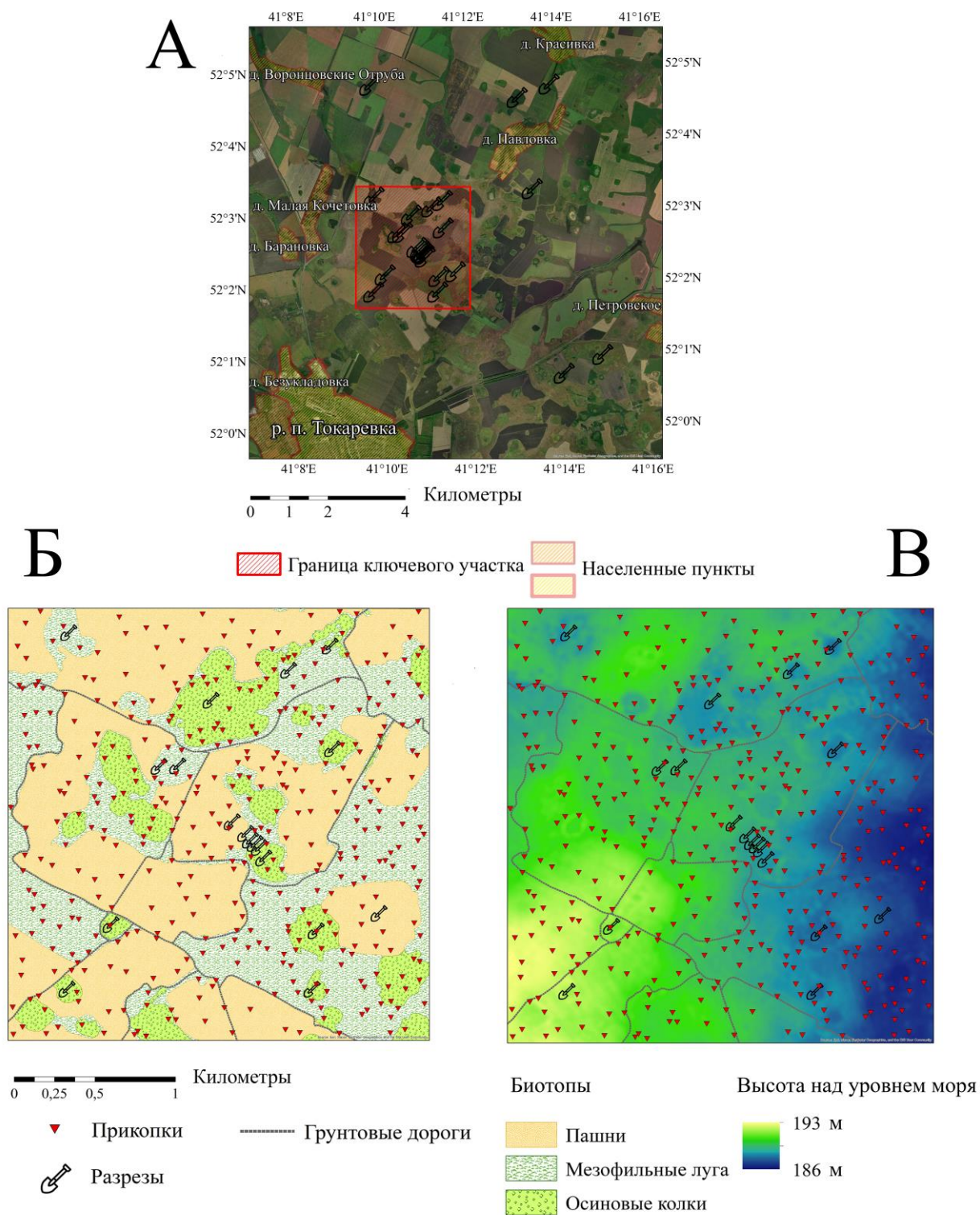


Рис. 17 б. Расположение точек отбора проб поверхностных горизонтов и точек заложения разрезов в пределах ключевого участка. А – в пределах Токаревского района Тамбовской области, Б – в пределах ключевого участка по различным биотопам, В – на цифровой модели рельефа с разрешением 2x2 м²

Автоматизированный мониторинг объёмной влажности осуществлялся на трёх участках лугово-чернозёмных почв – двух пахотных и одном фоновом

(залежном), расположенных вдоль катены длиной 185 м с перепадом высот 70 см. Местоположение точек наблюдений устанавливалось путём оцифровки и последующей геодезической привязки карты Тамбовского стационара с данными о почвенных разрезах и типах почв. Измерения влажности выполнялись с интервалом 3 часа. Период наблюдений для пахотных почв составил с 14 октября 2022 г. по 10 июля 2023 г. (270 суток), для фоновой лугово-чернозёмной почвы – с 14 октября 2022 г. по 9 января 2024 г. (453 суток); в анализ включены данные по 9 января.

Метеорологические данные о температуре воздуха и количестве осадков получены с метеостанции г. Жердевка, удалённой от объекта на 30 км. Мониторинг влажности и уровня грунтовых вод проводился с применением модернизированного логгера Promodem 120, оснащённого тремя ёмкостными датчиками на глубинах 20, 40 и 60 см и гидростатическим датчиком уровня грунтовых вод. Датчики монтировались в предварительно пробуренные скважины с сохранением естественного сложения почвы. Диапазон измеряемой объёмной влажности – 12–45 % при лабораторно подтверждённой погрешности $\pm 2\%$. Уровень грунтовых вод фиксировался от поверхности до глубины 5 м. В пяти метрах от каждой точки мониторинга были заложены полнопрофильные разрезы с морфологическим описанием и отбором образцов через каждые 10 см до глубины 1 м в трёхкратной повторности (всего 90 образцов). Почвенно-гидрологические константы приняты по Е.М. Самойловой (1981) и приведены в таблице 1. Для оценки водного баланса в марте 2023 и 2024 гг. перед началом снеготаяния выполнялась снегомерная съёмка по трансектам участка.

Таблица 1. Значения почвенно-гидрологических констант для описанных почв согласно данным Е.М. Самойловой (1981)

Почва	Глубина, см	Влажность завядания (ВЗ)	Наименьшая влагоемкость (НВ)	Полная влагоемкость (ПВ)
		% от объема почвы		
Черноземно-луговая (разрез 1)	0–8	18,3	36,5	72,1
	8–40	20,0	35	64,6
	40–70	21,7	34	57,3
Черноземно-луговая пахотная (разрезы 2, 3)	0–25	19,8	33,2	61,6
	25–50	21,2	26,9	61,6
	50–64	24,4	32,6	53,3

Полевое изучение дополнялось геоботаническими описаниями. На каждом описанном участке фиксировались тип сообщества (влажно-луговое, злаково-разнотравное, осинник неморальный и т.п.), общее проективное покрытие, видовые доминанты и принадлежность к переходному типу сообществ – экотонам.

Для учёта топографии проведена высокоточная аэросъёмка рельефа: использовался лёгкий БПЛА Geoscan-401 с лазерным сканером AGM MS1. По результатам пролетов (шаг съёмки ~2–3 см на расстоянии 70 м) получен плотный LiDAR-облачный массив, из которого в ПО Lidar360 построена цифровая модель рельефа (ЦМР) с разрешением 0,02 м (с последующей агрегацией до 2 м). На основе этой ЦМР и данными Sentinel-2 (10 м) рассчитывались топографические ковариаты (TWI, TRI, VRM, уклон и экспозиция), которые «получены по данным лидарной съёмки». Благодаря LiDAR-съёмке удалось с высокой точностью описать микрорельеф западин и сопоставить его с распределением растительности и точек почвенного опробования. По данным спутниковых снимков дополнительно оценивались вегетационные индексы, индексы влажности (EVI2, NDWI и др.).

При описании каждой точки фиксировались следующие данные: координаты и высота (по GPS-RTK), относительное положение в форме рельефа (вершина/склон/межзападинное понижение/дно западины), глубина вскрытого профиля или скважины; генетический тип почвы; детальное морфологическое описание профиля; наличие и выраженность гидроморфных признаков (железистых и чёрно-синих пятен, шероховатость поверхности, включения и новообразования Fe/Mn); отмечалась также структура опробования почвенного профиля – число образцов и глубины их отбора (для анализа органического вещества, pH, гранулометрического состава, плотности и др.).

3.2. Лабораторные работы

Лабораторные исследования выполнялись в лабораториях Эколого-геохимического научно-образовательного центра МГУ и в лабораториях Почвенного института им. В.В. Докучаева. Перед анализами образцы почвы подвергались предварительной сушке, очистке от видимых растительных остатков и гомогенизации.

Значения pH и общую минерализацию (TDS) водных вытяжек определяли кондуктометрическим методом. Гранулометрический состав анализировали методом лазерной дифракции на приборе Microtrac Bluewave (США); перед измерением суспензии диспергировались ультразвуком (450 Дж/мл).

Анионный и катионный состав вытяжек устанавливали методом ионной хроматографии. Обменные катионы выделяли по методу Пфедфера в модификации Молодцова и Игнатовой; их состав определяли с применением

ионной хроматографии, комплексонометрического титрования, пламенной фотометрии и атомно-абсорбционной спектрометрии.

Содержание аморфных форм железа определяли в оксалатной вытяжке по Тамму, валового несиликатного железа – в дитионит-цитратной вытяжке по Мера–Джексону; измерения выполнялись фотометрически. В качестве индикаторов гидроморфизма рассчитывали критерий Швертманна (соотношение оксалат- и дитионит-растворимых форм Fe) и коэффициент степени гидроморфизма – отношение оптических плотностей щелочной и пирофосфатной вытяжек при 440 нм.

Органический углерод

Растертые пробы на органический углерод просеивали через сито с ячейкой размером 0,1 мм. Определение содержания органического и неорганического углерода проводилось также методом сжигания на приборе Метавак.

Фракционирование органического углерода по степени устойчивости к окислению проводилось с использованием метода Савича-Соколова. Для определения содержания среднеокисляемой фракции органического углерода навеска почвы подвергалась высокотемпературному воздействию при 150 °С, но в течение 5 минут. Разница величин, полученных при 30- и при 5-минутном нагревании, характеризует содержание трудноокисляемых соединений. Ещё одна навеска, обработанная хромовой смесью, не подвергалась дополнительному термическому воздействию; титрование избытка хрома сульфатом железа (II) проводилось спустя 10 минут после добавления к навеске почвы раствора хромовой смеси. Это значение соответствовало содержанию легкоокисляемых соединений. Разница между результатами, полученными при 5-минутном высокотемпературном и 10-минутном холодном окислении, показывает содержание среднеокисляемых органических соединений (Соколов, 2009; Савич, 1980).

Состав окислительно-восстановительных систем почв имеет сложную гетерогенную природу. Он включает компоненты литогенного, биогенного, хемогенного и педогенного происхождения. Фракция трудноокисляемых восстановленных веществ имеет преимущественно литогенное происхождение. Среднеокисляемые восстановленные соединения представлены главным образом хемогенными и педогенными продуктами. Легкоокисляемые восстановленные вещества обладают наиболее сложной природой, сочетая хемогенные, педогенные и биогенные компоненты.

Фракционирование гумусовых кислот проводилось по методу Пономаревой-Плотниковой (1980). Метод предусматривает разделение на

четыре фракции фульвокислот, три фракции гуминовых кислот и негидролизующий остаток.

Фракционирование гумусовых кислот позволяет выделить структурные компоненты органического вещества почв и проследить соотношение фульвокислот и гуминовых кислот, а также выделить негидролизующий остаток. В совокупности с данными по степени окисляемости такие результаты позволяют оценить происхождение и устойчивость органических соединений в почвах западных комплексов.

3.3. Данные и их обработка

Обработка данных выполнялась с использованием библиотек на языках Python и R. Исходные данные были сведены в формате электронных таблиц Excel. Первичным этапом являлась валидация записей: исключались дублирующиеся строки, проверялась непротиворечивость значений, единицы измерения приводились к единому формату. Для каждой точки измерений фиксировался уникальный идентификатор, что обеспечивало возможность объединения почвенных данных с пространственными ковариатами.

Результаты лабораторных измерений по содержанию органического углерода, распределению гранулометрических фракций, составу обменных катионов, а также значения коэффициентов степени гидроморфизма и критерия Швертмана были представлены в сводных таблицах. Для каждого показателя рассчитывались средние значения, стандартные отклонения и доверительные интервалы, что позволяло выявить устойчивые диапазоны изменчивости. Значения, выходящие за пределы доверительного интервала, рассматривались как выбросы и исключались из дальнейших расчётов, при этом исходная информация сохранялась для контроля качества. Данные по углероду, полученные разными методами (сухое сжигание и метод Тюрина), были приведены к сопоставимой шкале с использованием коэффициентов пересчёта, принятых в отечественной литературе (Королёв, Громовик, 2020, Шамрикова, 2024). Фракции органического вещества, выделенные по методике Пономарёвой–Плотниковой и Соколова–Савича (Соколов, 2009; Савич и др., 1980), систематизировались по категориям легко, средне- и трудноокисляемых соединений, после чего вычислялись их относительные доли в составе почвенного органического вещества.

Гранулометрический состав, полученный методом лазерной дифракции, и определенный в соответствии с методом Качинского, был агрегирован в укрупнённые группы: песчаная, илистая и глинистая фракции в соответствии с классификацией USDA (USDA, 2017). Это позволило использовать данные

как входные переменные в моделях, одновременно сократив избыточность признаков. По результатам анализа водных вытяжек рассчитывались показатели минерализации и солевого состава. Анионно-катионные данные были нормированы к единому выражению в ммоль(+) на 100 г почвы, что обеспечивало сопоставимость между разными сериями. Для оценки степени переувлажнения по данным о железе были вычислены значения критерия Швертмана (отношение оксалат- и дитионит-растворимых форм) и коэффициента гидроморфизма (отношение оптических плотностей щелочной и пирофосфатной вытяжек при 440 нм). Эти индексы рассчитывались для каждого горизонта, затем усреднялись по профилям и использовались как диагностические параметры при статистической обработке.

После получения сводных таблиц лабораторные и полевые данные были объединены с массивами дистанционного зондирования и топографическими характеристиками. Спутниковые данные Sentinel-2 проходили предварительную фильтрацию: из временных рядов исключались сцены с облачностью и снегом, определяемые по индексам NDWI и NDSI. Индекс EVI2 использовался как основной индикатор сезонной динамики растительности. Для каждого пикселя формировался ряд за период 2019–2023 гг., пропуски восполнялись методом Савицкого–Голея, обеспечивающим сглаживание кривой без искажения ключевых фаз. Из полученных рядов извлекались фенологические показатели: начало и окончание сезона, длительность, амплитуда, угловые коэффициенты весеннего отрастания и осеннего отмирания, интегральная продуктивность. Все эти значения усреднялись по пятилетнему периоду и заносились в таблицы в привязке к точкам отбора проб.

Лидарные данные, полученные с беспилотного летательного аппарата, были преобразованы в цифровую модель рельефа. Первоначально облака точек подвергались геодезической коррекции и классификации, после чего выделялась поверхность земли. На основании триангулированной кривизны строился цифровой рельеф с разрешением 2 см, затем агрегированный до 2 м и приведённый к шагу 10 м с использованием бикубической интерполяции. Для устранения мелкомасштабных искажений применялся фильтр на основе преобразования Фурье. Полученные данные репроецировались в систему координат WGS84 и согласовывались по разрешению с космическими данными. По цифровой модели рельефа рассчитывались производные показатели – уклон, экспозиция, индекс влажности, которые также интегрировались в общую базу.

3.4. Методы статистического моделирования

Для анализа факторов, определяющих пространственную вариацию содержания почвенного органического углерода в поверхностных горизонтах почв (0-15 см, где 15 см – максимальная глубина поверхностного горизонта), применялся множественный регрессионный анализ с разделением предикторов на три группы: гидрологические, топографические (связанные с рельефом), биотические и химические, отдельно учитывалось влияние рН, а также истории обработки.

История обработки для каждого поля в пределах ключевого участка была восстановлена по данным опроса земледельцев и охватывала последние 20–30 лет. Учитывались тип культуры (зерновые, подсолнечник, кормовые травы), наличие и продолжительность залежного периода, факт применения удобрений. Эти данные были введены в модели в качестве категориальных признаков.

Структура выборки и статистики приведены в таблице 4. Для каждой группы и их комбинаций рассчитывался коэффициент детерминации R^2 . Независимый вклад каждой группы определялся методом последовательного исключения из полной модели (Gilbert & Bennet, 2010). Разница между R^2 полной и укороченной моделей интерпретировалась как уникальный вклад соответствующей группы.

Исходные данные включали точечные данные о содержании углерода и пространственные предикторы, полученные из ЦМР, спутниковых индексов и результатов лабораторного анализа проб (табл. 2). Все предикторы стандартизировались методом z-преобразования перед построением моделей.

Для анализа пространственного распределения углерода и выявления факторов его формирования, накопления и стабилизации необходимы пространственные модели, способные работать с комплексом предикторов (параметры рельефа, растительность, дистанционные индексы, гидрологические характеристики). Методы машинного и глубокого обучения позволяют не только повысить точность прогноза, но и оценивать неопределённость через доверительные интервалы, что делает возможным их практическое применение в задачах углеродного мониторинга и планирования землепользования (Padarian et al., 2019; Zhu et al., 2019, Zou et al., 2022).

Для анализа пространственного распределения углерода выбраны точки поверхностного опробования, где каждой точке соответствует единственный гомогенизированный образец с глубины 0-15 см, соответствующей этой точке. В обучающую выборку, таким образом, были включены 474 наблюдения.

Моделирование пространственной неоднородности почвенного углерода осуществлялось с использованием методов машинного обучения и глубокого обучения. В основе подхода лежит принцип цифрового прогнозного почвенного картографирования SCORPAN (McBratney et al., 2003), где свойства почв описываются через факторы почвообразования и их пространственные и пространственно-временные ковариаты.

В качестве зависимой переменной («таргета») использовалось содержание органического углерода в исследуемом образце, определенное на анализаторе Метавак.

В качестве предикторов использовались описанные выше данные дистанционного зондирования (спутниковые и БПЛА), топографические индексы (TWI, TPI, SPI, RgI, TRI, VRM), спектральные и вегетационные индексы (NDVI, EVI2, NDWI, PPI, MSAVI), а также фенологические характеристики растений (SOSD, EOSD, длительность сезона, внутрисезонная амплитуда, GUP, GDOWN, TP).

Таблица 2. Набор ковариат (признаков), использованных при моделировании и их типы

Переменная	Тип	Источник	Разрешение
TWI	топография	ЦМР по данным LiDAR (БПЛА)	2 м
TRI	топография	ЦМР по данным LiDAR (БПЛА)	2 м
Slope	топография	ЦМР по данным LiDAR (БПЛА)	2 м
Roughness	топография	ЦМР по данным LiDAR (БПЛА)	2 м
SPI	топография	ЦМР по данным LiDAR (БПЛА)	2 м
VRM	топография	ЦМР по данным LiDAR (БПЛА)	2 м
Aspect	топография	ЦМР по данным LiDAR (БПЛА)	2 м
TPI	топография	ЦМР по данным LiDAR (БПЛА)	2 м
NDWI	влажность	Sentinel-2	10 м
MSAVI	вег. индекс	Sentinel-2	10 м
NDVIre3	вег. индекс	Sentinel-2	10 м
NDVIre1	вег. индекс	Sentinel-2	10 м
EVI2	вег. индекс	Sentinel-2	10 м
BI2	вег. индекс	Sentinel-2	10 м
Конец вег. сезона (EOS)	фенология	Sentinel-2	10 м
Начало вег. сезона (SOS)	фенология	Sentinel-2	10 м

Наклон вег. Кривой в начале сезона (Greenup)	фенология	Sentinel-2	10 м
Наклон вег. Кривой в конце сезона (Greendown)	фенология	Sentinel-2	10 м
Сезонная амплитуда индекса	фенология	Sentinel-2	10 м
Продолжительность сезона (Season Len)	фенология	Sentinel-2	10 м
Совокупная продуктивность (TP)	фенология	Sentinel-2	10 м
pH	Физ-хим параметр по данным наземного опробования	Полевое опробование	Точечные данные

Фенологические параметры извлекались из сглаженных временных рядов вегетационного индекса EVI2 по данным Sentinel-2 за 2019–2023 гг. Начало вегетационного сезона (SOS) и его окончание (EOS) определялись как даты пересечения фенологической кривой порогового уровня, равного 20% от сезонной амплитуды (Zeng et al., 2020). Продолжительность сезона (Season Length) рассчитывалась как разность EOS и SOS. Сезонная амплитуда – разность между максимальным и минимальным значениями индекса в пределах одного сезона. Скорость весеннего нарастания (Greenup) и осеннего спада (Greendown) – угловые коэффициенты линейной аппроксимации фенологической кривой на восходящем и нисходящем участках. Совокупная продуктивность (TP) – интеграл значений индекса за вегетационный сезон.

Модели

Для предсказания содержания углерода в поверхностном слое почвы были выбраны следующие виды моделей машинного обучения: линейная регрессия (LR), регрессия частичных наименьших квадратов (PLSR), случайный лес (RF). С учетом особенностей набора признаков в дополнение к перечисленным моделям был использован алгоритм CatBoost (CB). Обучение моделей проводилось в среде JupyterHub на языке Python на мощностях ситуационно-аналитического центра почвенного института им. В.В. Докучаева.

Архитектура нейронной сети для пространственного прогноза почвенного органического вещества

Глоссарий терминов, в т.ч. описывающих структуру нейросетевой модели приведен в разделе «Обозначения и сокращения». Модель CovNet-LSTM-MLP была разработана для интеграции разномодальных данных, полученным по данным наземного опробования, дистанционного зондирования с БПЛА и спутников (рис. 18). В архитектуре модели

пространственные признаки извлекаются из данных с помощью сверточной нейронной сети (CNN), временные закономерности выделяются из фенологических временных рядов при помощи рекуррентной сети архитектуры LSTM, а дискретные переменные, значения которых были получены в точках (например, pH), учитываются через отдельную полносвязную (fully-connected) нейронную сеть. Подробная архитектура сети приведена в приложении 1.

Пространственные данные предварительно обрабатывались по методике Zhang et al. (2022). Вокруг каждой точки отбора проб формировалась «окрестность» площадью 50×50 м, чтобы учесть пространственный контекст точки опробования. Построение «окрестностей» особенно актуально для точек, находящихся в экотонах (Tian et al., 2021). При пространственном разрешении исходных растров 10 м такие окна формировали матрицы размером 5×5. Извлечение локальных окон из растров выполнялось в Python с использованием библиотеки OpenCV (Bradski, Kaehler, 2008).

Компонент CNN обрабатывает полученные локальные окна: два сверточных слоя извлекают пространственные признаки, каждый слой сопровождается пакетной нормализацией и функцией активации Leaky ReLU, далее применяется max-pooling (2×2), уменьшающий размерность. Результирующие карты признаков переводятся в одномерный вид и преобразуются через полносвязный слой в 16-мерное представление.

Компонент LSTM предназначен для извлечения временной динамики из фенологических рядов. Он обрабатывает последовательные данные в формате batch-first. Из выходных данных выбирается вектор признаков, соответствующий финальному временному шагу, который затем проходит через полносвязный слой с активацией Leaky ReLU, формируя 16-мерное временное представление.

Ветвь MLP обрабатывала точечные данные: значения pH и ковариаты, извлеченные из растров в конкретных точках. Каждое точечное значение, таким образом, преобразовывалось в конкретный скаляр. Каждый скаляр преобразовывался в 16-мерный вектор признаков при помощи последовательности линейных слоёв, функции активации ReLU и пакетной нормализации. Дополнительно рассчитывались нелинейные производные признаки, например произведения ковариат. Все выходы конкатенировались в единое представление – результаты расчета переводились в модель.

Выходы трёх компонентов – CNN, LSTM и MLP – конкатенируются в составной 48-мерный вектор признаков. Это интегрированное представление обрабатывается финальной полносвязной сетью, включающей линейный слой, активацию SiLU и dropout (0,2 из-за ограниченного размера обучающей

выборки), после чего заключительный линейный слой формирует итоговое скалярное предсказание.

Обучение моделей

Для минимизации числа объясняющих признаков и борьбы с мультиколлинеарностью проводился корреляционный анализ вклада переменных в предсказание модели. Мы рассчитывали коэффициент корреляции Пирсона между зависимой и независимыми переменными.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

где (n) – число точек выборки, (x_i) – предсказанное значение $C_{\text{орг}}$ в точке i , (y_i) – измеренное значение $C_{\text{орг}}$ в точке (i) , а (\bar{x}) и (\bar{y}) обозначают среднее предсказанное и среднее наблюдаемое значение $C_{\text{орг}}$ соответственно.

Пары признаков с коэффициентом корреляции Пирсона $|r| > 0,9$ исключались для устранения мультиколлинеарности. Порог 0,9 принят в качестве стандартного для исключения из выборки фактически дублирующих переменных (Dormann et al., 2013). В результате был сформирован единый массив данных, включающий как результаты аналитических измерений, так и производные показатели дистанционного и топографического анализа.

Обучение и оценку моделей проводили с использованием Python 3.11, библиотеки torch 2.2.1 и CUDA 12.1, на двух видеокартах NVIDIA RTX 4090 (24 ГБ), предоставленных ситуационно-аналитическим центром Почвенного института им. В.В. Докучаева.

Из-за малого объёма выборки при обучении моделей данные в пределах ключевого участка не разделялись на тренировочную и тестовую выборки. Вместо этого применялась пространственно-кластеризованная кросс-валидация (перекрёстная проверка) на 5 подвыборках (spatial clustering 5-fold CV) для получения предсказаний по всем точкам отбора (Mahoney et al., 2023).

Для настройки гиперпараметров внутри каждой подвыборки тренировочные данные дополнительно делились на поднаборы (обучающая / валидационная подвыборки), а оптимальные гиперпараметры выбирались по качеству предсказания модели на валидационной части на валидационной части. Признаки (ковариаты) стандартизировались внутри каждой части обучения подвыборки (StandardScaler).

Оценка качества пространственного прогноза

Точность прогноза оценивалась с помощью следующих метрик: корень средней квадратичной ошибки (RMSE), отношение производительности к

межквартильному размаху ($RPIQ$) и коэффициент детерминации (R^2). Метрики вычисляются по формулам:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}$$

$$RPIQ = \frac{IQ}{RMSE}$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2}$$

Где \hat{y}_i = предсказанное значение, \bar{y}_i = выборочное среднее, y_i = наблюдения, n = число наблюдений, где $i = 1, 2, \dots, n$, и IQ – выборочный межквартильный интервал (разница между квартилями $Q3$ и $Q1$).

После обучения оценка важности признаков проводилась методами SHAP (для деревьев, линейных и моделей глубокого обучения) или через чувствительность к комбинаторной перестановке (permutation loss) для моделей SVR и Cubist, результаты оценки важности признаков нормировались в диапазон от 0 до 1 (Marccilio, Eler, 2020).

Оценка неопределенности пространственного прогноза

Анализ неопределённости прогнозов содержания органического углерода (SOC) проводился посредством бутстрэппинга (Dvorakova et al., 2023). Из исходной выборки 1000 раз выбиралось некоторое произвольное подмножество наблюдений. На каждой итерации бутстрэппинга модель переобучалась на выбранном подмножестве, и затем вычислялись предсказания для всей исследуемой территории. Для каждой точки формировался ансамбль бутстрэп-прогнозов, из которого рассчитывалось среднее предсказание в точке ($MEAN_{boot}$) и дисперсия в точке (Var_{boot}). К полученной точечной дисперсии прибавлялась оценка среднеквадратичной ошибки (MSE_{cv}), извлеченная из кросс-валидации, чтобы получить общую дисперсию в данной точке:

$$Var_{all} = Var_{boot} + MSE_{cv}$$

Стандартная ошибка (SE) рассчитывалась как квадратный корень из Var_{all} , умноженный на z-значение (1,96 для 95% доверительного интервала):

Границы интервала предсказания (верхняя и нижняя) задавались как:

$$UPL = MEAN_{boot} + SE,$$

$$LPL = \text{MEAN}_{boot} - SE$$

Разница между UPL и LPL определяется как диапазон интервала предсказания (PIR):

$$PIR = UPL - LPL$$

Все расчеты выполнены в python с использованием библиотек scikit-learn, pandas, scipy, а также геопространственных библиотек (geopandas, fiona). Для рН почвы, точечные значения которого были использованы как ковариата, применялась интерполяция методом ординарного кригинга (экспоненциальная модель, дальность = 1160 м, nugget = 0.10, sill). неопределённость ПОВ оценивалась также через применение фильтра стандартного отклонения с окном 5×5 ячеек поверх карты $C_{орг}$. Для проверки различий дисперсий $C_{орг}$ между внутренними частями биотопов и их краями применялся тест Левена (Levene's test).

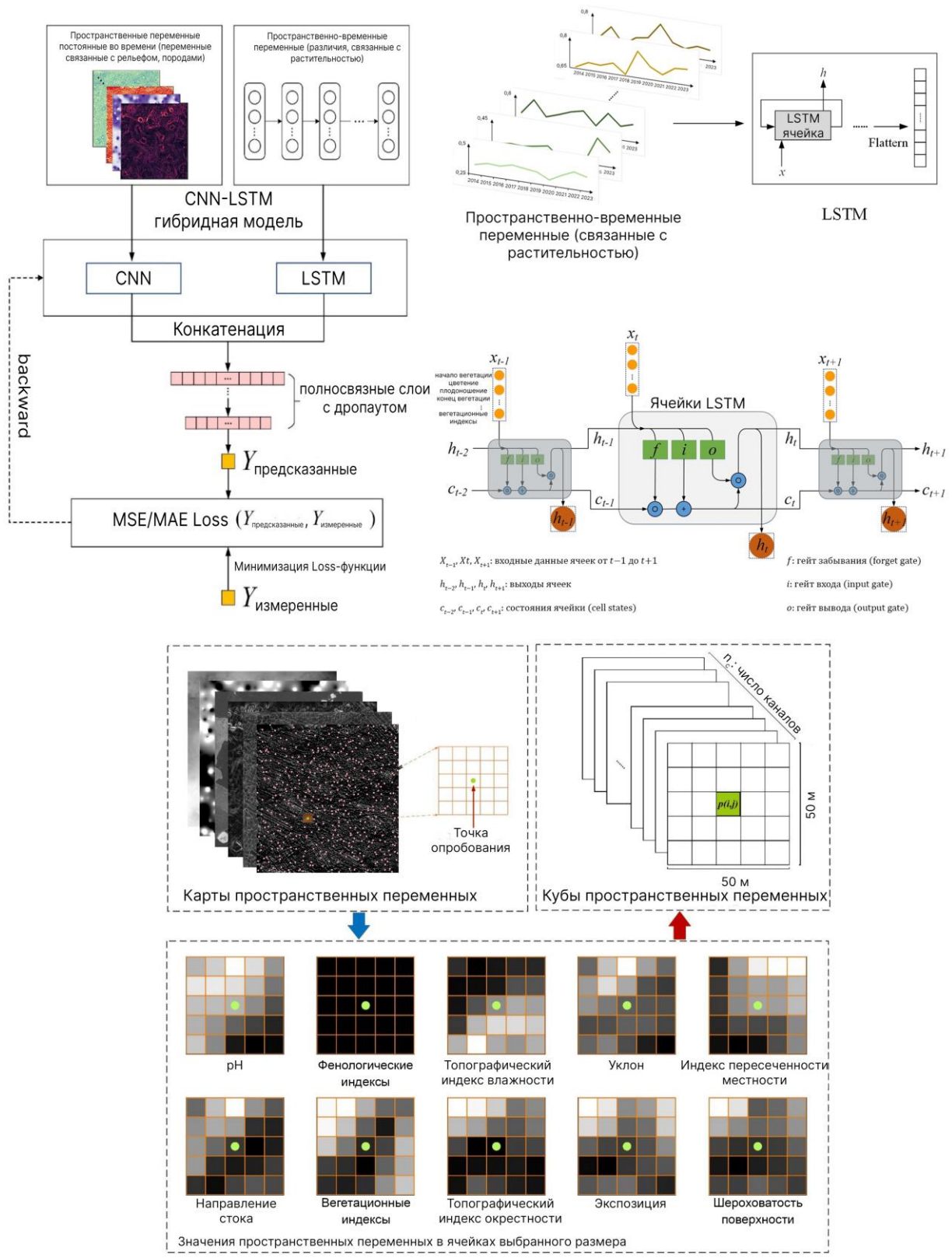


Рис 18. Концептуальная схема обработки пространственных данных разработанной архитектурой нейронной сети

3.5. Методы имитационного моделирования (SoilGen)

Имитационное моделирование является одним из наиболее надёжных подходов для анализа динамики почвообразовательных процессов, поскольку позволяет воспроизводить многолетние изменения углеродного цикла, которые невозможно отследить в рамках краткосрочных полевых наблюдений. В рамках данной работы для этих целей использована модель SoilGen, представляющая собой одномерную процессно-ориентированную модель педогенеза (Finke, Hutson, 2008).

SoilGen интегрирует несколько блоков: водный и тепловой режим, трансформацию органического вещества и эволюцию минерального состава профиля. Водный режим рассчитывается на основе уравнения Ричардса (Richards, 1931), которое решается методом Кранка–Николсона, с параметризацией кривых влагоудерживания по ван Генухтену (van Genuchten, 1980). Тепловой блок реализует одномерное уравнение теплопроводности (Carslaw, Jaeger, 1959), где теплоёмкость и теплопроводность зависят от влажности и температуры почвы. Нижняя граница профиля задаётся либо через фиксированный поток воды (условие Неймана), либо через положение уровня грунтовых вод по закону Дарси.

Органический блок построен на модифицированной схеме RothC (Coleman, Jenkinson, 1996). Органический опад делится на несколько пулов – «легкоразлагаемый» лабильный пул, «устойчивый» стабильный пул, пул биомассы и пул почвенного гумуса. Скорости разложения зависят от температуры и влажности почвы, причём влаговый модификатор задаётся через величину накопленного дефицита влаги в верхнем горизонте (TSDM).

Входные параметры задаются системой текстовых файлов. В одном файле фиксируются гранулометрический состав и плотность почвы, а также водоудерживающие характеристики. В другом – минералогический состав профиля, включая массовые доли первичных и вторичных минералов. Файл, описывающий органический блок, содержит распределение углерода по пулам органического вещества. Отдельно формируется климатический файл, включающий среднемесячные температуры, осадки и потенциальную эвапотранспирацию, а также параметры растительного покрова. Такая структура позволяет задать как исходные свойства профиля, так и граничные условия внешней среды.

Характерной особенностью модели является адаптивный временной шаг, который варьируется в зависимости от скорости протекания процессов. Это позволяет в рамках единой системы воспроизводить как быстрые колебания гидрологического режима, так и медленное накопление или трансформацию гумусовых соединений (Finke, 2012). Временной горизонт

моделирования может быть очень широким: от десятков лет до тысячелетий. В ряде исследований SoilGen применялась для реконструкции эволюции почв от последнего ледникового максимума до современности (Finke, Hutson, 2008).

В рамках данного исследования модель использовалась для анализа полугидроморфных почв западных комплексов лесостепи Окско-Донской низменности. Период симуляций ограничен последними десятилетиями (1972–2022 гг.), что позволило сосредоточиться на процессах, протекающих в условиях современного климата и землепользования. В качестве объектов моделирования были выбраны лугово-чернозёмные почвы межзападных пространств (залежь) и луговые солоды западин.

Модельный эксперимент включал последовательность шагов: подготовку исходных данных о гранулометрическом, минералогическом и органическом составе профиля, формирование климатических рядов, описывающих температурный и осадочный режим, а также задание характеристик растительного покрова и структуры опада. На основании этих данных SoilGen позволяла воспроизвести общий баланс углерода и особенности его перераспределения в пределах профиля.

Глава 4. Почвенное органическое вещество западных комплексов лесостепи Окско-Донской низменности и условия его формирования

4.1. Свойства почв западного комплекса лесостепи Окско-Донской низменности и их динамика за 50-летний период

Морфологическое строение почв

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. Опорные разрезы были заложены в местах, ранее изученных Е.М. Самойловой в 1969–1973 гг., где проводились режимные наблюдения за влажностью и определялись химические, физические и физико-химические свойства почв.

Морфологические описания разрезов приведены в приложении 2.

В днище западины (разрез 4, рис. 19) почва представлена грубогумусово-глеевой потечно-гумусовой элювиированной, соответствующей дерново-глеевым по классификации 1977 г. Она характеризуется мощным грубогумусовым горизонтом (32 см), верхняя часть которого обильно пронизана корнями травянистых растений. Ниже залегает плотный, глинистый глеевый горизонт, в котором по окраске выделяются три субгоризонта: гумусово окрашенный верхний слой (Ghi), осветлённый с редкими охристыми и сизыми пятнами и конкрециями Fe–Mn (Gel), и окисленно-глеевый (Gox), неоднородный по окраске.

Для сопоставления использован разрез 4–76, заложённый Самойловой на склоне западины в 25 м от С1. Эта почва диагностирована как луговая осолодевшая почва с профилем A₀(3,5)–A₁(16,5)–A_{2g}(17)–Bg(>100 см). Морфологическое строение обеих почв сходно, однако почва днища отличается большей мощностью гумусового горизонта и меньшей – осветлённого. Характер изменения pH по профилю также близок: от 5,5 в верхних горизонтах до 7,2–7,5 на глубине 90 см. Оба разреза слабо засолены, преобладающими катионами являются Ca²⁺ и Mg²⁺, анионами – HCO₃⁻ и SO₄²⁻. При этом солодь характеризуется более высоким содержанием легкорастворимых солей, что связано с меньшими объёмами промачивания по сравнению с почвой днища западины.

Разрез 3 представлен солодью перегнойно-тёмногумусовой квазиглеевой или солодью луговой – лугово-болотной (1977). Для неё характерен мощный гумусовый горизонт (АН, 14-17 см), окрашенный в тёмно-серые тона, рыхлый, с хорошо выраженной мелкокомковато-зернистой структурой и обильным количеством корней. Ниже залегает элювиальный горизонт (EL_{hi} , до 25-28 см), палево-светло-серый, местами с потёками гумуса и охристыми пятнами по корневым порам. Под ним формируется иллювиально-текстурный горизонт ВТ_q (25-60 см), охристо-бурый с оливковым оттенком, с ржавыми пятнами по ходам корней, плотный, ореховато-призматической структуры, с кутанами и железо-марганцевыми конкрециями. На глубине 50-115 см развиты горизонты ВТ(са)_q, сохраняющие окраску и структуру верхнего иллювиального слоя, но содержащие больше кутан, ЖМК, а также карбонатные новообразования (белоглазка, псевдомицелий, скелетаны). Здесь фиксируется слабое вскипание от HCl. В основании профиля залегает карбонатный квазиглеевый горизонт Qca (115–165 см), буро-оливковый с палевыми и сизыми зонами, массивный, плотный, глинистого состава. Встречаются белоглазка, журавчики, редкие кутаны, многочисленные сизые пятна. Вскипание от HCl выражено отчётливо.

У противоположного борта западины также формируются полугидроморфные почвы с признаками осолодения. Разрез 5 представлен солодью темногумусовой глеевой, или луговой осолоделой (1977) характеризующейся относительно мощным гумусовым горизонтом и выраженным осветлённым элювиальным горизонтом, сменяющимся иллювиально-текстурными и оглеенными горизонтами. Верхний гумусовый горизонт (АН, 0-22(28) см) окрашен в тёмно-серые тона с бурым оттенком, рыхлый в верхней части, книзу уплотнённый. Структура в минеральной массе зернистая до комковатой, обильно пронизан корнями. Переход резкий по окраске, граница слабоволнистая с отдельными языками гумуса. Вскипания от HCl не отмечено. Ниже залегает элювиальный горизонт (AU_{ehi}/EL_{hi} , 22(28)–34(37) см), палево-светло-серый с сизыми тонами и охристыми пятнами. По языкам гумуса наблюдается комковатость. Под ним формируется иллювиально-текстурный горизонт (Qt/ВТ_q, 34(37)–52(60) см), грязно-серый до оливкового цвета, сырой и плотный. Структура слабо выражена, творожистая, в верхней части с ореховатостью. Встречаются единичные корни, угольки, редкие железо-марганцевые конкреции и ОЗПМ. Ниже (52(60)–95 см) развит квазиглеевый горизонт (CQ), окрашенный в охристо-ржавые тона с сизыми пятнами. Почва сырая до мокрой, плотная, структура слабая творожистая до ореховатой. Новообразования представлены ОЗПМ и очень редкими железисто-марганцевыми конкрециями. Карбонатов не отмечено на всей глубине профиля.

Чернозём квазиглеевый (разрез 2), соответствующий лугово-чернозёмной почве (р. 21 у Самойловой), по набору и мощности горизонтов близок к описанию 50-летней давности. В отличие от старых данных, в профиле не выявлены карбонатные новообразования, зато диагностированы железо-марганцевые конкреции. Признаки оглеения фиксируются с глубины 85 см (ранее – с 140 см). Если ранее максимум солей приходился на верхнюю часть профиля, то сейчас он смещён на глубину более 30 см.

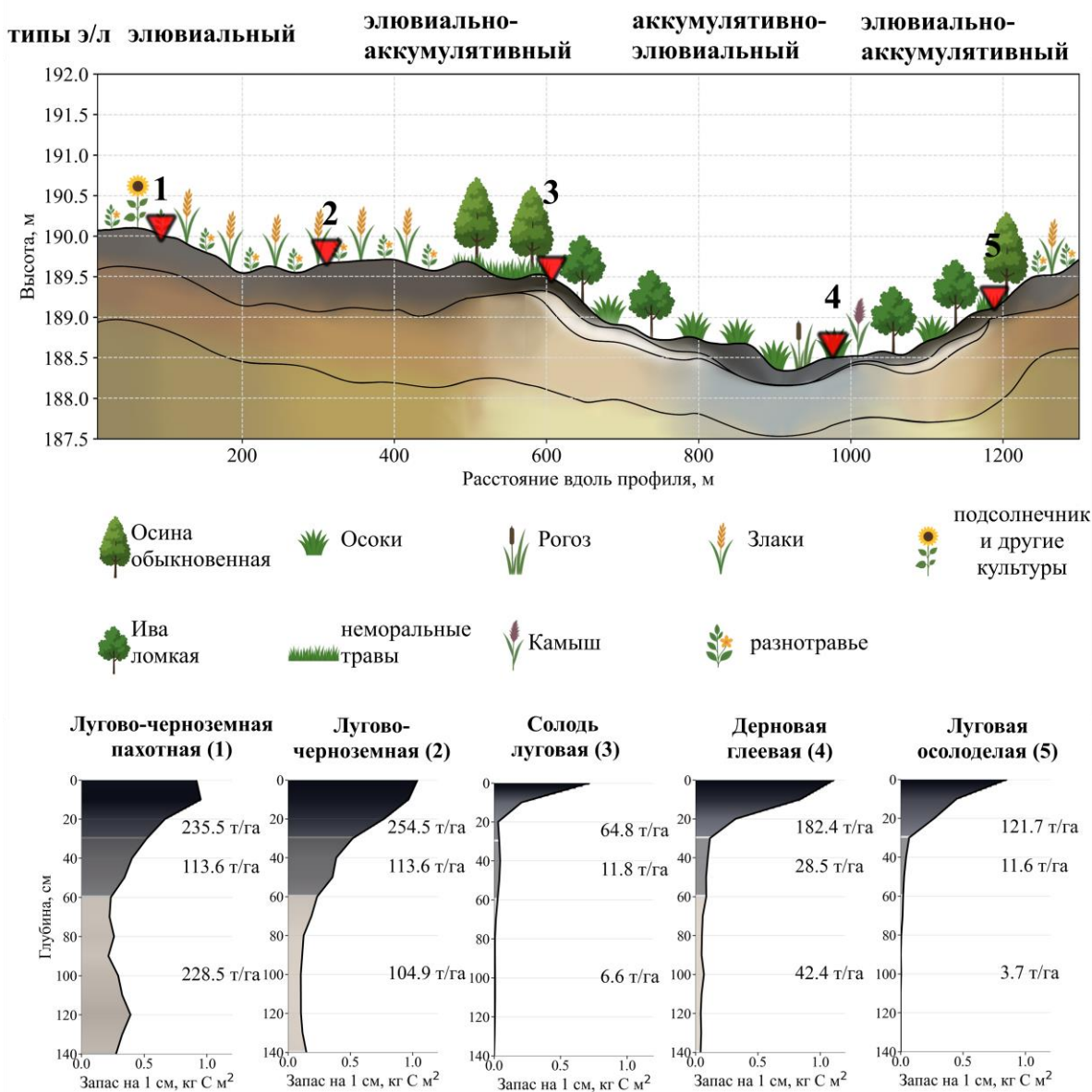


Рисунок 19. Катена гидроморфного ряда почв западного комплекса Окско-Донской лесостепи с запасами углерода по разным частям профиля

Разрез 1 представлен агрочернозёмом квазиглеевым (рис. 19), соответствующим лугово-чернозёмной пахотной почве. Совпадают набор горизонтов и их мощности, глубины появления кутан и карбонатных

конкреций. Характер изменения рН близок, однако содержание легкорастворимых солей в современных образцах примерно в два раза выше, чем по данным Самойловой. В составе катионов преобладает Na^+ , тогда как ранее доминировал Ca^{2+} .

Физические свойства почв катены за полувековой период изменились минимально. Плотность верхних горизонтов составляла $0,6\text{--}1,1 \text{ г/см}^3$, нижних – $1,3\text{--}1,7 \text{ г/см}^3$. По гранулометрическому составу все профили относятся к классу Silt Loam (рис. 23). В разрезах 1, 2 и 4 профили сложены лёгкой глиной, без выраженной дифференциации по глубине. В разрезах 3 и 5 верхние горизонты более лёгкого состава – тяжёлые и средние суглинки, ниже также встречается лёгкая глина.

Почвы катены демонстрирует общее сходство морфологического строения, однако при сравнении с материалами Самойловой зафиксированы изменения: смещение вниз по профилю максимумов легкорастворимых солей, появление или исчезновение новообразований (Fe–Mn конкреций, карбонатов), а также некоторое перераспределение катионного состава растворов. При этом глубина вскипания изменилась менее чем на 20 см, характер профилей в целом сохранился.

Влажность и водный режим лугово-черноземных пахотных и залежных почв микрокатены по данным автоматизированного мониторинга

Автоматизированный мониторинг влажности и уровня грунтовых вод проводился для микрокатены лугово-черноземных почв за пределами западины – двух пахотных и одной залежной.

Влажность лугово-чернозёмных пахотных и залежной почв в 2022–2023 гг. характеризовалась значительной сезонной изменчивостью и выраженными различиями между пашней и залежью. В фоновой лугово-чернозёмной почве слой 0–20 см с осени до начала апреля находился в диапазоне от НВ до ПВ, затем быстро иссушался. Период с оптимальными значениями влажности (ВЗ–НВ) составил всего около полутора месяцев и приходился на конец весны; в остальное время верхний слой был либо переувлажнён зимой и ранней весной, либо пересушен в летне-осенний сезон. Уже с конца апреля влажность на глубине 20 см опускалась ниже ВЗ и оставалась такой вплоть до зимы (рис. 20).

В пахотных лугово-чернозёмных почвах влажность верхних горизонтов была ниже, чем в фоновой почве. На начало наблюдений слой 0–20 см находился в состоянии суше ВЗ. В периоды зимней оттепели и весеннего снеготаяния фиксировалось кратковременное увеличение влажности до 35–40%, но затем профиль быстро иссушался. Иссушение верхнего пахотного

слоя происходило раньше, чем в фоновой почве: уже с конца марта значения влажности на глубине 20 см устойчиво снижались ниже ВЗ, то есть на 4-6 недель раньше, чем на залежи. Продолжительность периода оптимальной влажности в пахотных почвах оказалась значительно короче: 26 суток в почве разреза 2 и 72 суток в почве разреза 3, в то время как во фоновой почве она превышала месяц. На глубинах 40 и 60 см пахотные почвы удерживали влагу дольше: значения выше НВ отмечались до конца зимы или до конца марта, после чего следовал период иссушения.

По числу и амплитуде чередующихся фаз увлажнения и иссушения различия также выражены: в фоновой почве на глубине 20 см выделено два периода, на 40 см – три, тогда как в пахотных почвах – пять-семь на 20 см и три-пять на 40 см. Максимальные скачки влажности между сроками наблюдений в пахотных почвах превышали 15%, в фоновой – не более 10%. Таким образом, пахотные почвы характеризуются более контрастным и сухим режимом увлажнения, что объясняется меньшим запасом снега на их поверхности, быстрым промачиванием и более интенсивным испарением весной.

Уровень грунтовых вод на участке также отличался между почвами. В пахотных почвах он находился на глубине 4–5 м большую часть года. Кратковременные подъёмы до 3 м регистрировались в конце декабря–январе и в марте–апреле, продолжительность их составляла 1–2 недели и была связана с оттепелями и снеготаянием. Во фоновой лугово-чернозёмной почве уровень грунтовых вод располагался ещё глубже – ниже 5 м на протяжении почти всего периода наблюдений. Лишь весной 2023 г., а также в конце августа и осенью отмечались отдельные подтяжки, вероятно вызванные снеготаянием и обильными дождями.

Сравнение с режимными наблюдениями Е.М. Самойловой (1968-1973 гг.) показывает общее опускание уровня грунтовых вод. В конце 1960-х – начале 1970-х гг. при годовых осадках 470-510 мм глубины залегания составляли от 0-2 м в увлажнённые годы до 1-4 м в засушливые. В 2022–2023 гг., несмотря на большее количество осадков (около 634 мм), грунтовые воды залегали глубже 4-5 м. Для всех исследованных лугово-чернозёмных почв фиксируется более глубокое положение грунтовых вод и отсутствие их капиллярного влияния на верхнюю часть профиля, что стало причиной существующего ныне более контрастного и засушливого водного режима. Таким образом, режим лугово-чернозёмных почв определяется отсутствием капиллярной подпитки из грунтовых вод и соответствует скорее чернозёмному типу, чем гидроморфному режиму, фиксировавшемуся полвека назад.

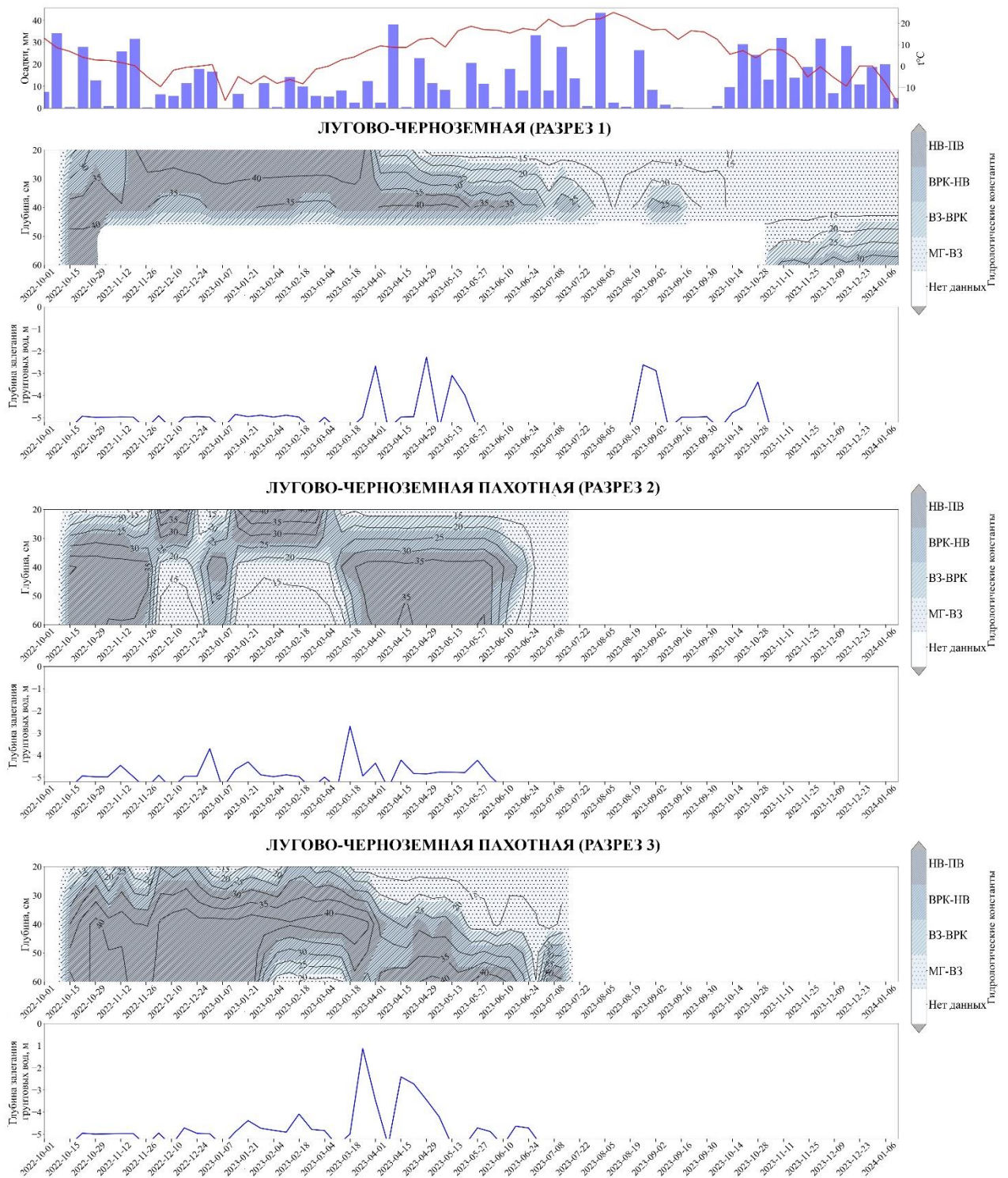


Рис. 20. Динамика влажности и мониторинга залегания грунтовых вод лугово-черноземных почв на протяжении периода мониторинга 01.10.2022–09.01.2024. В верхней части рисунка – осадки и температура в течение рассматриваемого периода, ниже – динамика показателей для отдельных почв (разрезы 1–3). Для каждой из почв верхний рисунок: хроноизоплетами показаны значения объемной влажности (%), цветовым фоном со штриховкой – значения почвенно-гидрологических констант, курсивом – значения

объемной влажности для почвенно-гидрологических констант; нижний рисунок – уровень грунтовых вод. Почвенно-гидрологические константы: ПВ – полная влагоемкость, НВ – наименьшая влагоемкость, ВРК – влажность разрыва капилляров, определенная как 0,7 НВ; ВЗ – влажность завядания; МГ – максимальная гигроскопичность (Смирнова, 2024)

Водный режим западных почв

Для западных почв автоматизированный мониторинг не проводился ввиду переувлажнения большей части профиля в течение периода снегонакопления, а также в силу сложности доступа к датчикам до схода воды весной. Данные о водном режиме западных почв приводятся по результатам натуральных наблюдений и данных дистанционного зондирования в зимний период.

Почвы западин – дерново-глеевые, лугово-болотные и солоды – отличаются более продолжительным и контрастным водным режимом по сравнению с лугово-чернозёмными почвами склонов и междуречий. В днищах западин формируются условия сезонного переувлажнения: весной и осенью они насыщаются влагой за счёт талых и дождевых вод, которые в понижениях задерживаются и инфильтрируются в большом объёме. По оценкам, западины аккумулируют до половины талого стока междуречных пространств, обеспечивая инфильтрацию влаги до 150 мм и формируя застой воды в почвенном профиле сроком до четырёх месяцев. Продолжительность застойных явлений различается: в лугово-чернозёмных почвах она в среднем составляет около 35 суток в половине лет, в чернозёмно-луговых – до 60 суток в трёх четвертях лет, во влажно-луговых – свыше 130 суток почти ежегодно. Наблюдаемые условия способствуют развитию оглеения, восстановлению соединений железа и марганца и формированию характерной пятнистости в срединных горизонтах.

Солоды демонстрируют более контрастный режим: верхние горизонты часто иссушены в летний период, в то время как срединные сохраняют признаки переувлажнения и оглеения. Для них характерны условия периодического застоя влаги весной и осенью, при последующем летнем иссушении, что ведёт к развитию процессов осолодения и лессиважа.

Западные почвы в течение лета сохраняют следы сезонного переувлажнения, однако летнее иссушение верхних горизонтов делает их водный режим резко контрастным – водозастойный зимой-весной, непромывной – летом.

Химические, физические и физико-химические свойства почв

Описание физических и физико-химических свойств почв приводится по всем исследованным полнопрофильным разрезам в пределах ключевого участка и его окрестностях.

В дерново-глеевых почвах углерод карбонатов в верхних горизонтах практически отсутствует, максимальные значения фиксируются на глубине более 100-120 см и составляют 5-8 г/100 г почвы. Содержание легкорастворимых солей невысокое – 0,5-1,0 мг-экв/100 г (рис. 21), ограниченное преимущественно верхними горизонтами. В составе поглощающего комплекса преобладает кальций (15-25 мг-экв/100 г), доля магния находится в пределах 5-10 мг-экв/100 г, натрия – до 5 мг-экв/100 г (рис. 22).

В лугово-чернозёмных почвах содержание карбонатного углерода в верхах не превышает 1-2 г/100 г и возрастает в нижней части профиля до 4-5 г/100 г. Максимум легкорастворимых солей (4-6 мг-экв/100 г) приурочен к глубинам 80-120 см. В составе поглощающего комплекса преобладает кальций (20-30 мг-экв/100 г), содержание магния и натрия варьирует от 5 до 10 мг-экв/100 г.

В осолоделых почвах содержание карбонатного углерода крайне низкое в верхних горизонтах (≤ 1 г/100 г) и увеличивается только ниже 100 см, где достигает 3-4 г/100 г. Концентрации легкорастворимых солей колеблются от 2 до 6 мг-экв/100 г, причём их распределение носит элювиальный характер: верхние горизонты обеднены, а максимум фиксируется в средней части профиля. В поглощающем комплексе содержание кальция составляет 10-20 мг-экв/100 г, магния – 8-12 мг-экв/100 г, натрия – 10-15 мг-экв/100 г.

В солонцах содержание карбонатного углерода высокое начиная с глубины 50-60 см и достигает 8-12 г/100 г в нижней части профиля. Концентрации легкорастворимых солей составляют 6–8 мг-экв/100 г и более, с максимумами как в среднем (40-60 см), так и в нижнем профиле (100-120 см). В составе поглощающего комплекса натрия достигает 20-25 мг-экв/100 г, кальций колеблется от 10 до 20 мг-экв/100 г, магний – от 5 до 10 мг-экв/100 г. Сопоставление с результатами, полученными ранее Е.М. Самойловой (1969-1973 гг.), показывает, что за последние 50 лет во всех почвах снизилась глубина вскипания при реакции с 10% HCl на 10-15 см. Содержание неорганического углерода уменьшилось, а максимальные значения карбонатов сместились вниз по профилю; в отдельных случаях карбонатные новообразования полностью исчезли. В большинстве почв максимум легкорастворимых солей сместился на 20-40 см глубже, а в осолоделых почвах профиль их распределения приобрёл элювиальный характер. В солонцах наблюдается смещение профильного максимума Na^+ на 5-7 см вниз.

Во всех почвах зафиксировано снижение содержания Ca^{2+} и Mg^{2+} в составе поглощающего комплекса и возрастание роли Na^+ . В осолоделых почвах натрий стал играть ключевую роль, тогда как кальций и магний сохраняются на минимальном уровне. В чернозёмно-луговых пахотных почвах произошло перераспределение растворимых катионов: вместо Ca^{2+} преобладающим стал Na^+ (рис. 21).

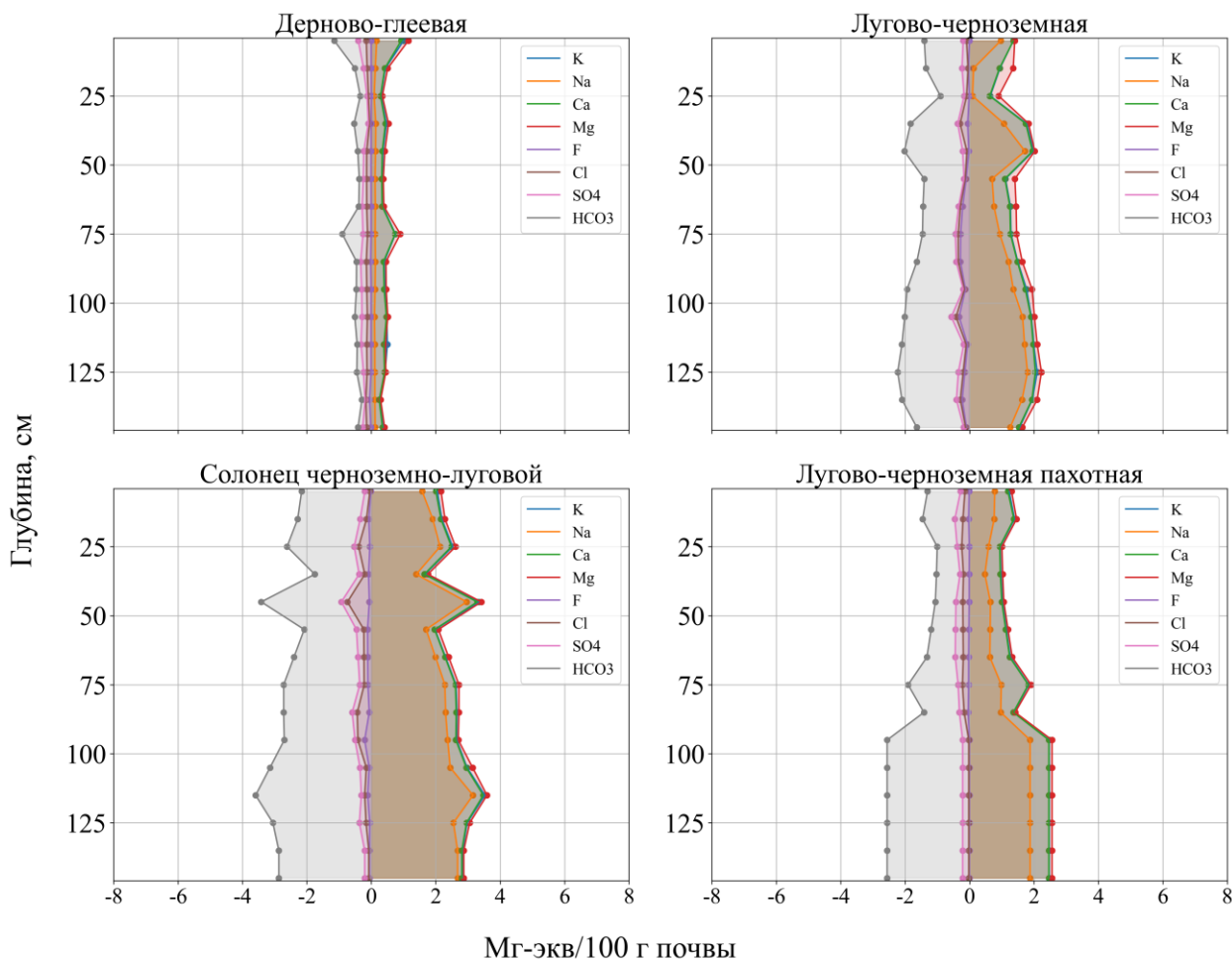


Рисунок 21. Типичное радиальное распределение легкорастворимых солей (солевые профили)

Плотность исследованных почв западных комплексов закономерно меняется в зависимости от их генетического типа и положения в рельефе (таблица 3). Дерново-глеевые почвы отличаются наиболее низкими значениями в верхней части профиля благодаря существенной рыхлости и высокому содержанию слабо разложившегося органического вещества. В лугово-чернозёмных залежных почвах плотность более равномерна по профилю, гумусовые горизонты характеризуются большей рыхлостью ввиду высокого содержания органического вещества и высокой интенсивности биогенной (в т.ч. зоогенной) переработки, на что указывает Л.М. Дмитраков в работе 1977 г. Солонцы, напротив, характеризуются высокими значениями плотности уже

с глубины 10-15 см, где начинается солонцовый горизонт. Лугово-чернозёмные пахотные почвы занимают промежуточное положение: их плотность выше, чем у залежных аналогов, особенно в нижней части пахотного горизонта, на глубине плужной подошвы, что является следствием длительного сельскохозяйственного использования и уплотнения верхних горизонтов.

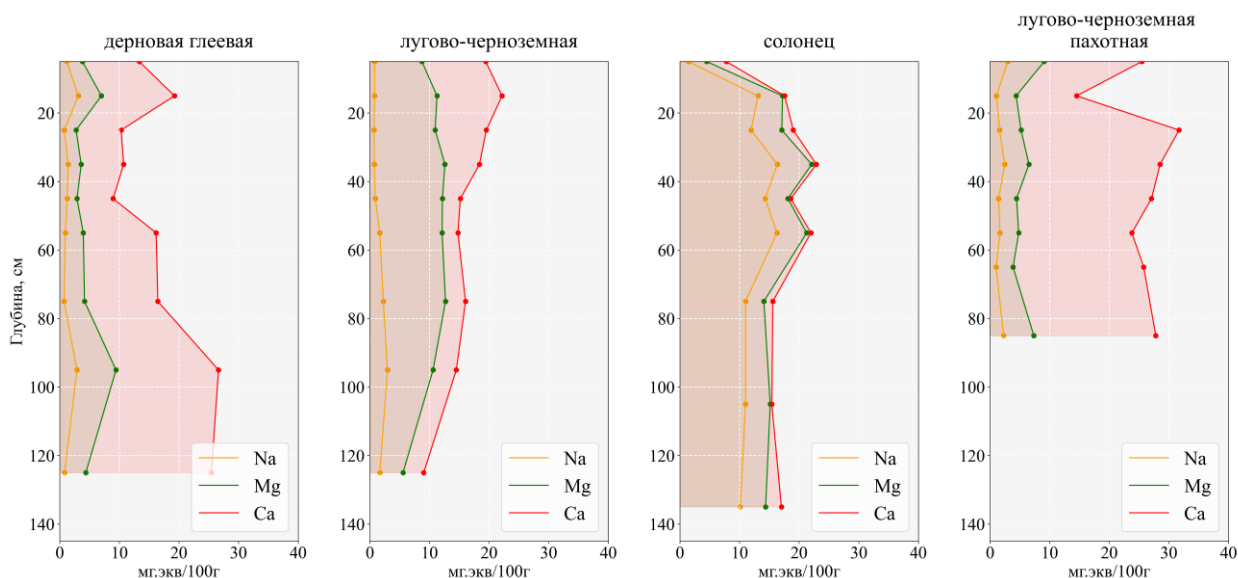


Рисунок 22. Средние распределения катионов в описанных почвах западных комплексов по данным выполненных анализов (значения приведены с накоплением) т.е. значение для Ca = Na+Mg+Ca

Таблица 3. Результаты измерений плотности (объемного веса, г/см³) в описанных почвах.

Тип почв	Глубина, см	Плотность, г/см ³
Дерново-глеевые	5–10	0,45–0,50
Дерново-глеевые	10–15	0,95–1,00
Дерново-глеевые	20–25	1,30–1,40
Дерново-глеевые	30–40	1,65–1,75
Дерново-глеевые	>50	1,45–1,55
Лугово-чернозёмные залежные	0–10	0,95–1,05
Лугово-чернозёмные залежные	20–30	0,90–0,95
Лугово-чернозёмные залежные	40–50	1,45–1,50
Лугово-чернозёмные залежные	70–150	1,38–1,55
Солонцы	0–10	1,15–1,20
Солонцы	10–20	1,48–1,55
Солонцы	>20	1,48–1,56
Лугово-чернозёмные пахотные	0–10	1,02–1,15

Лугово-чернозёмные пахотные	10-20	1,05–1,3
Лугово-чернозёмные пахотные	20–30	1,18–1,35
Лугово-чернозёмные пахотные	40–50	1,46–1,56
Лугово-чернозёмные пахотные	50–150	1,46–1,6

Строение профилей почв западного комплекса фактически не изменилось, однако за полувековой период изменились глубина и форма локализации карбонатных новообразований, распределение легкорастворимых солей и состав поглощающего комплекса. Наиболее отчётливо эти изменения проявились в осолоделых почвах и солонцах, что свидетельствует об их высокой чувствительности к изменению водного режима в условиях относительной гумидизации климата Окско-Донской низменности.

Во всех почвах верхние гумусовые горизонты отличаются пониженной плотностью ($0,5\text{--}1,2\text{ г/см}^3$), что связано с высоким содержанием органического вещества и рыхлой структурой. В залежных лугово-чернозёмных почвах плотность верхнего слоя близка к $1,0\text{ г/см}^3$, местами снижается до $0,9\text{ г/см}^3$ в глубине гумусового профиля. В пахотных горизонтах плотность выше – около $1,2\text{ г/см}^3$, что отражает уплотнение в результате обработки.

С глубиной наблюдается постепенное уплотнение профиля: в срединной части плотность достигает $1,3\text{--}1,5\text{ г/см}^3$, а в нижних горизонтах варьирует от $1,5$ до $1,8\text{ г/см}^3$. В солонцах этот рост наиболее резкий: уже на глубине $10\text{--}20$ см плотность приближается к $1,5\text{ г/см}^3$, что отражает характерное для них плотное сложение.

Во всех почвах фиксируются новообразования железа и марганца: кутаны, конкреции и пятнистость. Наиболее выражены они в гидроморфных западных почвах, где конкреции встречаются уже с глубины $20\text{--}40$ см (перегнойно-глеевые) или $70\text{--}90$ см (лугово-чернозёмные). В осолоделых почвах конкреции и ржавые пятна наблюдаются в срединных горизонтах, наряду с сизыми зонами. По данным экстракций, содержание оксалатно- и дитионитрастворимых форм железа низкое, коэффициенты Швертмана имеют очень низкие значения, что отражает слабую интенсивность процессов новообразования гидроксидов Fe и Mn. При этом соотношение форм железа и морфологическая окраска горизонтов подтверждают увеличение степени переувлажнения от пахотных лугово-чернозёмных почв к залежной лугово-чернозёмной и далее к дерново-глеевым и лугово-болотным.

Исследованные почвы характеризуются близким гранулометрическим составом – все относятся к средним или тяжелым пылеватым суглинкам, что

связано с однородным литологическим составом (рис. 23). Гранулометрический состав почв ключевого участка маловариабелен (Филь, 2025).

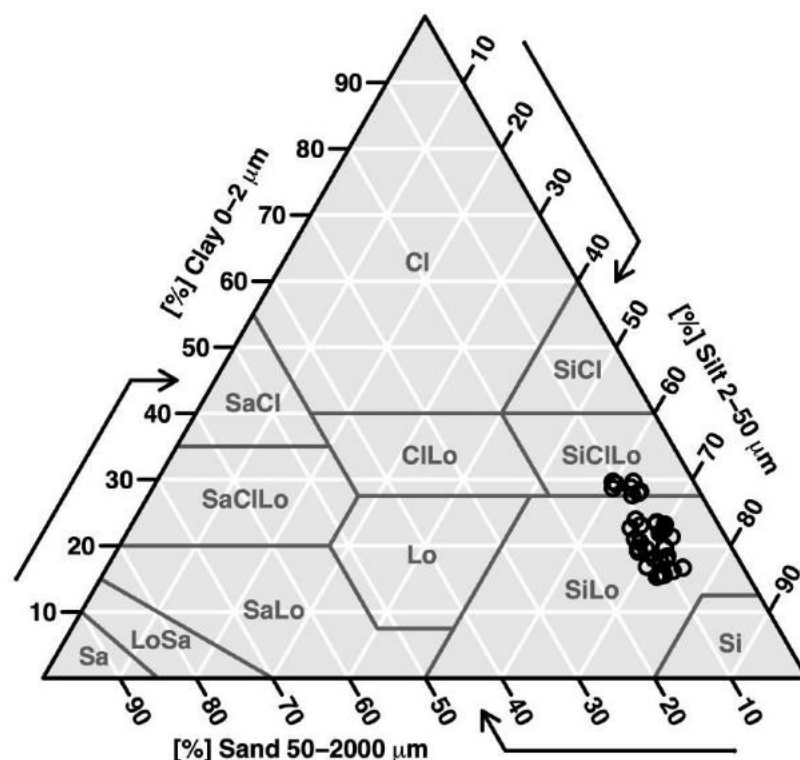


Рисунок 23. Гранулометрический состав почв в разрезах на ключевом участке по данным выполненных анализов (текстуры классы указаны в соответствии с USDA)

4.2. Содержание и запасы органического вещества почв западных комплексов

Содержание почвенного органического вещества (ПОВ) в исследованных почвах закономерно варьирует в зависимости от положения в микрорельефе и типа почвенного покрова (рис. 24). Максимальные значения характерны для подчинённых позиций, прежде всего для почв днищ западин. Здесь накапливается слабо разложившийся углерод, консервируемый в условиях низкой интенсивности минерализации органических остатков. Периодическое переувлажнение и застой влаги тормозят деятельность аэробной микрофлоры и создают условия для сохранения значительных запасов свежего органического материала.

Дерново-глеевые почвы характеризуются высоким содержанием органического углерода в верхних горизонтах, где формируется грубогумусовый слой мощностью более 30 см. Концентрация Сорг в этих

горизонтах достигает 8–10%, а ниже по профилю снижается в несколько раз. Несмотря на падение содержания углерода с глубиной, суммарные запасы ПОВ в профиле остаются значительными благодаря мощности гумусового горизонта.

В лугово-чернозёмных залежных почвах содержание органического углерода также высоко, особенно в верхних 20–30 см, где оно варьирует в пределах 7–8%. По мере углубления концентрация постепенно снижается до 1% и менее. Для залежных почв характерна лучшая сохранность гумусового профиля и меньшее влияние процессов минерализации по сравнению с пахотными аналогами. Благодаря этому общие запасы углерода в них выше.

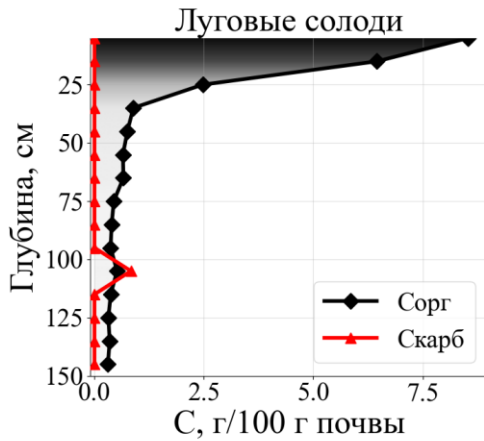
Солонцы и агросолонцы чернозёмно-лугового типа отличаются более низким содержанием органического вещества, особенно в верхних горизонтах, где концентрация Сорг не превышает 5%. Засоление и высокая плотность ограничивают поступление свежей органики ниже солонцового горизонта и усиливают процессы её минерализации. Тем не менее, за счёт значительной мощности профиля суммарные запасы углерода в солонцах могут быть сопоставимы с лугово-чернозёмными почвами, хотя их распределение по профилю более равномерное.

Лугово-чернозёмные пахотные почвы занимают промежуточное положение по содержанию Сорг. В верхнем агрогумусовом горизонте содержание углерода достигает 5–7%. Глубже по профилю, начиная с 20–30 см, содержание Сорг не превышает 1–2%.

Данные разрезов катены подтверждают общую закономерность: содержание углерода в почвах днищ западин выше, чем на склонах. Так, в разрезе с дерново-глеевой почвой (грубогумусово-глеевая почва днища) концентрация Сорг в верхнем горизонте превышает 5%, тогда как в солонце (солонец чернозёмно-луговой) она снижается до 3–4%. В солонцах отчётливо фиксируется повышение доли неорганического углерода (карбонатов) уже с глубины 20–30 см.

За полувековой период наибольшие изменения в содержании и распределении органического углерода зафиксированы в почвах западин (Самойлова, 1981). Здесь отмечен резкий рост его запасов, что связывается с понижением уровня грунтовых вод и возможностью более глубокого распространения корней растений. В результате гумусовый профиль стал более мощным и насыщенным органическим веществом, что подтверждается увеличением концентраций Сорг в срединных и нижних горизонтах.

По данным 1970-х гг.



По данным 2020-х гг.

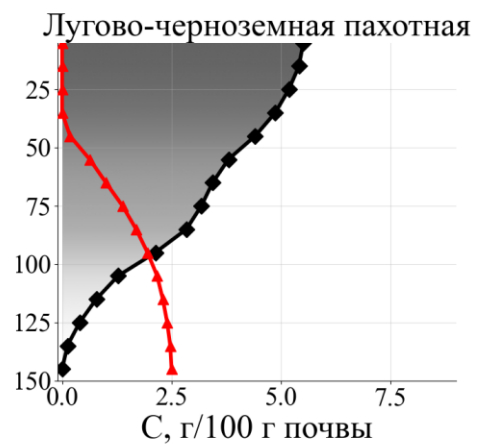
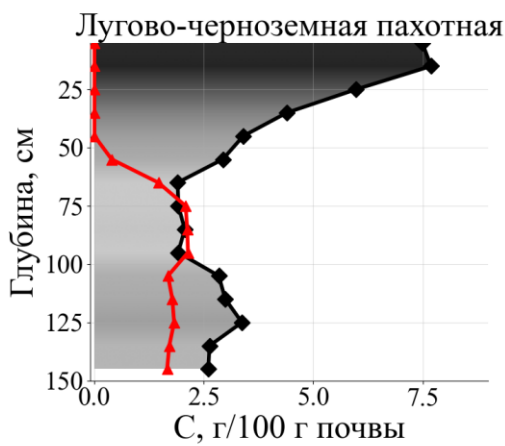
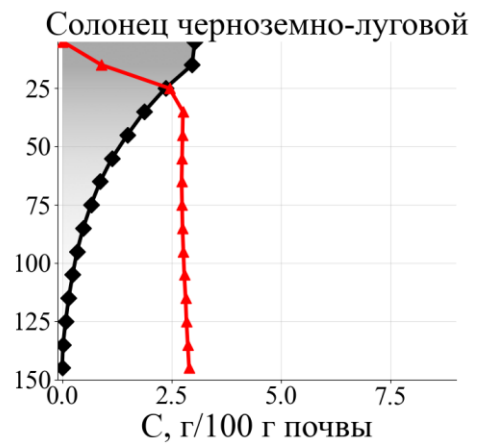
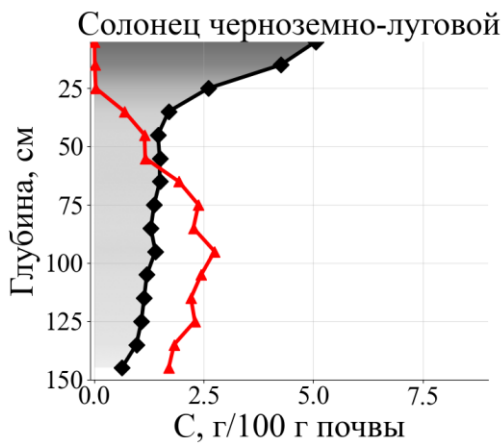
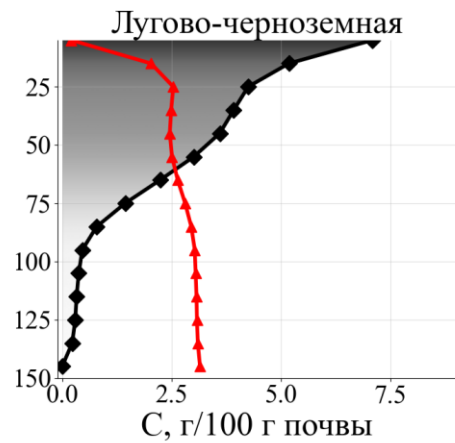
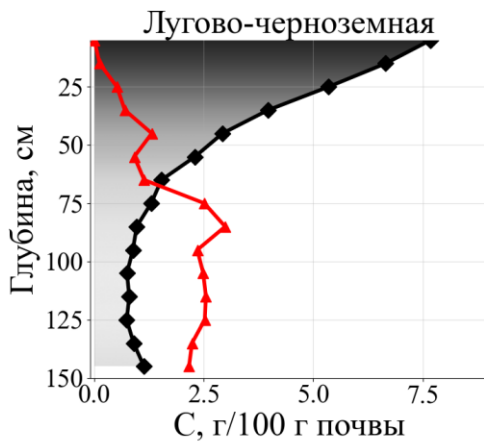
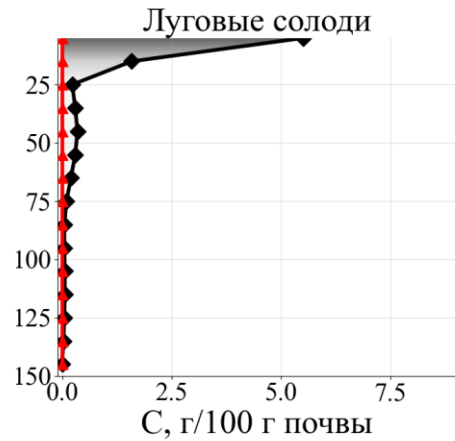


Рис 24. Сравнение содержания органического и неорганического углерода за 50-летний период в опорных разрезах Е.М. Самойловой. Черным – органический углерод, красным – неорганический. Интенсивность окраски соответствует содержанию органического углерода в каждом из 10-см слоев профиля

В остальных почвах значимых изменений валового содержания органического углерода не выявлено: его запасы в пахотных и залежных лугово-чернозёмных почвах, а также в солонцах в среднем соответствуют значениям, зафиксированным в конце 1960-х годов. Вместе с тем отмечено смещение глубины радиального выноса органического вещества в солонцах и пахотных лугово-чернозёмных почвах, что отражает изменения условий водного режима и миграции гумусовых соединений.

Содержание органического вещества в поверхностном горизонте максимально в почвах западин, минимально в почвах пашен (Таблица 4, рис. 25).

Таблица 4. Соотношение статистик содержания органического вещества в точках поверхностного опробования на глубине 0-15 см.

Биотоп	Число образцов	мин, г/кг	макс, г/кг	среднее (μ), г/кг	медиана, г/кг	$\frac{\sigma}{\mu}$, %
Образцов всего	474	27,25	83,67	55,06	54,92	17,98
Пашня/Залежь	311	27,25	80,20	52,61	52,73	16,21
Луга	74	28,30	83,67	57,02	58,59	19,98
Колки	89	38,20	83,01	63,24	64,17	14,16

Запасы почвенного органического углерода ($C_{орг}$) в пределах катены существенно различаются в зависимости от генетического типа почв и их положения в рельефе. Для расчётов использован интервал 0–60 см, что позволяет сопоставить аккумуляцию органики в наиболее продуктивной части профиля.

Максимальные запасы углерода фиксируются в лугово-чернозёмных почвах. В залежном варианте они достигают 310-330 т/га, тогда как в пахотных аналогах увеличиваются до 350-370 т/га. Несмотря на более низкое содержание $C_{орг}$ в верхних горизонтах пахотных почв, суммарные запасы оказываются выше за счёт возросшей плотности гумусового профиля. Таким образом, агрогенное уплотнение компенсирует снижение концентрации органического вещества и приводит к формированию более высоких абсолютных запасов.

Распределение содержания органического вещества в зависимости от участия грунтовых вод в формировании почвенного профиля указывает на

снижение содержания Сорг в поверхностном горизонте в наиболее близких к автоморфным пахотных почвах (УГВ>6 м) на 0,5-1,3% по сравнению с полугидроморфными (УГВ – 3-6 м) аналогами при неизменных значениях плотности поверхностного горизонта.

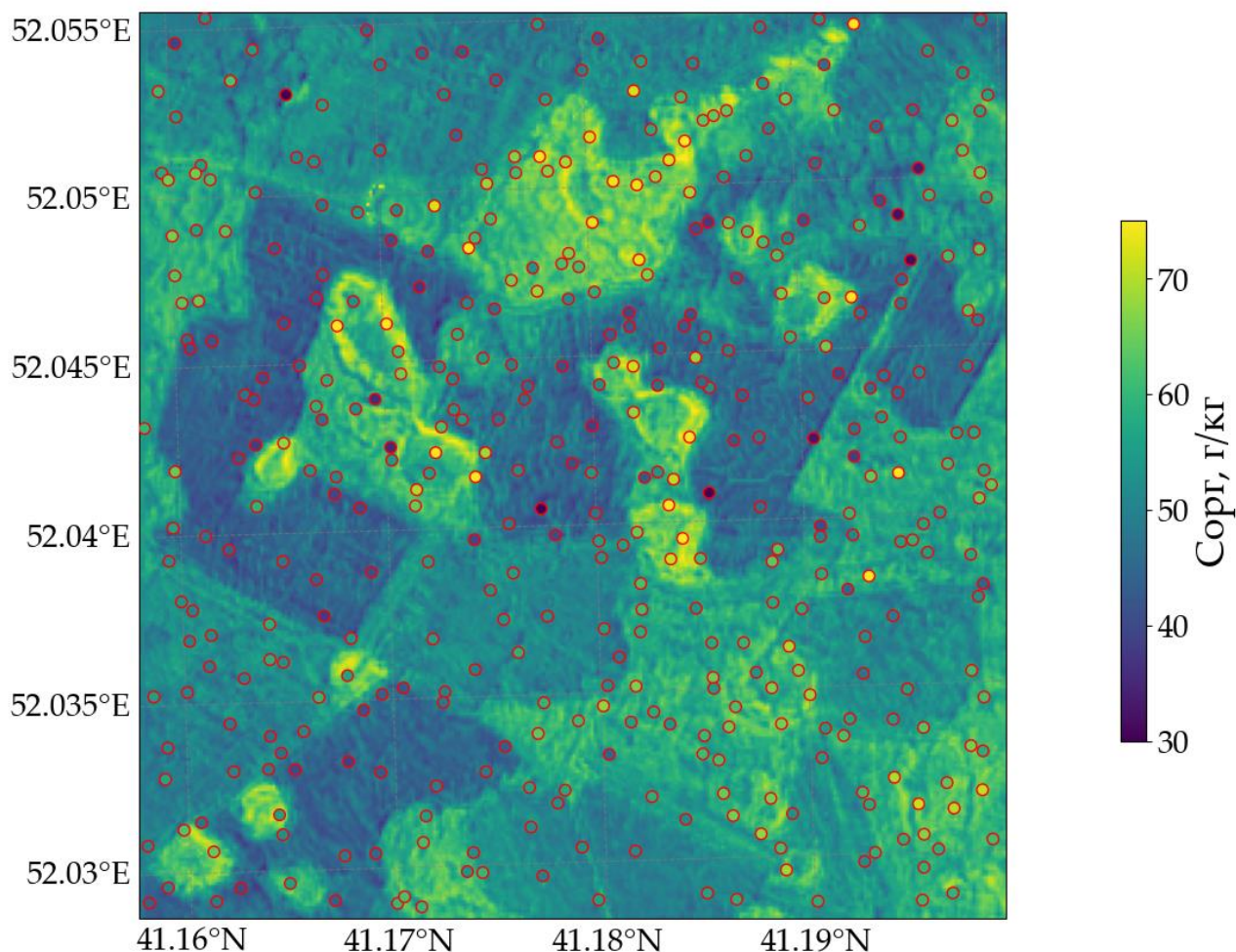


Рисунок 25. Содержание органического вещества почв в поверхностном слое (0-15 см) в точках отбора проб (точки показаны красным), а также результат пространственного прогноза - интерполяции содержания органического вещества в г/кг с помощью нейросетевой модели CNN-LSTM-MLP (подробнее см. главу 6).

4.3 Фракционный состав органического вещества почв западных комплексов по данным катенарных исследований

Изучение фракционного состава органического вещества позволяет понять механизмы его стабилизации и долгосрочного накопления в различных типах почв западного комплекса. По данным фракционирования, выполненного как по методу Пономаревой и Плотниковой, так и по методу Соколова и Савича, за прошедшие пять десятилетий в почвах западин и в лугово-чернозёмных залежах произошли значительные изменения (рис. 26).

В обеих группах почв возросла доля всех трёх фракций фульвокислот, а также первой фракции гуминовых кислот (Г1), наиболее подвижной и менее устойчивой (рис. 26). Одновременно значительно снизилась доля второй фракции гуминовых кислот (Г2), преимущественно связанной с кальцием. Такое соотношение отражает перераспределение источников углерода и условия его трансформации: увеличение доли Г1 связано с влиянием верховодки и сезонным переувлажнением, создающим анаэробные условия и препятствующим минерализации. Снижение содержания Г2 указывает на вынос кальция и карбонатов, а также на ослабление роли процессов комплексообразования и стабилизации органического вещества, определяемой кальцием (Rowley et al., 2018).

В то же время увеличение содержания фульвокислот и Г2 в отдельных горизонтах может быть связано со снижением степени гидроморфизма, обусловленным падением уровня грунтовых вод и усилением процессов периодического подсушивания.

Распределение соединений различной окисляемости также подтверждает различия между западинами, залежами и пашней. В почвах западин избирательно накапливаются легкоокисляемые соединения, что указывает на условия консервации менее разложённого органического вещества. В верхней части профиля формируются горизонты, богатые углеродом и отличающиеся меньшей плотностью. В лугово-чернозёмных залежных почвах наблюдается промежуточный вариант: для них характерно накопление среднеокисляемых соединений, а в верхних горизонтах – значительные количества легкоокисляемых фракций, но в меньшей пропорции, чем в западинах. Вероятной причиной является отсутствие древесных остатков и преобладание травянистого корневого опада.

В пахотных почвах преобладает накопление среднеокисляемых соединений по всему профилю. Это отражает воздействие агрогенной трансформации: регулярное рыхление, аэрация и минерализация снижают долю лабильного углерода, одновременно увеличивая относительную долю более устойчивых фракций. В результате гумусовый профиль пахотных почв отличается меньшей контрастностью верхних и нижних горизонтов.

Анализ соотношения фракций ПОВ показывает, что оптимальные условия для депонирования углерода складываются в залежных почвах, где высокая интенсивность и высокая же доля корневого опада в сочетании с периодическим поверхностным переувлажнением создают благоприятный режим для стабилизации углерода в верхних горизонтах. В этих условиях одновременно происходит накопление легкоокисляемых соединений и формирование умеренных количеств средне- и трудноокисляемых фракций,

что обеспечивает как быстрый оборот органики, так и долговременное связывание её части в устойчивых формах.

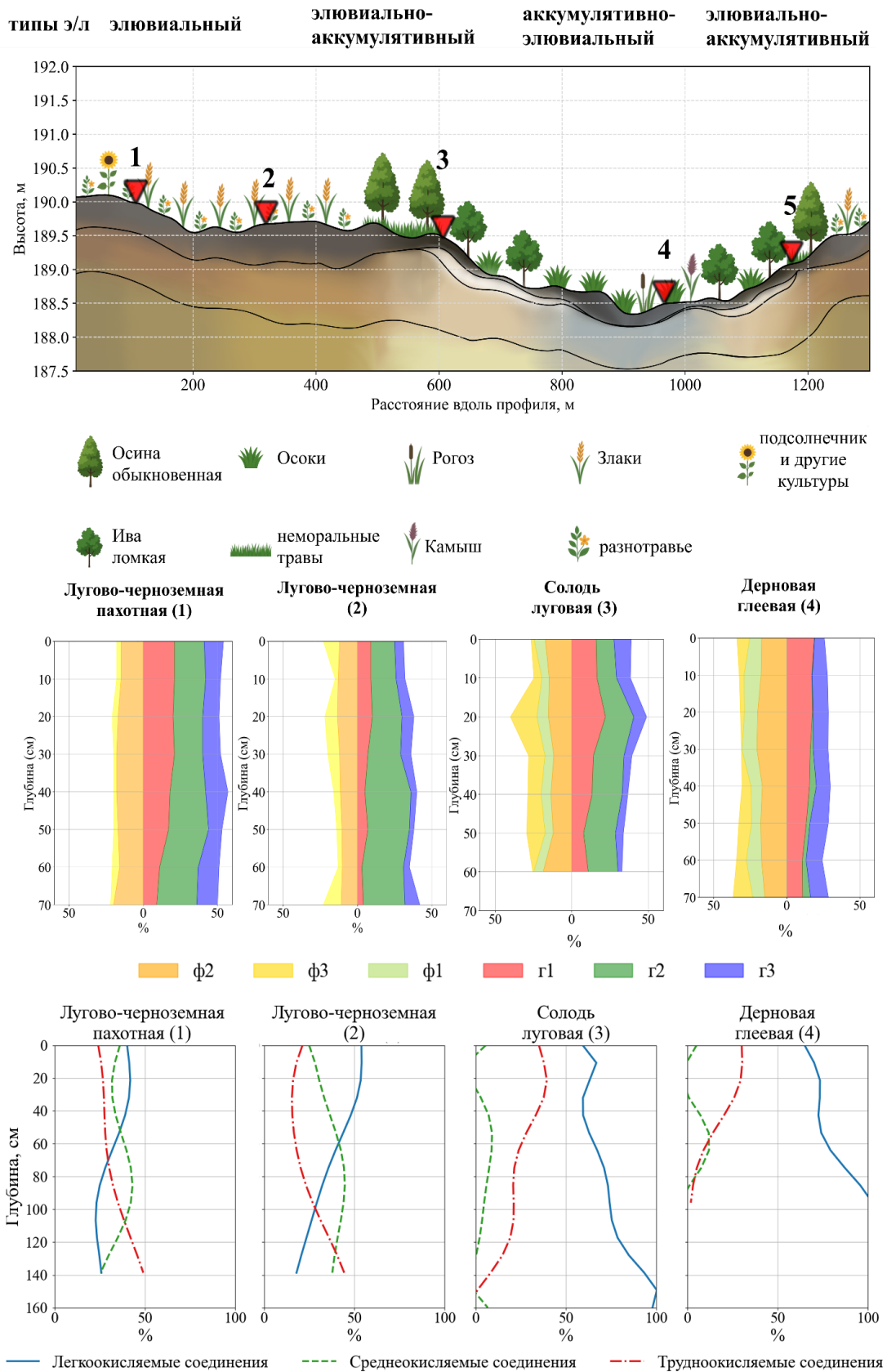


Рисунок 26. Сверху – соотношение фракций гумусовых веществ (Пономарева, Плотникова, 1980); снизу – фракций химической окисляемости органических соединений почвы (Соколов, 2009)

4.4. Факторы формирования почвенного органического вещества западных комплексов

Результаты анализа морфологических, химических и физических свойств, особенностей почвенного органического вещества, позволяют предположить, что ведущую роль в формировании органического профиля исследуемых почв играет водный режим, детерминируемый особенностями микрорельефа. Ещё Е.М. Самойлова (1981) указывала, что распределение влаги в пределах западных урочищ определяет глубину гумусового профиля и характер его дифференциации. Длительное переувлажнение почв днищ западных сопровождается признаками оглеения и консервацией менее разложившихся органических соединений, тогда как на более дренированных элементах катены процессы минерализации протекают значительно активнее, что ведёт к уменьшению запасов углерода (Ахтырцев, 1977; Зайдельман, 1992).

Важное значение имеет структура и продуктивность растительных сообществ. Как отмечал А.Б. Ахтырцев (1977), высокая доля корневого опада многолетних трав в условиях распространения луговых почв лесостепной зоны обеспечивает ежегодный приток органического материала в верхнюю часть профиля, что способствует накоплению гумуса. В пахотных почвах, напротив, поступление органики более ограничено и однородно по составу, что отражается на концентрации углерода и его вертикальном распределении.

Фоном для этих процессов выступают химические свойства почвенного профиля. Реакция среды и степень карбонатности оказывают влияние на стабилизацию органического вещества за счёт формирования кальций-гуматных комплексов (Shabtai et al., 2023). В почвах с высоким содержанием кальция усиливается доля гуматных форм, что способствует долговременному связыванию углерода. В наименее гидроморфных почвах западных комплексов позициях доминируют процессы минерализации и миграции карбонатов, тогда как в полугидроморфных условиях днищ западных усиливаются механизмы консервации органического вещества.

Полученные данные полностью подтверждают тезис о ведущей роли водного режима, детерминированного микрорельефом, в формировании органического профиля почв западных комплексов. Почвенный покров ключевого участка характеризуется выраженной мозаичностью, где свойства почв закономерно меняются в зависимости от положения в микрорельефе, как

показано в разделе 4.1. Как и предполагалось, в днищах западин формируются условия сезонного переувлажнения сроком до четырёх месяцев, сопровождающиеся оглеением (рис. 19), тогда как на пахотных участках междуречий устанавливается более сухой и контрастный водный режим (рис. 20). Это перераспределение влаги непосредственно определяет дифференциацию гумусовых профилей: максимальные запасы органического вещества характерны для подчинённых позиций, где периодическое переувлажнение тормозит деятельность аэробной микрофлоры и консервирует органический материал.

Проведенный фракционный анализ гумуса (раздел 4.3) выявил значительное снижение доли второй фракции гуминовых кислот (ГК-2), связанной с кальцием, что убедительно демонстрирует ослабление роли кальция в стабилизации органического вещества на фоне его выноса. Одновременно возросла доля подвижных фульвокислот и первой фракции гуминовых кислот (ГК-1), что отражает смену механизмов стабилизации в сторону процессов, связанных с поверхностным переувлажнением и анаэробной трансформацией.

Множественный регрессионный анализ факторов выполнен по данным 474 точек поверхностного опробования (0–15 см). Результаты регрессионного анализа показали (рис. 27), что ключевым фактором, определяющим пространственную вариацию содержания органического углерода в поверхностных горизонтах почв западных комплексов, являются показатели влажности (индексы TWI и NDWI). Их вклад в объяснение вариации составил около 40% от общей дисперсии. Сопоставимую роль играет также растительный покров, отражаемый индексами EVI2, NDVI и сезонной динамикой вегетации. Совокупный вклад этих двух групп факторов существенно превышает объясняющую способность микротопографических показателей (TPI, TRI, уклон) и химических свойств (pH), хотя их влияние при однофакторных оценках оставалось статистически значимым ($p < 0,05$), объяснённая ими доля дисперсии была невелика.

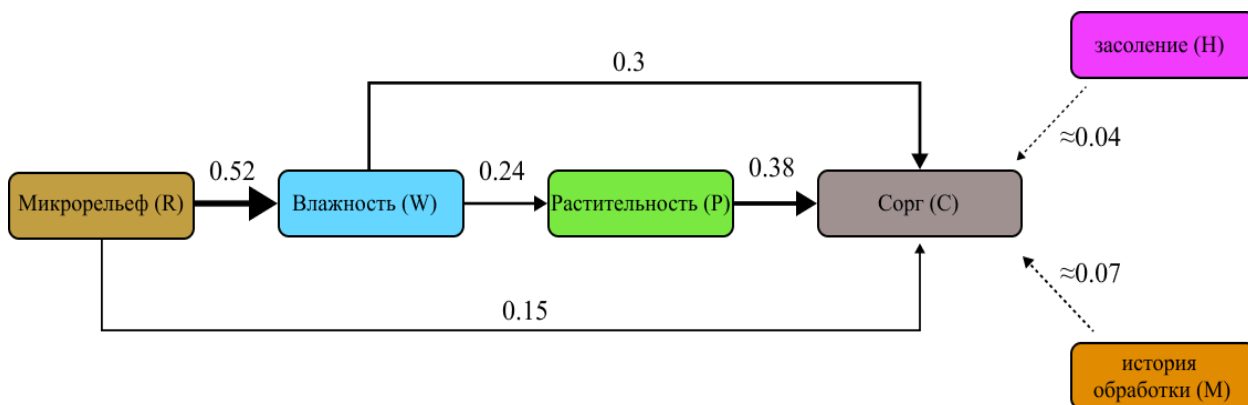


Рисунок 27. Схема основных взаимосвязей факторов, определяющих формирование содержания почвенного органического углерода в западных комплексах лесостепи по результатам множественного регрессионного анализа.

Сравнение содержания и запасов органического вещества, а также результаты регрессионного анализа факторов его формирования показывают, что как наименее, так и наиболее увлажненные почвы западных комплексов не обеспечивают максимальной аккумуляции углерода. В наименее гидроморфных почвах верхних частей склонов и водоразделов ограничивающим фактором является недостаточная влажность и высокая скорость минерализации органических остатков. В гидроморфных почвах днищ с постоянным застойным увлажнением и признаками болотного процесса продуктивность растительного покрова существенно ниже, чем на полугидроморфных позициях, поэтому объём ежегодно поступающего опада сокращается, несмотря на то, что имеющееся органическое вещество эффективно консервируется в анаэробных условиях (Ахтырцев, 1999).

Максимальные запасы углерода формируются в промежуточных, полугидроморфных условиях пологих участков, вплотную прилегающих к западинам, где сочетаются регулярный приток влаги и высокая продуктивность лугового растительного покрова, а также сохраняется участие древесного опада березово-осиновых колков. Именно здесь наблюдается мощный гумусовый горизонт, высокая доля органического углерода в верхних слоях и благоприятные условия для его консервации. Таким образом, можно говорить о существовании оптимума гидроморфизма в ряду полугидроморфных-гидроморфных почв, при котором достигается наибольшая активность аккумуляции почвенного органического вещества.

Б.Б. Ахтырцев (1999), опираясь на массив данных по Среднерусской возвышенности и Окско-Донской низменности, также показал, что наибольшие запасы гумуса формируются в полугидроморфных лугово-чернозёмных почвах, тогда как автоморфные чернозёмы и гидроморфные чернозёмно-луговые и чернозёмно-влажнoluговые уступают им по мощности и запасам гумусового профиля. Описанные в настоящей работе почвы подтверждают эту закономерность: по содержанию и запасам углерода лугово-чернозёмные почвы полугидроморфных позиций (310–370 т/га в слое 0–60 см) превосходят как луговые солоды и солонцы (186–207 т/га), так и более гидроморфные почвы днищ западин (75–150 т/га). Внутри опорных разрезов максимальные запасы также приходятся на полугидроморфные позиции (нумерация приведена на рис. 19: лугово-черноземная почва – разрез 2 – 348,9 т/га), тогда как дерново-глеявая почва (4), солоды (3-5) и солонцы существенно

беднее; почвы слабогидроморфных позиций (разрез 1 – 310,6 т/га) также отличаются относительно меньшими запасами углерода.

Тем не менее, наши материалы позволяют уточнить этот вывод. Во-первых, максимум органического углерода определяется не только степенью гидроморфизма, но и продуктивностью растительного покрова. Регрессионный анализ показал сопоставимый вклад влажностных индексов (TWI, NDWI) и показателей растительности (NDVI, сезонная динамика фенологических показателей) в объяснение вариации $C_{орг}$. Следовательно, оптимум не может быть объяснён исключительно режимом влаги: он формируется там, где переувлажнение сочетается с высоким притоком корневого опада.

Во-вторых, различие между полугидроморфными и гидроморфными почвами проявляется не только в количестве, но и в устойчивости органического вещества. В полугидроморфных условиях сохраняется мощность гумусового профиля и возрастает доля гуминовых кислот, связанных с кальцием, что способствует долговременному закреплению углерода. В гидроморфных почвах при подъёме оглеения выше по профилю гумусовый горизонт сжимается, доля подвижных фракций возрастает, а доля гуминовых кислот второй фракции (ГК-II), связанных с кальцием, резко снижается вследствие выноса кальция из верхней части профиля, что лишает органическое вещество основного механизма химической стабилизации (Rowley et al., 2018; Shabtai et al., 2023).

Наконец, наши данные показывают, что агрогенные изменения (уплотнение пахотных горизонтов) могут увеличивать запасы углерода в полугидроморфных условиях, что частично маскирует влияние собственно гидрологического фактора.

Секвестрационный потенциал в пределах катены западин достигает максимума в среднегидроморфных лугово-чернозёмных почвах, где сочетаются высокий приток органических остатков от луговой растительности, замедленная минерализация вследствие регулярного поверхностного увлажнения и сохранение мощности гумусового профиля с преобладанием кальций-гуматных форм углерода; в слабогидроморфных почвах с глубоко залегающими грунтовыми водами запасы органики ниже из-за более интенсивной минерализации, тогда как в собственно гидроморфных чернозёмно-луговых и влажнолуговых наблюдается накопление ПОВ в верхних горизонтах, но уменьшение мощности профиля и рост доли подвижных фракций ограничивает связывание углерода.

Глава 5. Имитационное моделирование содержания и запасов почвенного органического вещества в ландшафтах западных комплексов

Оценка секвестрационного потенциала почв западных комплексов требует учёта не только их современного состояния, но и возможной динамики в условиях смены условий землепользования и трансформации растительного покрова.

5.1. Параметризация модели SoilGen

Для имитационного моделирования динамики почвенного органического вещества использована процессно-ориентированная модель почвообразования SoilGen версии 2.26 (Finke, 2024). Параметризация модели выполнена для трёх репрезентативных позиций катены ключевого участка: лугово-чернозёмной пахотной почвы (разрез 1), лугово-чернозёмной залежной почвы (разрез 2) и грубогумусово-глеевой почвы западины (разрез 4).

Почвенные входные данные. Для каждой позиции подготовлен набор входных файлов, описывающих свойства почвенного профиля по горизонтам (через каждые 10 см до глубины 150 см). Исходные данные о гранулометрическом составе (содержание песка, пыли и глины), плотности сложения, содержании органического углерода и карбонатов получены по результатам лабораторных анализов образцов, отобранных из опорных разрезов (раздел 4.1). Водоудерживающие характеристики (параметры уравнения ван Генухтена) рассчитаны на основе педотрансферных функций с использованием данных о гранулометрическом составе и плотности (таблица 5).

Таблица 5. Основные почвенные входные параметры модели SoilGen для трёх моделируемых позиций (слой 0–30 см)

Параметр	Пашня (разрез 1)	Залежь (разрез 2)	Западина (разрез 4)
Плотность, г/см ³	1,10–1,35	0,90–1,05	0,45–1,00
Содержание Сорг, %	5,2–6,8	6,5–8,0	8,0–10,2
Глина, %	22–28	24–30	20–26
Пыль, %	52–58	50–56	48–54
Песок, %	16–24	16–22	22–30
Углерод карбонатов, %	0–1,2	0–0,5	0

Начальное распределение углерода по пулам органического вещества (модифицированная схема RothC) задавалось на основе данных фракционирования по методу Савича-Соколова (раздел 4.3): доля

легкоокисляемых соединений использовалась для оценки лабильного пула (DPM), среднеокисляемых – для пула биомассы и гумуса (BIO+HUM), трудноокисляемых – для инертного пула (IOM). Пересчёт между фракциями окисляемости и пулами RothC проводился с использованием коэффициентов, предложенных Zimmermann et al. (2007).

Климатические входные данные. Климатический файл формировался на основе ежесуточных данных метеостанции г. Жердевка (30 км от ключевого участка) за период 1966–2022 гг. Входные переменные включали среднемесячные температуры воздуха, суммы осадков и потенциальную эвапотранспирацию, рассчитанную по методу Пенмана-Монтейта. Для голоценового эксперимента использовались палеоклиматические реконструкции.

Параметры растительного покрова и опада. Для каждой позиции задавались тип растительности, суммарный объём ежегодного опада (т/га/год) и доля подземного (корневого) опада в суммарном опаде. Значения опада варьировались от 1,4 до 8,0 т/га/год, доля корневого опада – от 0,6 до 0,94. Диапазоны определены на основе литературных данных по продуктивности растительных сообществ лесостепи (Самойлова, 1981; Титлянова, Вишнякова, 2022) и данных геоботанических описаний ключевого участка.

Граничные условия. Нижняя граница профиля задавалась на глубине 200 см. Для пахотной и залежной почв использовано условие Неймана (фиксированный поток воды через нижнюю границу), для почвы западины – положение уровня грунтовых вод по данным мониторинга.

5.2. Анализ чувствительности модели к параметрам опада

Перед проведением сценарных расчётов была выполнена оценка чувствительности модели к двум ключевым параметрам органического: суммарному объёму опада (`plants_inC`) и доле подземного опада (`endo_frac`). Анализ чувствительности проводился методом Соболя (Sobol, 1993) с использованием библиотеки SALib (Herman, Usher, 2017).

Набор входных комбинаций параметров был сгенерирован методом Латинского гиперкуба. Всего сформировано 60 комбинаций, в которых `plants_inC` варьировался в диапазоне 1,4–8,0 т/га/год, а `endo_frac` – в диапазоне 0,66–0,94. Для каждой комбинации выполнен полный прогон модели SoilGen за период 1972–2022 гг. с фиксированными климатическими и почвенными входными данными (залежная лугово-чернозёмная почва, разрез 2). В качестве выходной переменной использовалось изменение запасов органического углерода в слое 0–30 см за 50-летний период ($\Delta C_{\text{орг}}$, т/га).

Результаты анализа чувствительности показали, что суммарный объём опада ($plants_inC$) является доминирующим фактором, определяющим динамику запасов углерода: индекс чувствительности первого порядка ($S1$) для $plants_inC$ составил 0,72, тогда как для $endo_frac$ – 0,08. Суммарный индекс чувствительности (ST), учитывающий взаимодействия параметров, составил 0,85 для $plants_inC$ и 0,21 для $endo_frac$. Разность между ST и $S1$ для обоих параметров указывает на наличие значимого взаимодействия: эффект доли корневого опада проявляется преимущественно при высоких значениях суммарного опада (более 4 т/га/год), тогда как при низком поступлении органического вещества (менее 3 т/га/год) изменение $endo_frac$ практически не влияет на результат.

Таким образом, эффект состава растительного покрова (соотношение надземного и подземного опада) на секвестрацию углерода реализуется только при достаточно высокой общей продуктивности экосистемы, при низком объеме поступающего в почву опада различия между почвами под сообществами разного ботанического состава минимальны, что дополнительно подтверждается результатами 50-летнего моделирования (см. ниже).

5.3. Результаты 50-летнего сценарного моделирования

Имитационное моделирование позволило реконструировать изменения, произошедшие в почвах ключевого участка за последние пятьдесят лет (1972–2022 гг.), и сопоставить сценарии накопления органического углерода в залежных и западинных почвах (рис. 28).

На графике показана динамика изменения содержания органического углерода ($С_{орг}$, % в слое 0–30 см) за 50-летний период в залежи и западине при варьировании объёма и структуры опада. В обеих почвах содержание $С_{орг}$ возрастает с увеличением поступления органического вещества: от близких к нулю изменений при минимальном опаде (<2 т/га/год) до прибавки более чем на 4% при максимальном поступлении опада (>7 т/га/год).

Цветовая шкала отражает долю корневого опада. Показано, что сценарии с высокой долей корневого опада (85% и более) сопровождаются наибольшим ростом содержания $С_{орг}$, тогда как при меньшей доле корневого опада прирост углерода оказывается значимо ниже.

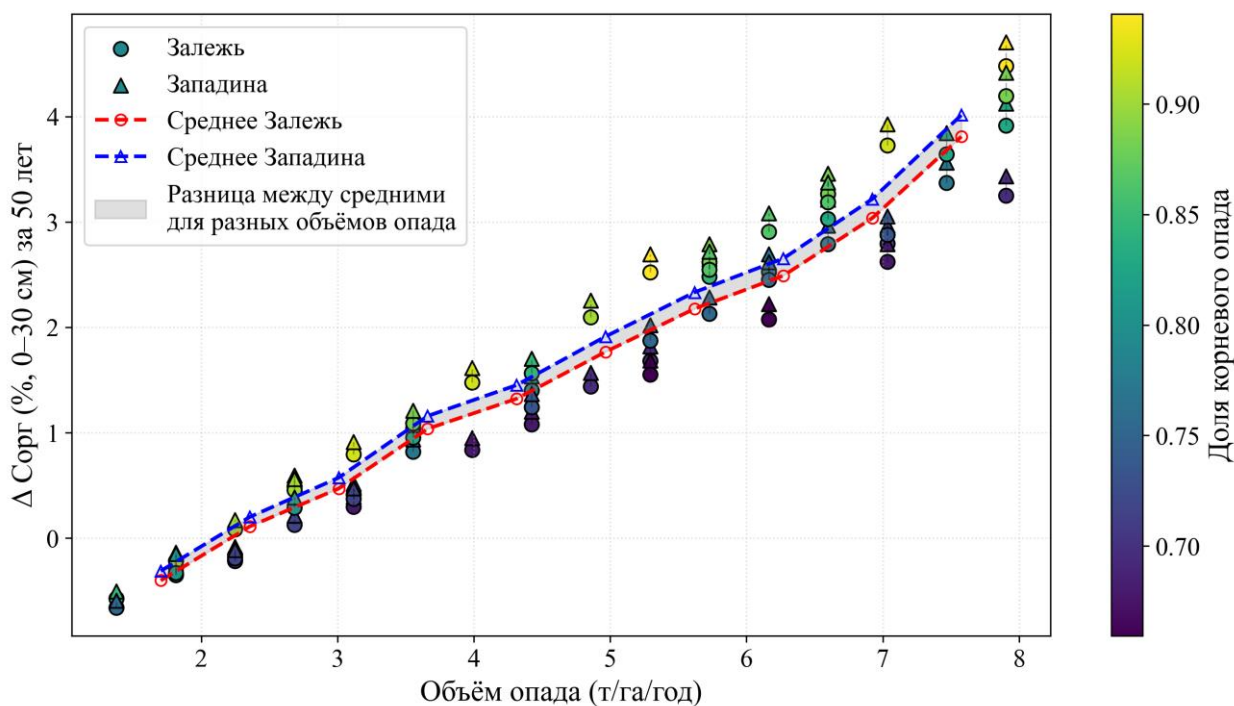


Рисунок 28. Динамика содержания органического углерода в толще 0-30 см за 50 лет по данным модельного эксперимента.

По результатам моделирования с учетом варьирующей плотности горизонтов (рис. 29), выполненном для трех почв, отмечено увеличение запасов углерода как в почве пашни (лугово-черноземная пахотная), так и в почве залежи (лугово-черноземная, выположенная поверхность промежуточно-гидроморфная по условиям), так и в почве западины (грубогумусово-глеевая). В условиях разнотравно-злакового покрова залежная лугово-черноземная почва за 50 лет накопила по медианному сценарию дополнительно 22,1 т/га органического углерода, тогда как в западине под берёзово-осиновым колком – 15,8 т/га, в почве пашни – 10,2 т/га. При этом относительное содержание углерода в слое 0–30 см возросло на 0,9% в почве залежи и на 1,4% в западине, что указывает на обогащение поверхностного слоя и более выраженную стабилизацию органики в условиях периодического переувлажнения.

При этом относительное накопление углерода в слое 0–60 см было ниже вследствие потерь углерода в нижней части диапазона за счёт его вымывания.

Различия в плотности верхних 30 см почвенного профиля (0,94 г/см³ в западине и 1,39 г/см³ в залежи) демонстрируют разную «ёмкость» минеральной матрицы: при меньшей плотности западинной почвы потенциал запасов углерода по объёму несколько выше, несмотря на меньший прирост в абсолютных значениях.

Статистический анализ ансамбля из 60 модельных прогонов для каждой из двух почв (залежь и западина) позволил оценить диапазон неопределённости прогноза. Для залежной лугово-чернозёмной почвы прирост запасов Сорг в слое 0–30 см за 50 лет составил: медиана – 22,1 т/га, межквартильный диапазон (Q1–Q3) – 5,5–36,7 т/га, полный диапазон – от потери 9,2 т/га (при $plants_inC = 1,4$ т/га/год и $endo_frac = 0,66$) до накопления 61,8 т/га (при $plants_inC = 8,0$ т/га/год и $endo_frac = 0,94$). Для грубогумусово-глеевой почвы западины: медиана – 15,8 т/га, межквартильный диапазон – 2,8–22,9 т/га, полный диапазон – от потери 6,5 до накопления 39,5 т/га. При объёме опада менее 2,2–2,5 т/га/год запасы углерода начинали снижаться, что соответствует сценарию интенсивного земледелия с полным отчуждением урожая.

Модельные сценарии с варьированием доли и объёма корневого опада (рис. 30) показали широкий диапазон накопления углерода за 50 лет: от отсутствия прироста (при доле корневого опада ~65% и общем поступлении <2 т/га/год) до 60 т/га (при доле корневого опада >90% и поступлении >7 т/га/год). Таким образом, секвестрационный потенциал почв западных комплексов напрямую зависит от продуктивности растительного покрова и структуры опада.

Временные ряды модельных результатов выявили наличие «плато» в динамике накопления, обусловленных погодными условиями отдельных лет. Это подтверждает, что реализация секвестрационного потенциала почв не является линейным процессом и во многом определяется межгодовой вариабельностью гидротермического режима.

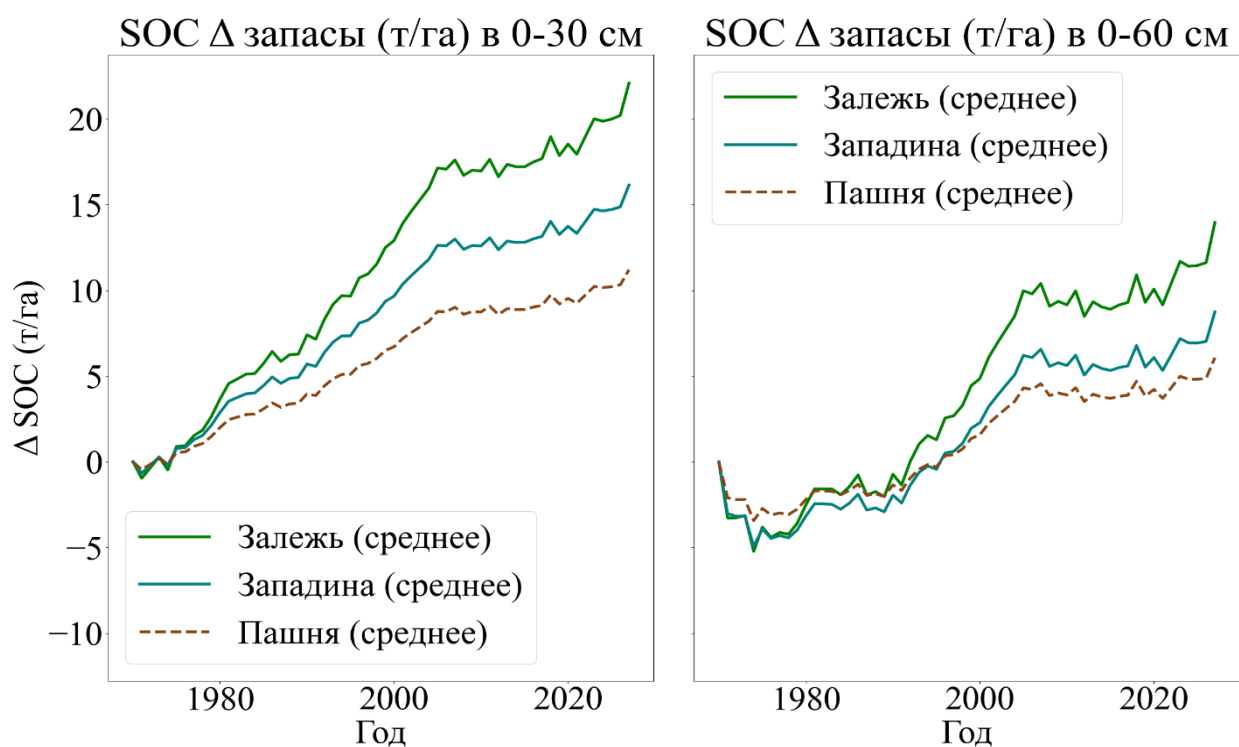


Рисунок 29. Медианный прирост запасов органического вещества в исследованных почвах (лугово-черноземная пахотная – коричневым, лугово-черноземная залежная – зеленым; дерново-глеевая – синим)

Фазы «плато» длительностью 3–7 лет совпадали с засушливыми (годы – менее 450 мм осадков) периодами по метеоданным: в эти годы модель прогнозировала усиление минерализации и кратковременные потери углерода, компенсируемые в последующие влажные годы

Для уточнения диапазона возможных траекторий накопления органического углерода были рассмотрены отдельные модельные сценарии, отражающие контрастные сочетания поступления опада, структуры травостоя и режима землепользования. Эти сценарии иллюстрируют, каким образом различия в типе землепользования и типе растительного покрова определяют скорость и направление изменений $S_{орг}$. В таблице 6 сведены наиболее типичные из них: западина с луговым покровом и высоким уровнем опада, залежь как промежуточный вариант на заброшенной пашне и пашня с интенсивным севооборотом.

Таблица 6. Сводная таблица некоторых модельных сценариев

Сценарий	Опад (т/га·год)	Севооборот / землепользование	Травостой / растительность	Изменение $S_{орг}$ в 0–30 см за 50 лет	Изменение запасов $S_{орг}$ (т/га)
Западина	3–6	Естественное лугопастбищное	Осоково-разнотравные сырые луга с	+1.2–1.8 % $S_{орг}$	+5...15

(гидроморфные условия)		использование, без пашни	осоками, рогозом, моховым подъярусом; на периферии – мезофильные виды		
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 (слабогидроморфные 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

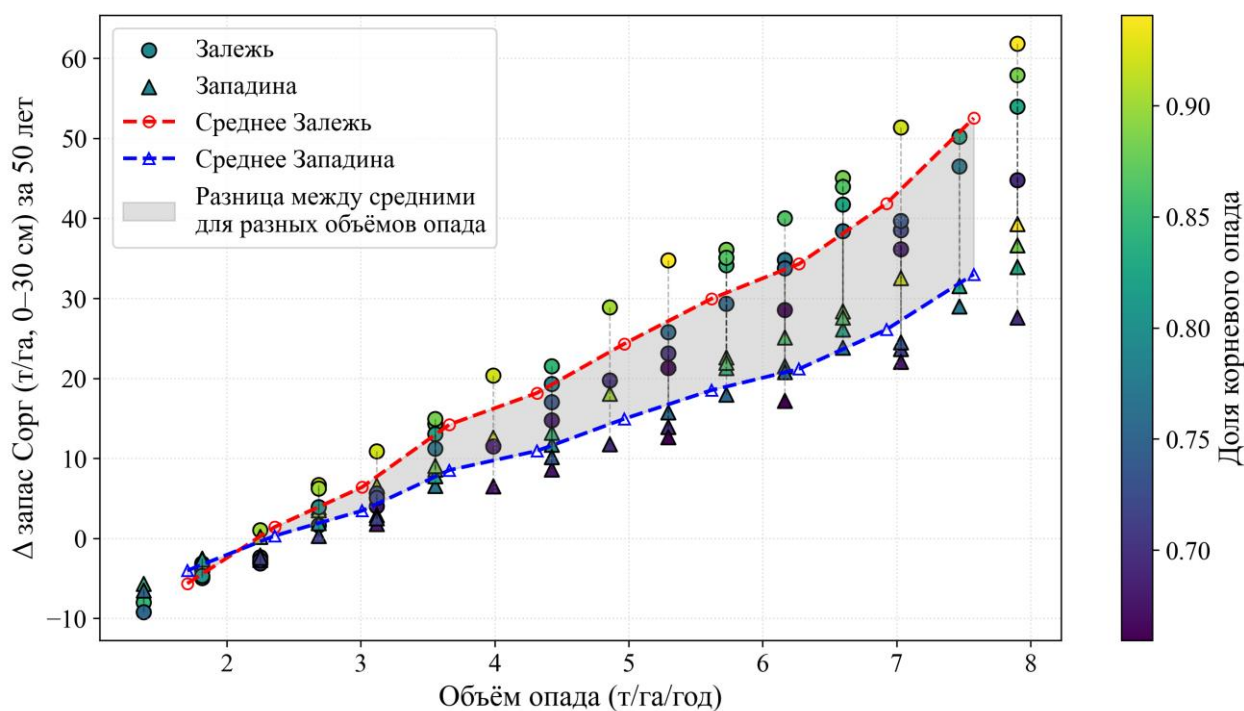


Рисунок 30. – Сопоставление накопления (потери) углерода (т/га) в слое 0-30 см за период моделирования в зависимости от различного влияния факторов: доли корневого опада (видового состава растений) и объема опада (т/га/год) для органического вещества почв западины (синим) и залежи (красным)

Сопоставление модельных траекторий накопления углерода в залежной и западной почвах при одинаковых входных параметрах опада выявило систематическое различие. В слое 0–30 см при одинаковом объёме и составе опада залежная почва накапливала в среднем на 5–15% больше углерода, чем почва западины. Это обусловлено различиями в скорости разложения, контролируемой влажностным модификатором модели: в западной почве длительное переувлажнение замедляет минерализацию, но одновременно подавляет продуцирование гумусовых веществ микробной биомассой. В слое 0–60 см, напротив, западная почва в ряде сценариев демонстрировала сопоставимые или более высокие запасы за счёт более глубокого проникновения органических соединений по профилю в условиях промывного водного режима. Различия в плотности сложения наиболее богатой углеродом 0–10 см толщи поверхностных горизонтов (0,45–1,00 г/см³ в почве западины против 0,90–1,1 г/см³ в почве залежи) приводят к тому, что при одинаковом приросте концентрации Сорг (в %) абсолютные запасы (в т/га) в залежной почве оказываются выше, что частично маскирует различия в интенсивности процессов разложения углерода между почвами двух разных ландшафтных позиций.

5.4. Валидация модельных результатов 50-летнего эксперимента

Верификация модельных расчётов выполнена путём сопоставления прогнозируемых значений содержания Сорг на конец периода моделирования (2022 г.) с фактическими данными лабораторных анализов образцов, отобранных из опорных разрезов в 2022–2023 гг.

Для лугово-чернозёмной залежной почвы (разрез 2) модельное содержание Сорг в слое 0–30 см при медианном сценарии составило 7,4%, фактическое – $7,1 \pm 0,8\%$ ($n = 3$, три стенки разреза). Для грубогумусово-глеевой почвы западины (разрез 4) модельное значение – 9,1%, фактическое – $8,6 \pm 1,2\%$. Для пахотной почвы (разрез 1) модельное значение – 5,8%, фактическое – $5,5 \pm 0,6\%$. Во всех случаях модельные значения находились в пределах доверительного интервала наблюдений.

Дополнительная валидация выполнена по данным Е.М. Самойловой (1969–1973 гг.) для начальных условий: расхождение стартовых модельных значений с историческими аналитическими данными не превышало 0,5% Сорг, что свидетельствует о корректности задания начальных условий.

Следует отметить ограничения валидации: сравнение проведено по трём разрезам, чего недостаточно для полноценной статистической оценки точности модели. Кроме того, SoilGen не учитывает ряд процессов (эрозию, латеральный перенос органического вещества), которые могут вносить

дополнительную неопределённость в прогнозы в почвах исследуемых ландшафтных позиций.

5.5. Моделирование голоценовой динамики углерода почв западных комплексов

Е.М. Самойлова (1979) высказала предположение о том, что гумус в нижней части профиля луговых почв в значительной степени реликтовый. Большая его часть сформировалась в периоды климатического оптимума, в течение которого условия почвообразования характеризовались более высокой интенсивностью гумусонакопления и более значительной биологической продуктивностью.

Для проверки этой гипотезы выполнено моделирование динамики углерода за период 22 000 лет, начиная с последнего ледникового максимума (около 20–21 тыс. лет назад) и охватывая весь голоцен вплоть до настоящего времени. Такое длительное моделирование необходимо для оценки накопленных эффектов климатических фаз (аридных и гумидных циклов) на особенности водного режима почв и оценки органо-аккумулятивной функции почв. Продолжительность одного модельного расчёта составляла 94 часа.

Для описания изменения климата за данный период была использована модель TRACE – палеоклиматическая модель, разработанная для реконструкции климатических условий прошлого и их влияния на наземные экосистемы. Данные модели TRACE по коэффициенту увлажнения были агрегированы с годовым шагом. Для устранения кратковременных аномалий и акцента на устойчивые климатические тренды применена скользящая средняя с шириной окна в 50 лет. На основе полученных данных выделены периоды с различными типами климатического режима – гумидным, субгумидным, субаридным и аридным (FAO, 1989).

Результаты симуляционного моделирования с использованием имитационной модели SoilGen за период голоцена, действительно, показывают, что макродинамика углеродного баланса в рассматриваемых почвах участка связана с климатической изменчивостью. В то же время, установление оптимальных условий гумусонакопления в почвах напрямую не связано с наступлением климатического оптимума голоцена (рис. 31).

В гумидные периоды почвенный углерод преимущественно накапливался: аккумуляция органического углерода отмечена для 54% модельных 11-летних циклов. Для модельных циклов, соответствовавших субгумидным периодам, отмечено почти равное соотношение между периодами накопления (46,8%) и потерь (53,2 %) органического углерода почвами. В субаридных условиях выражена тенденция к доминированию

накопления органического углерода: 63,7% временных отрезков сопровождались накоплением органического углерода. Несмотря на то, что в 36,3% случаев наблюдались периоды относительной потери углерода, их появление было связано с кратковременными фазами пониженной увлажнённости на верхней границе гумидного периода.

В аридных климатических фазах баланс углерода был наименее благоприятным: почти 60 % 11-летних периодов отмечались относительным снижением запасов органического углерода. Это связано с резким дефицитом влаги, и быстрой минерализацией органического углерода. Вместе с тем, даже в аридных условиях в ~40 % случаев наблюдались периоды накопления органического углерода в почвах.

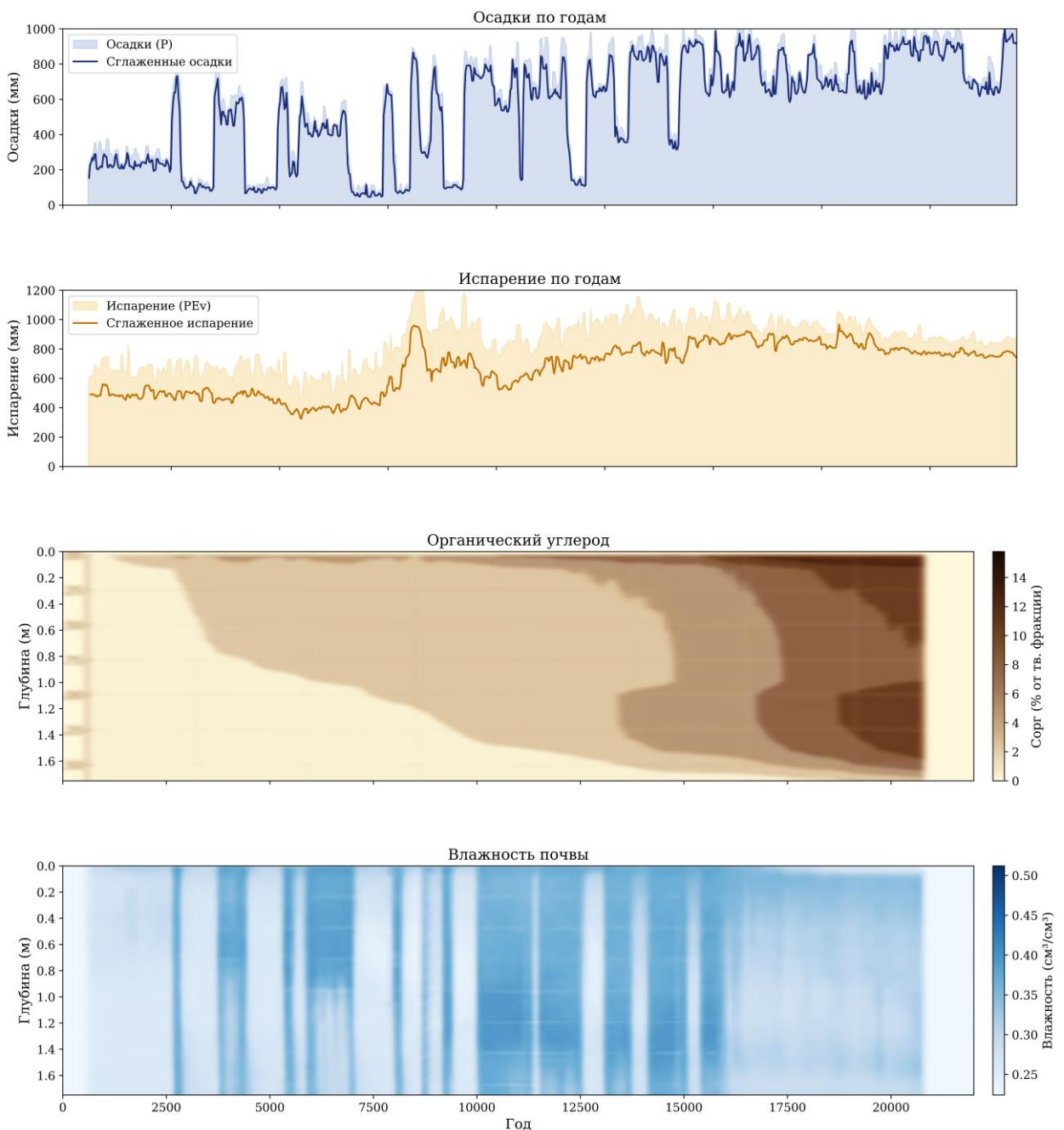


Рисунок 31. Результаты симуляционного моделирования с использованием имитационной модели SoilGen за период голоцена – 0 (точка отсчета по оси X) соответствует 22 000 году от настоящего времени

Гумидные и субаридные фазы создавали благоприятные условия для накопления углерода, тогда как наступление субаридных и особенно аридных периодов приводило к снижению запасов углерода. Эти закономерности подчёркивают важность климатических факторов в формировании структурно-функциональной организации почвенного профиля черноземов квазиглеевых. Применение модели SoilGen позволило выявить не только общий тренд, но и высокочастотную мозаичность углеродного ответа почвы на внешние климатические возмущения. Установленные зависимости необходимы для обоснования генетических моделей эволюции почв черноземов квазиглеевых и прогноза отклика содержания органического углерода в почвах на климатические изменения. При этом следует учитывать, что полученная модель изменения содержания органического углерода в почвах по модели SoilGen учитывает не только изменение климатического фактора, но также и изменение растительной биомассы, соотношения подземного и надземного опада, параметры биологической активности почв, биотурбаций, водного и температурного режима почв.

Глава 6. Пространственная неоднородность органического углерода почв западного комплекса лесостепи и её влияние на региональные оценки запасов

Пространственная организация содержания почвенного органического углерода ($C_{орг}$) в лесостепных экосистемах определяется сочетанием микрорельефа, дренированности и особенностей растительного покрова. На региональном уровне оценки содержания и запасов углерода, как правило, основываются на усреднённых значениях по крупным почвенным контурам или информации из глобальных баз данных. Такой подход подразумевает относительную однородность в пределах картографических единиц, однако практически полностью игнорирует локальную вариабельность состава, содержания и запасов почвенного углерода, в особенности присущую лесостепным ландшафтам, осложненным сельскохозяйственным использованием, что было показано в двух предыдущих главах. Описанные результаты показывают, что мозаичность полугидроморфных и гидроморфных почв вносит значительную неопределённость в оценку углеродного баланса почв западных комплексов.

В настоящей главе представлены результаты пространственного прогноза содержания органического углерода по данным полевых наблюдений и статистического моделирования, выполненного с использованием моделей машинного обучения. Рассматривается роль экотонов и межурочищных взаимодействий, а также обсуждается, каким образом выявленная вариабельность и неопределенность прогнозов способна отражаться на региональных оценках запасов углерода. Особое внимание уделено сопоставлению наблюдаемых закономерностей с существующими представлениями о гидроморфизме как факторе гумусообразования (Ахтырцев, 1991; Самойлова, 1981).

Как было показано в главе 4, содержание органического углерода в поверхностном (0-15 см) горизонте ($C_{орг}$) на исследуемой территории варьировалось от 27,3 до 83,7 г кг⁻¹ (Таблица 4).

Больше всего точек отбора проб было заложено в пределах пашен и залежей, меньшее количество – на лугах и в лесных сообществах. Лесные почвы характеризовались максимальными значениями $C_{орг}$ и наименьшей вариабельностью $C_{орг}$, в то время как луговые почвы характеризовались наибольшей вариабельностью $C_{орг}$.

6.1. Исследовательский анализ данных и корреляции между предикторами и целевой переменной

В анализ были включены переменные, значимо коррелирующие с Сорг ($p < 0,05$). При этом переменные со значениями корреляции Пирсона $r > 0,9$ были исключены (Рис. 32). Наиболее высокие значения корреляции были зафиксированы для EVI2 и NDWI ($r \sim |0,6|$), умеренные корреляции отмечены для большинства фенологических переменных ($r \sim |0,4-0,2|$). TWI демонстрировал гораздо более низкую корреляцию, чем NDWI; единственный предиктор, полученный по данным полевого опробования (pH) характеризовался слабой, но значимой корреляцией ($r \sim -0,1$).

Ковариаты, связанные с растительностью



Ковариаты, связанные с рельефом

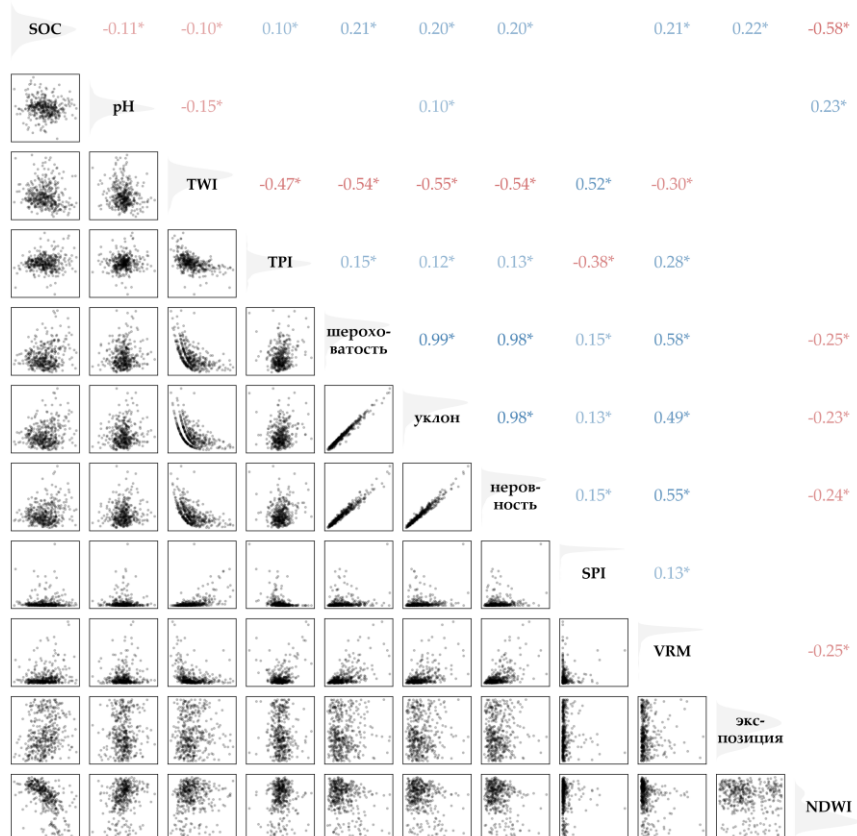


Рисунок 32. Матрица переменных коэффициентов корреляции Пирсона. По диагонали приведены названия переменных и кривые плотности распределения (серым), верхняя диагональная панель представляет собой полуматрицу коэффициентов корреляции, а нижняя диагональная панель – полуматрицу точечных диаграмм распределения между переменными. Расшифровки обозначений ковариат приведены в таблице №2

6.2. Оценка производительности моделей

Качество прогноза моделей было оценено в ходе перекрестной проверки (Рис. 33). Из 12 моделей девять были отобраны для оценки как лучшие в своих классах. Модель линейной регрессии (LR) ($R^2 = 0,46$), ридж (ridge) регрессия и регрессия основанная на частичных наименьших квадратах (PLSR) показали наихудшую точность. Модели опорных векторов (SVR) и Cubist показали промежуточную точность ($R^2 = 0,52$), в то время как модели на основе деревьев решений показали лучшие результаты, причем CatBoost продемонстрировал наиболее высокую точность прогноза ($R^2 = 0,61$) среди классических методов машинного обучения. Для оценки вклада отдельных компонентов нейросети в качество предсказания были проведены абляционные (en. ablation) исследования – с исключением различных вычислительных ветвей из архитектуры исходной гибридной модели. Гибридная модель LSTM-CNN-MLP показала наилучшую точность среди методов глубокого обучения, с R^2 , достигшим 0,65. Гибридная модель CNN-LSTM показала наихудшую точность среди всех архитектур глубокого обучения ($R^2 = 0,53$). Гибридная модель CNN-MLP продемонстрировала качество предсказания наравне с LSTM-CNN-MLP ($R^2 = 0,64$). Исключение MLP-ветви сильнее снижало точность ($\Delta R^2 = 0,12$, $\Delta RMSE = 1 \text{ г кг}^{-1}$), по сравнению с удалением LSTM-ветви ($\Delta R^2 = 0,02$, $\Delta RMSE = 0,1 \text{ г кг}^{-1}$). Исключение CNN-ветви сильнее всего повлияло на точность ($\Delta R^2 = 0,25$, $\Delta RMSE = 2 \text{ г кг}^{-1}$). Совместное удаление MLP и LSTM ветвей привело к наибольшему падению точности ($\Delta R^2 = 0,16$, $\Delta RMSE = 1,3 \text{ г кг}^{-1}$).

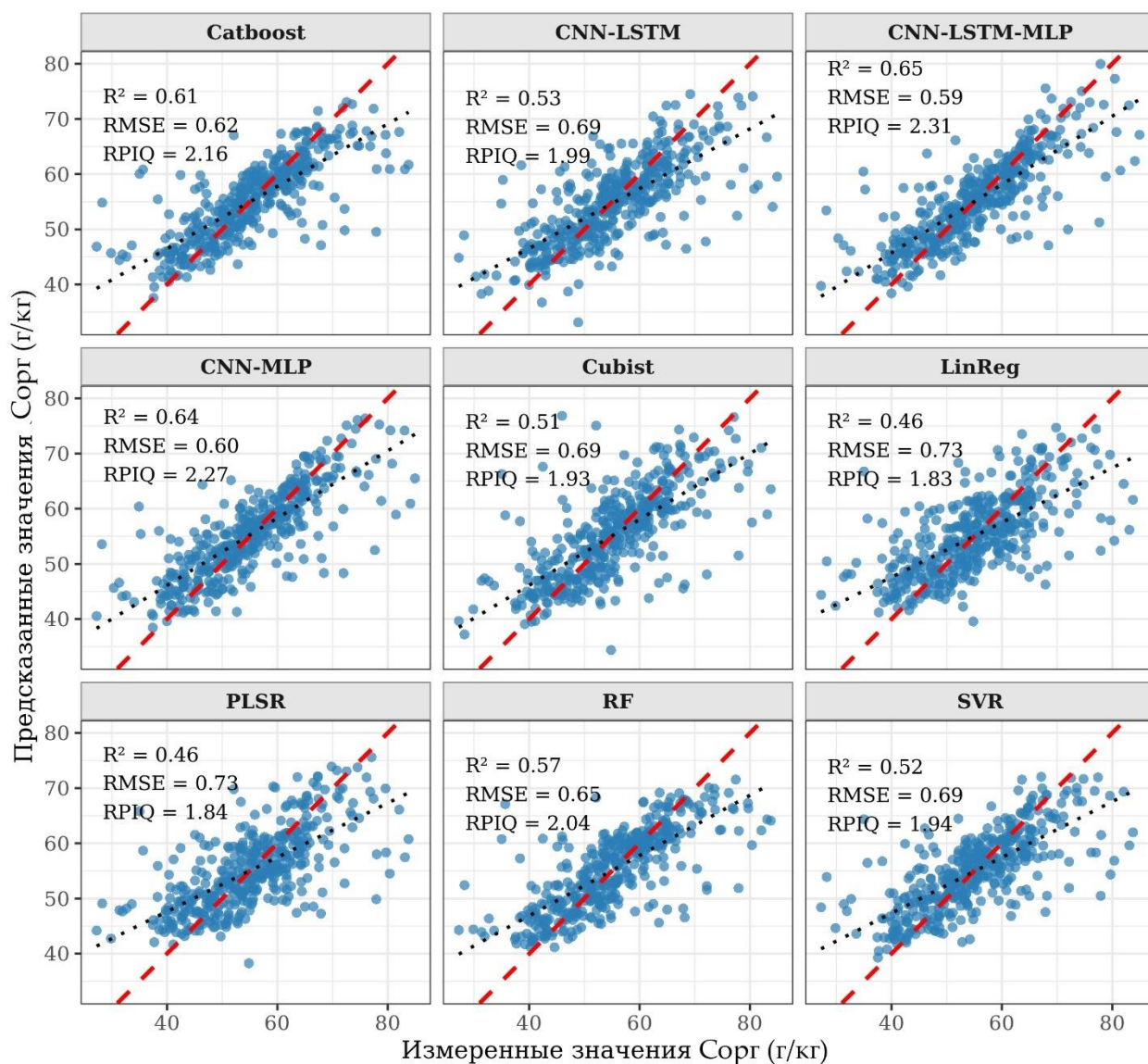


Рисунок 33. Прогнозируемое и наблюдаемое содержание органического углерода в почве, г/кг, для оцениваемых моделей на основе 5-кратной перекрестной проверки

6.3. Сравнение моделей и оценка неопределенности

Карты содержания органического углерода, построенные различными моделями, воспроизводят ожидаемые пространственные закономерности распределения $C_{орг}$ для лугов, пашни и лесных участков, с диапазоном прогноза от 2,9 до 8,7% (рис. 34а). Регрессионные модели давали завышенные значения $C_{орг}$ в лесах. Модель Cubist характеризовалась наиболее высокой амплитудой прогноза (4,1% в лесах и 3,3% на лугах). Алгоритмы на основе деревьев решений и метод опорных векторов (SVR) обеспечили сглаженные распределения без резких выбросов, с постепенными переходами между биотопами. Модели глубокого обучения (CNN-MLP, CNN-LSTM, CNN-LSTM-MLP) выделяли зоны повышенного содержания $C_{орг}$ (>7,2%) внутри

лесов с высокой биомассой и плотностью древостоя, а также увеличивали контраст $C_{орг}$ в краевых участках биотопов (экотонах).

Карты, полученные с помощью LR, PLSR, SVR, Cubist и CNN-MLP, демонстрируют выраженные флювиальные структуры, совпадающие с флювиальными элементами нанорельефа по данным индекса TWI, полученного при обработке ЦМР. Модели CNN-LSTM и CNN-LSTM-MLP формировали более плавные поверхности, аналогичные методам на основе деревьев решений.

95%-интервалы неопределённости прогноза (PIR) достигали 20-35 г/кг (рис. 34б). Наибольшая неопределённость отмечена у Cubist (PIR = 30,4 г/кг) минимальная – в лесных участках. LR и PLSR имели средние значения PIR = 29-30 г/кг. Методы на основе деревьев решений показали более низкую неопределённость (24-26 г/кг) и характеризовались более сглаженными градиентами $C_{орг}$ между биотопами. Максимальные значения PIR приходились на лесные сообщества с высоким содержанием $C_{орг}$. SVR демонстрировал плавные переходы (PIR = 27 г/кг) и локальные пики на грунтовых дорогах. Все модели глубокого обучения характеризовались более низкой неопределённостью прогноза (23-24 г/кг), при этом CNN-MLP показывала локальные скачки значений PIR (до 34 г/кг) в краевых участках древесных сообществ. Объединение блоков CNN, LSTM и MLP уменьшало общую неопределённость прогноза и частоту возникновения участков повышенных значений PIR в промежуточных ландшафтных позициях.

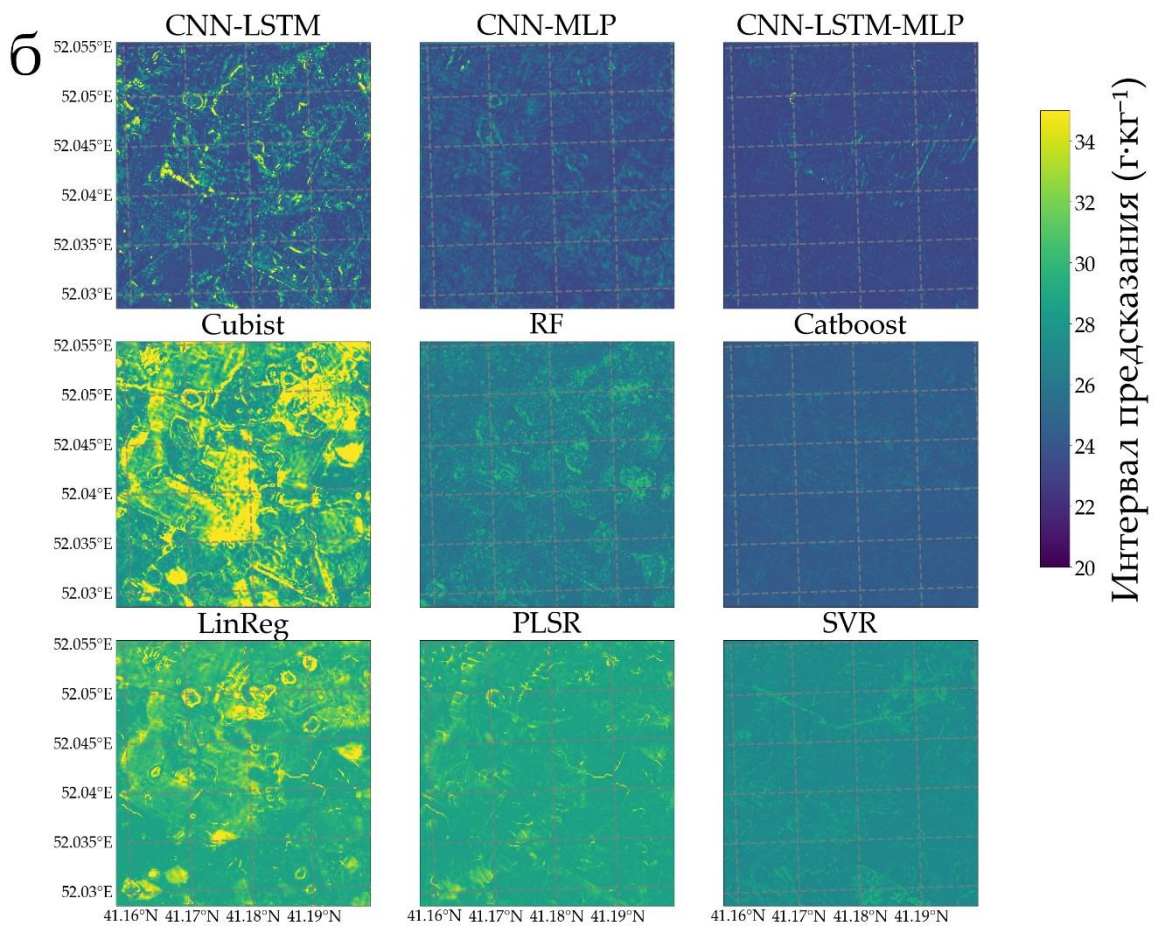
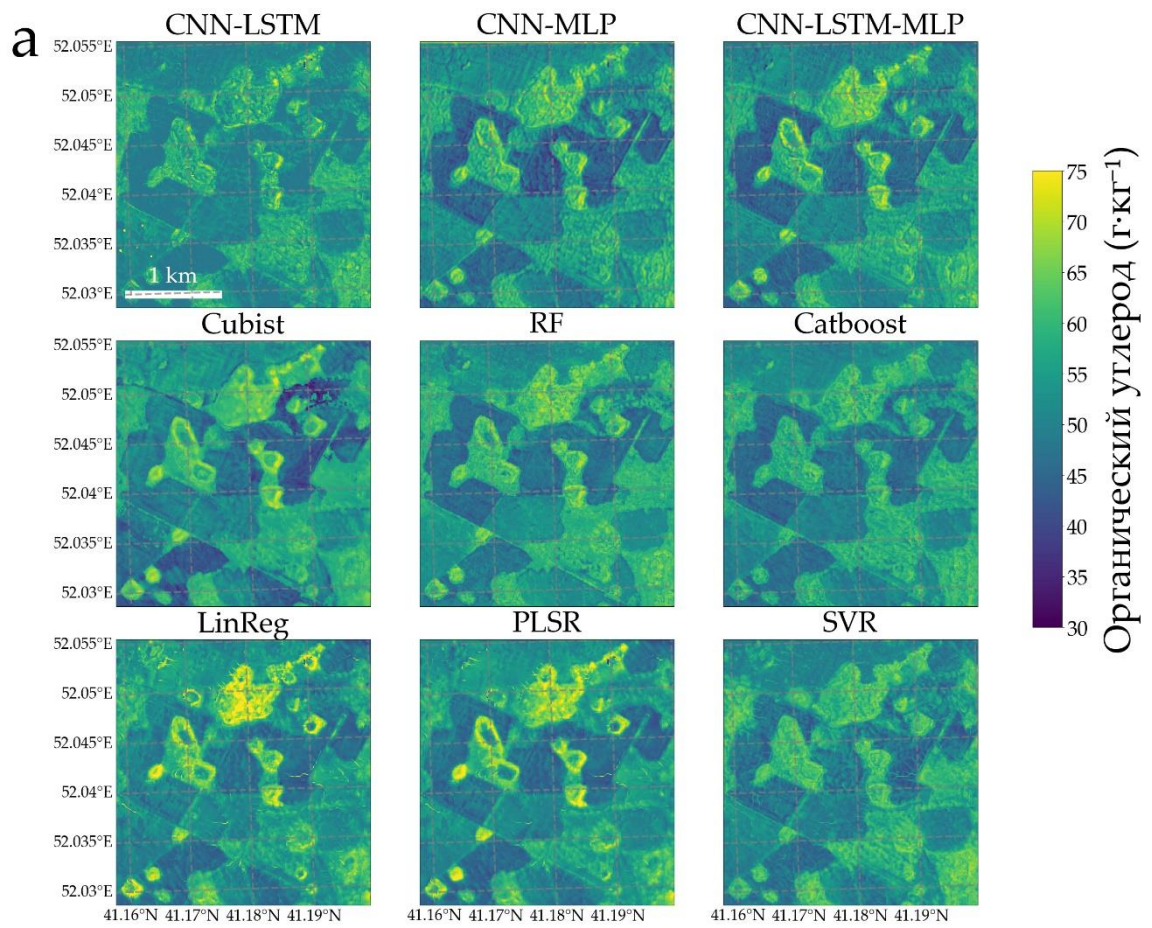


Рисунок 34. (А) Полученные карты S_{org} , г/кг для оцениваемых моделей, (В) Полученные карты интервала прогнозирования (PIR, г/кг) для оцениваемых моделей

6.4. Распределение и вариабельность почвенного углерода в ландшафте по данным модельного прогноза CNN-LSTM-MLP

Информация ниже приведена по данным модельных прогнозов. Почвенный органический углерод распределен неравномерно (Рис. 35): самые высокие концентрации углерода отмечены в почвах лесных сообществ, возрастая с плотностью древостоя, в то время как сельскохозяйственные почвы содержат меньше углерода в поверхностном горизонте. Средняя внутриполевая вариабельность достигает $21,5 \pm 4,7$ г кг⁻¹ на пашне, $22,9 \pm 6,9$ г кг⁻¹ на лугах и $24,0 \pm 7,4$ г кг⁻¹ в лесах (максимумы для отдельных полей до 30, 42 и 37 г кг⁻¹ соответственно).

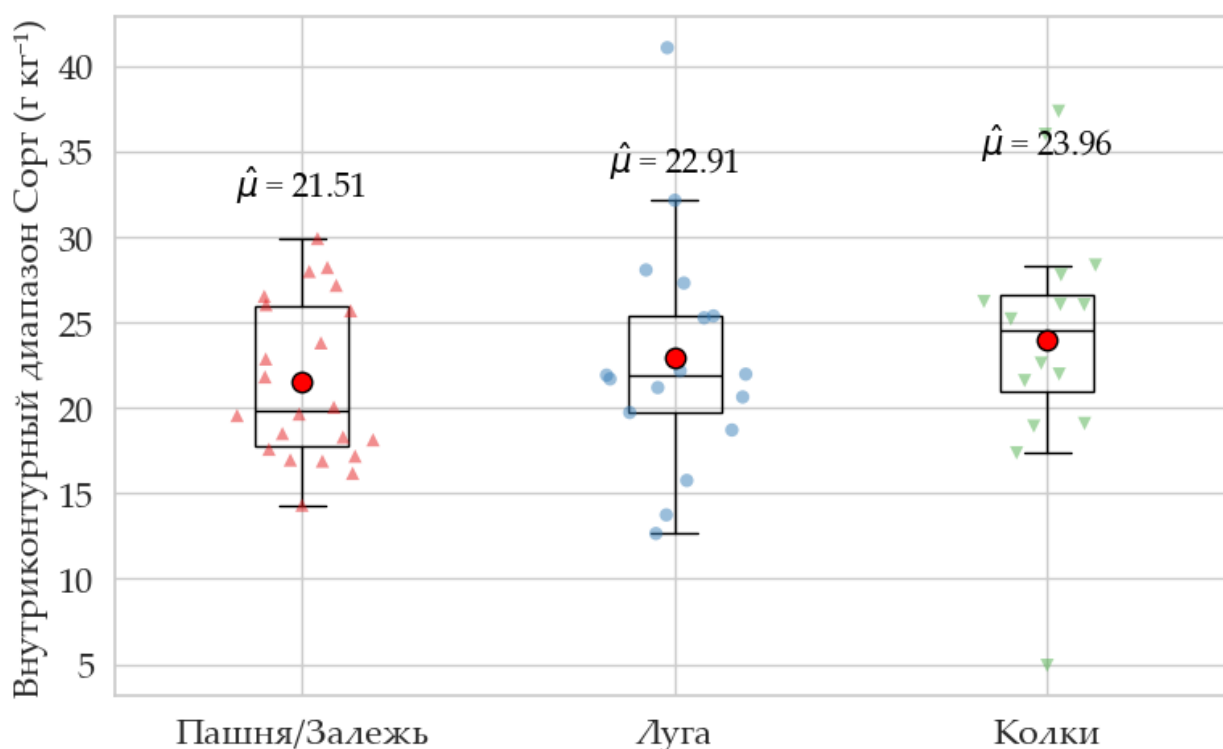


Рисунок 35. Изменчивость S_{org} в пределах отдельных полей/лугов/осино-березовых рощ на карте, построенной на основе прогноза модели CNN-LSTM-MLP.

Локальная вариабельность S_{org} была значимо (тест Левена, $p < 0,001$) выше внутри экотонов по сравнению с внутренними участками биотопов: стандартное отклонение в краевых окнах могло достигать 12 г кг⁻¹ на 50 м, в то время как большинство внутренних пикселей оставались в пределах 1-4 г кг⁻¹ (Рис. 36). На лугах и пашне средние стандартные отклонения на 50 м внутри биотопов составляли 2,27 и 1,95 г кг⁻¹, возрастая до 2,95 и 3,16 г кг⁻¹ на

границах с лесами, которые сами имели показатели 2,42 и 3,69 г кг⁻¹ соответственно (Рис. 37).

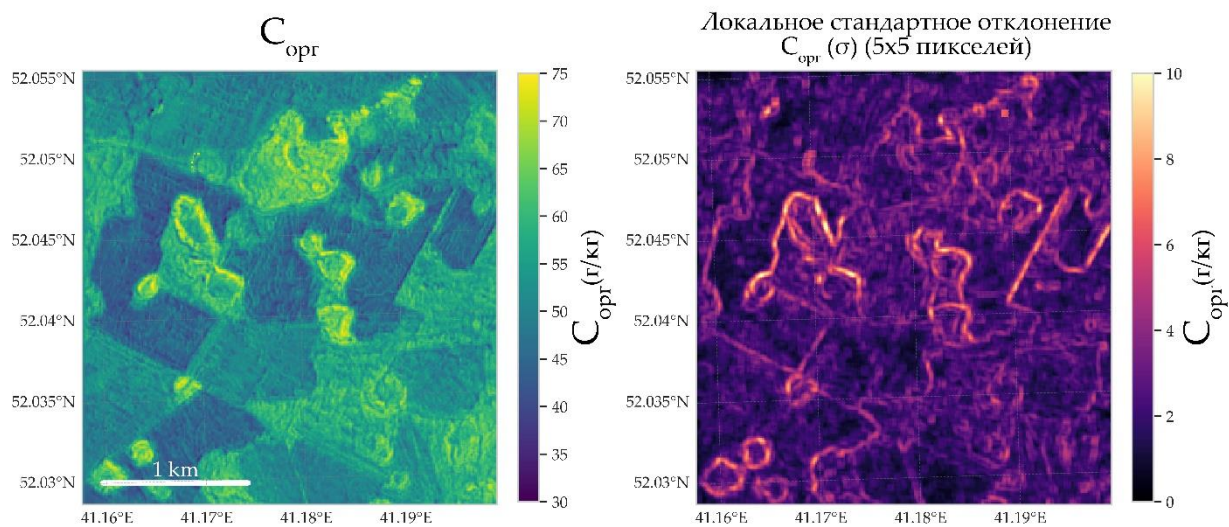


Рисунок 36. (а) Карта $C_{орг}$, построенная на основе прогноза гибридной модели CNN-LSTM-MLP. (б) Карта локальной неопределенности после подсчета стандартного отклонения (σ) в окнах 5x5.

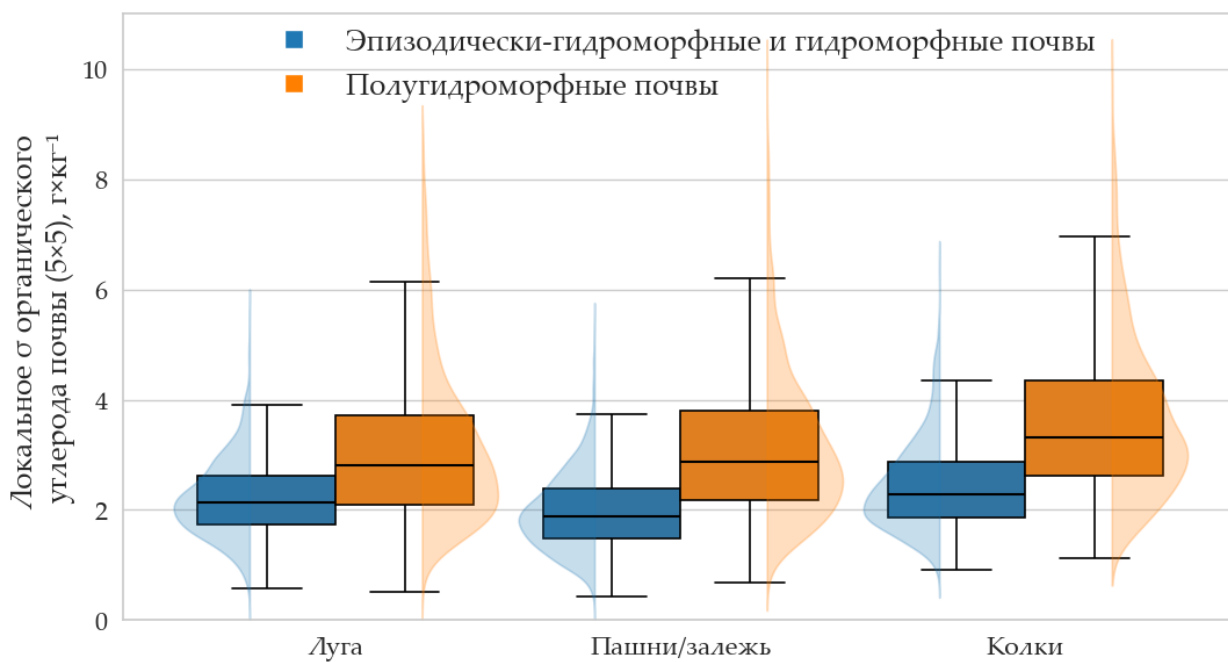


Рисунок 37. Локальное стандартное отклонение (σ) в экотонах и внутренних частях различных биотопов на карте, сгенерированной моделью CNN-LSTM-MLP.

6.5. Значимость признаков

Индекс EVI2 оказался наиболее важным предиктором содержания органического углерода: он получил максимальный вес (1.00) в семи из девяти

моделей – CNN-MLP, CNN-LSTM-MLP, Cubist, RF, CatBoost, PLSR и SVR (рис. 38). Для обеих линейных моделей его значение составило 0.74. Лишь модель CNN-LSTM, в качестве входных данных использующая только изображения, снизила значимость EVI2 до 0,21, полагаясь на фенологические признаки – день начала сезона (SOS = 1,00) и общую продуктивность растительности за сезон (TP = 0,60).

Наибольшие значения NDWI отмечены в CatBoost (0,61), CNN-MLP (0,51) и SVR (0,44), тогда как в сетях LSTM они колебались в пределах 0,17-0,31. Числа Шепли для показателей, связанных с микрорельефом, была наиболее высокой для гибридных моделей: TPI достигал 0,33, TRI – 0,44 в CNN-LSTM-MLP, а величина Шепли для экспозиции поднималась до 0,64 в CatBoost. Линейные методы распределяли вес между взаимосвязанными вегетационными признаками (BI2, сезонная амплитуда, скорость весенней вегетации). Влияние pH было слабым (<0,15), кроме модели CNN-LSTM-MLP (0,30).

Таким образом, признаки, наиболее значимо влияющие на результаты предсказания моделей – интенсивность отражательной способности по данным индекса EVI2, общая продуктивность растительности, дата начала сезона, наклон фенологической кривой в начале сезона и индексы влажности.

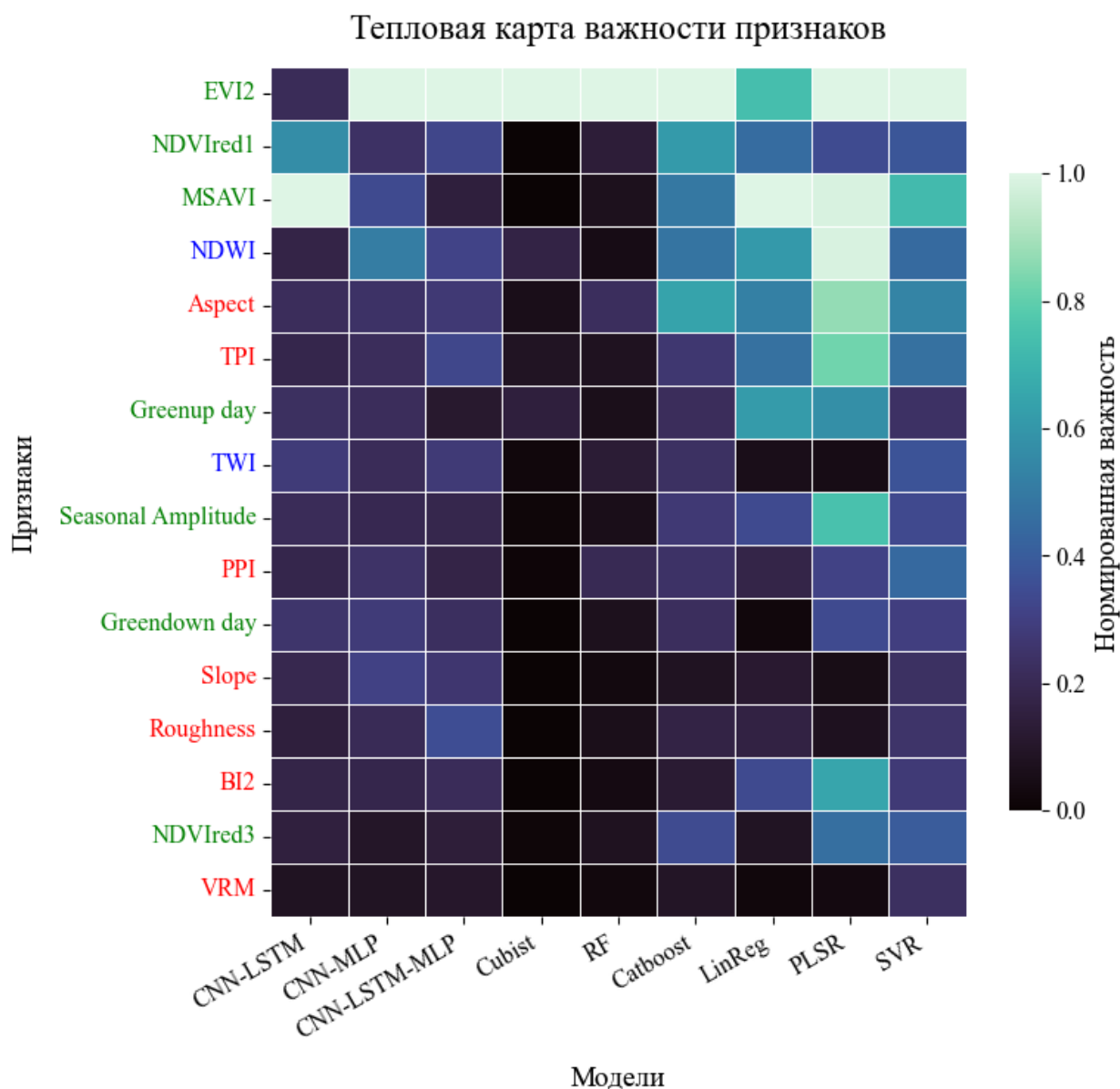


Рисунок 38. Нормализованная значимость признаков в различных моделях

6.6. Мозаика углерода в поверхностном слое лесостенных почв

На исследуемой территории наибольшие концентрации $C_{орг}$ зафиксированы в залесённых понижениях (колках). Их содержание примерно на 20% превышает среднее по территории и выше, чем в берёзово-осиновых лесополосах Каменной Степи и осиновых колках Саскачевана. Луга занимают второе место по содержанию углерода: концентрации варьируют от 40 до 62 $г \cdot кг^{-1}$, что соответствует диапазону для влажных лугов Прерий и превышает средние значения (около 35 $г \cdot кг^{-1}$) для луговых чернозёмов Западной Сибири (Таблица 7).

Разница в содержании $C_{орг}$ в почвах пашен и залежей исследуемого ключевого участка лишь на 8% ниже по сравнению с почвами лугов. Это

существенно меньше, чем в гидроморфных и полугидроморфных североамериканской лесостепи, где различия между пахотными почвами и прилегающими почвами лугов достигают 15-20%. Средние содержания углерода во всех поверхностных горизонтах пахотных почв и залежей рассматриваемого участка превышают $50 \text{ г} \cdot \text{кг}^{-1}$, что существенно превосходит типичные значения для пахотных почв Саскачевана ($30 \pm 10 \text{ г} \cdot \text{кг}^{-1}$) и Прерий ($25-45 \text{ г} \cdot \text{кг}^{-1}$). Запасы углерода в слое 0-30 см зональных автоморфных почв лесостепи и в почвах лесополос Русской равнины также значимо выше, чем в почвах прерий (Chendev et al., 2015). Кроме того, относительно слабая интенсивность обработки и низкая интенсивность мелиоративных мероприятий ограничили потери почвенного органического углерода. Сельскохозяйственные поля визуальны однородны, но между ними прослеживаются чёткие границы по содержанию $C_{\text{орг}}$.

Таблица 7. Литературные значения содержания $C_{\text{орг}}$ в верхнем слое почвы (topsoil) лесостепных ландшафтов с периодическим или постоянным переувлажнением.

Регион/экосистема	Землепользование или биотоп с названием почвы (WRB)	Глубина (см)	Среднее \pm CO или диапазон ($\text{г} \cdot \text{кг}^{-1}$)	Источник
Каменная Степь, Россия	Осиновые и березовые лесополосы на черноземах	0–10	61 ± 4	Prikhodko et al., 2013
Регион прерийных подхоллов, Саскачеван, Канада	Осиновые перелески на черноземах и глееземах	0–25	55 ± 10	Cline & Laroque, 2025
Регион прерийных подхоллов, США	Луга (влажные grasslands) на черноземах и феоземах	0–15	40–62	Tangen & Bansal, 2020
Южный Урал, Россия	Лиственнично-березовая лесостепь на черноземах	0–10	38 ± 5	Prikhodko & Manakov, 2014
Западная Сибирь, Россия	Луговые степи на черноземах	0–20	≈ 35	Bobrenko et al., 2021
С-В Китай (лестрава)	Луговые феоземы/черноземы	0–30 / 0–48	35 / 53	Qiu et al., 2025
Регион прерийных подхоллов, США	Природные заболоченные луга на глееземах, феоземах	0–15	≈ 32	Bansal et al., 2021
Регион прерийных подхоллов, США	Прифермерские болота на феоземах	0–15	≈ 27	Bansal et al., 2021
Регион прерийных подхоллов, США	Пашня/залежь на черноземах и феоземах	0–10	25 – 45	Tangen & Bansal, 2020

Регион прерийных подхолмов, Саскачеван, Канада	Пашня на черноземах	на 0–15	30 ± 10	Phillips et al., 2015
--	---------------------	---------	-------------	-----------------------

Наиболее контрастные изменения фиксируются в экотонах. Переход от луга к колку на расстояние 10-15 м сопровождается увеличением $C_{\text{орг}}$ на 10-25 $\text{г} \cdot \text{кг}^{-1}$ (20-55%) и ростом локального стандартного отклонения в 4-6 раз. Это согласуется с результатами, полученными для лесостепей Северного Китая, где в почвах на границах степи и леса фиксируется изменение содержания $C_{\text{орг}}$ более 50%. При этом валовое содержание почвенного углерода на границах луг-колок и пашня-колок остаётся ниже, чем в центре колков.

Даже в пределах однородных возделываемых полей вариабельность $C_{\text{орг}}$ достигает 22 $\text{г} \cdot \text{кг}^{-1}$, для почв лугов и колков разброс ещё выше (рис. 39). Для сравнения, в других работах, посвященных исследованию пашни в зоне лесостепи этот показатель колеблется от 8 до 20 $\text{г} \cdot \text{кг}^{-1}$, максимум достигает 50 $\text{г} \cdot \text{кг}^{-1}$ (Phillips et al., 2015; Suleymanov, 2024). Такое распределение характерно для умеренно переувлажнённых лугов, где временные понижения весной и осенью насыщаются влагой, что замедляет разложение и способствует накоплению органического вещества. На выровненных участках, несмотря на высокую продуктивность травостоя, содержание углерода ниже из-за быстрого минерализующего распада и дефицита слаборазложившихся остатков.

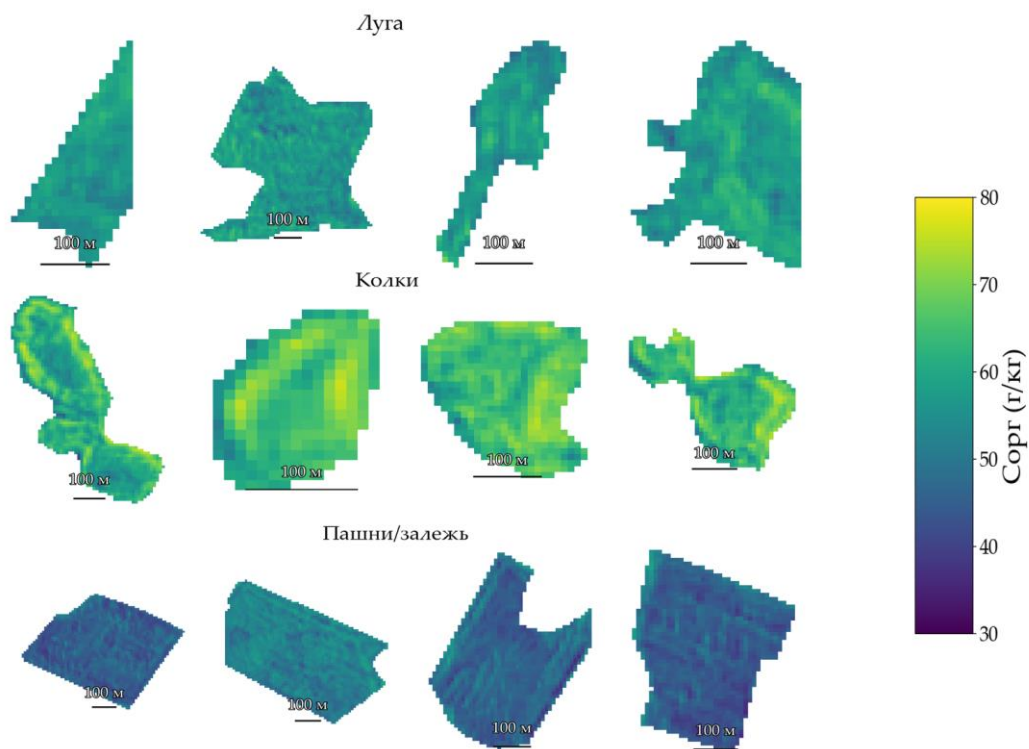


Рисунок 39. Неоднородность запасов органического углерода внутри урочищ

Выявленные закономерности подтверждаются анализом важности предикторов. Индекс EVI2 (значимость 1,00 в семи моделях) оказался главным фактором, далее следуют многолетняя фенология, индекс влажности NDWI и показатели микрорельефа. Это совпадает с результатами других исследований цифрового картографирования $C_{орг}$, где растительные индексы обычно занимают первое место, а влажностные индексы и орографические параметры вторичны.

Орографические параметры, особенно экспозиция и индекс формы поверхности (TPI), оказались здесь более значимыми, чем на равнинах Южного Урала или Центрального Китая. Это объясняется более высоким пространственным разрешением исходных данных и выраженным взаимодействием между микрорельефом, влажностью и структурой растительности.

В целом мозаичность распределения углерода в почвах Окско-Донской низменности отражает характер распределения влажности: максимальные значения приурочены к переувлажнённым понижениям, а минимальные – к дренированным участкам с активным аэробным разложением. Пространственные различия $C_{орг}$ в пределах одного ландшафта достигают 40–50%, что подчёркивает ключевую роль гидроморфизма и растительного покрова в аккумуляции органического вещества.

6.7. Сравнение подходов, очаги неопределённости и следствия для методологии отбора проб

Гибридная модель CNN-LSTM-MLP продемонстрировала наилучшие результаты среди всех опробованных подходов, в числе которых CatBoost. Абляционные эксперименты (эксперименты с исключением отдельных ветвей моделей) подтвердили, что наибольший вклад в качество прогноза вносит сверточная ветвь CNN, которая позволяет учитывать пространственные ковариаты, связанные с рельефом и растительностью. Исключение блока LSTM, отвечающего за временные зависимости, снизило точность незначительно, исключение ветви MLP умеренно снизило качество модели ($R^2 = 0.53$), что указывает на то, что фенологические параметры, такие как SOS и TP, вносят самостоятельный вклад в предсказание содержания углерода, а не просто дублируют вегетационный индекс EVI2.

Модели Cubist и Random Forest оказались чрезмерно чувствительными к значениям индекса EVI2, что привело к снижению точности предсказания в переувлажнённых понижениях, где этот индекс достигает наиболее высоких значений. В моделях линейной регрессии и PLSR влияние распределялось между вегетационными (индекс BI2, день начала сезона, совокупная

продуктивность, внутрисезонная амплитуда, наклон вегетационной кривой в начале сезона) и топографическими предикторами (NDWI, экспозиция, TPI). Наиболее результативные алгоритмы – гибридные нейронные сети и методы, основанные на деревьях решений, – включали NDWI и хотя бы один показатель микрорельефа (уклон или топографический индекс позиции (TPI)), отражающие локальные перепады увлажнения и состояния растительного покрова в экотонных позициях и в луговых сообществах. Влияние рН было слабым, но сохранялось в составе значимых факторов гибридной модели.

Несмотря на низкую значимость индекса TWI, результаты прогноза с использованием LR, PLSR и SVR осложнены топографическими артефактами, отражающими высокую чувствительность этих моделей к ковариатам – производным ЦМР. Модель Cubist характеризовалась существенно более низким качеством прогноза в экотонных позициях, на пересечении луговых и древесных сообществ; прогноз с использованием гибридных нейронных сетей и CatBoost характеризовался меньшей вариабельностью пространственного прогноза и относительно меньшими значениями ошибок (RMSE) в экотонных позициях, что указывает на выраженную нелинейность в зависимостях между признаками в данных и сложные взаимодействия факторов.

Для всех методов характерна систематическая ошибка: завышение низких и занижение высоких значений $C_{орг}$, что согласуется с известным эффектом «сжатия диапазона» (Dong et al., 2024). Модели классического машинного обучения (ML) характеризуются более узким интервалом прогноза, что обеспечивает более высокую точность в области средних значений, тогда как глубокие нейронные сети (DL) точнее предсказывают значения в хвостах распределения $C_{орг}$ за счёт более высокой нелинейной объясняющей способности (Lee et al., 2023).

Неопределенность прогноза увеличивается в переходных зонах между разными биотопами. Эти области совпадают с участками контрастных значений влажностного индекса NDWI и понижениями на ЦМР, где взаимодействие между влажностными, вегетационными и топографическими предикторами усложняется. Комбинирование трёх ветвей в модели CNN-LSTM-MLP позволило сузить диапазон интервала предсказания (PIR) до 22–23 г·кг⁻¹, тогда как у CatBoost и SVR он составил 25-27 г·кг⁻¹.

CatBoost остаётся лучшим среди классических методов машинного обучения – он обеспечивает высокое качество при минимальных вычислительных и временных затратах и позволяет эффективно работать с табличными данными, однако лишён способности явно учитывать пространственный и временной контекст, сглаживая результаты предсказания. Преимущество гибридных нейронных сетей состоит в том, что

они интегрируют пространственные и временные зависимости: CNN позволяет учитывать сопредельные пиксели, а LSTM – сезонные тренды, что особенно важно для экотонных и биотопных со сложной вегетацией.

Дальнейшее повышение качества возможно за счёт применения моделей, явно учитывающих пространственное соседство – регрессионного кригинга, географически-взвешенной регрессии, а также расширения временной составляющей в гибридных сетях. Однако увеличение сложности снижает интерпретируемость моделей. Методы SHAP и оценки чувствительности признаков (permutation complexity) позволяют ранжировать предикторы, но для пространственного анализа требуются подходы, позволяющие проводить пространственный анализ важности признаков, например, описанный в работе Kakhani et al. (2025).

Выявленные закономерности определяют выбор стратегии дальнейшего пробоотбора. Равномерные сетки, где каждый гектар имеет одинаковый вес, избыточно детализируют внутренние биотопы, но недостаточно полно характеризуют экотонные зоны. Перспективно использовать данные дистанционного зондирования (Sentinel-2, NDWI, EVI2) для выявления «горячих точек», где частота пространственного опробования должна быть выше. Подход, основанный на анализе множественных свойства почв (MPRS), может повысить вероятность отбора экотонных пикселей путём добавления «краевых областей биотопов» как дополнительной переменной.

Поскольку пространственное разрешение Sentinel-2 (10 м) не позволяет различать наиболее узкие экотоны, рекомендуется комбинировать данные ДЗЗ с дополнительной верификацией в полевых условиях. Усиление частоты пробоотбора в экотонных зонах и учёт всех типов землепользования обеспечат повышение точности прогнозов C_{org} и робастность пространственных моделей.

6.8. Ограничения проведенных оценок и предложенных подходов и направления для будущих исследований

Проведённые оценки основаны на данных одного вегетационного сезона, одной глубины отбора (0-15 см) и 413 точек наблюдения. Такое ограничение позволяет охарактеризовать только состояние ПОВ поверхностных горизонтов, тогда как по данным исследований заболоченных и полугидроморфных почв значительная часть органического углерода (до 50 % и более) может находиться на глубине ниже 30 см. Следовательно, для уточнения запасов ПОВ необходим повторный и более детализированный отбор проб по глубине и в разные годы, чтобы оценить устойчивость

выявленных закономерностей, включая «краевой» эффект неопределенности пространственного прогноза в экотонах.

При первоначальном выборе признаков рассматривались 24 потенциальные ковариаты, но после фильтрации скореллированных и малозначимых для $S_{орг}$ переменных осталось 16, из которых основную информацию несут 7-8 – преимущественно связанные с растительностью, и 2-3 связанные с рельефом. Если данные лидарной съёмки высокого разрешения недоступны, можно применять общедоступные цифровые модели рельефа с разрешением 30 м. Улучшение точности возможно при комбинировании деревьев решений и нейронных сетей, использовании разномасштабных признаков (multi-scale properties) или добавлении слоя регрессионного кригинга.

Сетка проб не охватывает почвы и почвоподобные тела селитебных территорий, дорог, территорий занятых промышленными предприятиями или объектами коммунального хозяйства, которые существенно отличаются по содержанию органического углерода. В региональных исследованиях такие участки следует маскировать или выделять отдельными классами. Наибольшая неопределённость наблюдается для почв экотонов, формируемых сочетаниями древесных и травянистых сообществ, где кроны деревьев перекрывают линии раздела биотопов. Использование лидарных данных БПЛА, не только для формирования ЦМР, но и для маркирования границ биотопов, может способствовать повышению точности выделения экотонов (Bruggisser et al., 2024).

Исследованный участок характеризуется высокой однородностью почвообразующих пород и относительно простым рельефом, осложнённым только западинами небольшой глубины, что позволило изолировать влияние растительности, особенностей микрорельефа и распределения влажности. В условиях более развитой эрозионной сети и большего литологического разнообразия взаимосвязи между факторами почвообразования могут быть существенно сложнее, а неопределенность прогноза – выше. Значимую роль может играть гранулометрический состав и другие свойства почвообразующих пород.

Ошибки прогноза $S_{орг}$ концентрируются в почвах экотонов, представленных преимущественно полугидроморфными почвами, где неопределённость достигает максимума. Усреднение оценок прогноза по участкам большой площади приводит к искажению фактических значений потерь и накопления углерода. Необходимо использовать данные о растительности и рельефе максимально доступного пространственного разрешения, взвешивать выборку с учетом ландшафтной неоднородности и

различий в пространственной вариабельности содержания почвенного органического вещества. Эффективным представляется разделение данных для обучения, валидации и тестирования с учетом пространственной кластеризации в данных. Полезным также является использование моделей, учитывающих пространственно-временную сопряженность данных.

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 слаботоразложившихся в условиях избыточного увлажнения 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, тогда как 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 трудноразлагаемых 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 $C_{\text{орг}}$ характерны для полугидроморфных лугово-чернозёмных почв, тогда как в гидроморфных западинах наблюдается более высокая доля труднорастворимых соединений, обеспечивающая долговременное депонирование. Секвестрационный потенциал определяется балансом между объёмом аккумуляции и устойчивостью накопленного углерода.

Вариабельность содержания органического углерода в полугидроморфных почвах статистически значимо превышает вариабельность в слабогидроморфных и гидроморфных позициях. При мониторинге содержания $C_{\text{орг}}$ 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.

Список Литературы

1. Ахтырцев А. Б. Гидроморфные почвы и переувлажненные земли лесостепи Русской равнины. – 1999.
2. Ахтырцев Б.П., Кадер Г.М. Органическое вещество осолоделых почв Окско-Донской низменности. – Агрохимия, 1967, № 6, с. 72–82.
3. Ахтырцев А.Б., Адерихин П.Г., Ахтырцев Б.П. Лугово-черноземные почвы центральных областей Русской равнины // Воронеж: Изд-во Воронежск. ун-та, 1981. 174 с.
4. Ахтырцев А.Б., Самойлова Е.М. Влияние гидроморфизма на распределение, накопление и состав гумуса в почвах лесостепи // Вестник МГУ. Сер. 17. Почвоведение. 1983а. №2. С. 3-11
5. Александрова Л.Н. Процессы гумусообразования в почве // Гумусовые вещества почвы. Зап. Ленинградск. СХИ, 1970. Т. 142. С. 7–23.
6. Александрова Л.Н. Органическое вещество почвы и процессы его трансформации. Л.: Наука, 1980. 288 с.
7. Бугаевский В.К. О структуре почвенного покрова колючей лесостепи. – Биол. науки, 1972, № 2, с. 124–128.
8. Вильямс В.Р. Почвоведение с основами земледелия. М.: Сельхозгиз, 1939. 205с.
9. Воробьева Л.А., Герасименко Н.М., Хитров Н.Б. Влияние переувлажнения на природу щелочности обыкновенных черноземов и лугово-черноземных почв Ростовской области // Почвоведение, 2002. №4. С.431-442,
10. Воробьева, Л. А., Ладонин, Д. В., Лопухина, О. В., Рудакова, Т. А., & Кирюшин, А. В. Химический анализ почв. Вопросы и ответы. М. 2011.– 186 с.
11. Гедройц К.К. Главнейшие особенности почвообразовательного процесса Днепровской низины. – В кн.: НКЗ, Носовск. с.-х. досл. ст., Від. агр., 1930, вып. 49, с. 3–11.
12. Градобоев Н.Д., Семендяева Н.В., Зубарева Р.Д. Минералогический состав илистых фракций солонцов Омской области. – В кн.: Науч. тр. Омск. с.-х. ин-та, 1970, т. 87, с. 19–30.
13. Григоренко И.Я., Раевская С.С. Некоторые основные агрономические свойства почв опытного поля Чемерской опытной станции. Чемерский опорный пункт, Агрохимическая лаборатория. Вып. № 1/5. Чернигов, 1930.
14. Денисова Н.В., Лебедева И.И. Эволюция почвенного покрова и формирование дифференцированных почв Тамбовской равнины // Структура почвенного покрова и использование почвенных ресурсов. М.: Наука, 1978. С. 155-164.

15. Дмитраков Л.М., Самойлова Е.М. Гумус луговых почв лесостепи. – Почвоведение, 1973, № 9, с. 56–63.
16. Дмитраков Л. М. Зависимость содержания и состава гумуса луговых почв лесостепи от условий их формирования //Почвоведение и агрохимия (проблемы и методы). – 1977. – С. 61-63.
17. Докучаев В. В. Русский чернозем. – Рипол Классик, 2013.
18. Докучаев В. В. Наши степи прежде и теперь. – Directmedia, 2013.
19. Дюшофур Ф. Основы почвоведения. М.: Прогресс, 1970. 592 с.
20. Зайдельман Ф. Р., Никифорова А. С., Степанцова Л. В. Эколого-гидрологические особенности выщелоченных черноземов и лугово-черноземных почв севера Тамбовской равнины //Почвоведение. – 2002. – №. 9. – С. 1102-1114.
21. Зайдельман Ф.Р. Деградация богарных и орошаемых черноземов под влиянием переувлажнения и их мелиорации. М.: ООО АПР, 2012.
22. Зайдельман Ф.Р., Степанцова Л.В., Никифорова А.С., Красин В.Н., Сафронов С.Б., Красина Т.В. Генезис и деградация черноземов Европейской России под влиянием переувлажнения. Способы защиты и мелиорации // Воронеж: Кварта, 2013. – 352 с., ил
23. Захаров С. А. Курс почвоведения (Издание 2) //Издательство: Госиздат. – 1927.
24. Иванова Е.Н. Классификация почв СССР. М., 1976.
25. Иванова Е. Н., Розов Н. Н. Опыт систематики почв степной зоны СССР //Почвоведение. – 1959. – №. 1. – С. 59-70.
26. Измаильский А. А. Как высохла наша степь. – Directmedia, 2013.
27. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
28. Королев В. А., Громовик А. И. К вопросу о расчете содержания гумуса в почвах разного типа //Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Химия. Биология. Фармация. – 2018. – №. 2. – С. 152-156.
29. Зайдельман Ф. Р., Давыдов А. И., Давыдова И. Ю. Генетические особенности и гидрофизические свойства почв степных и мочарных ландшафтов юга России //Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. – 1993. – №. 1. – С. 15-21.
30. Зайдельман Ф. Р. и др. Эколого-гидрологические и генетические особенности почв Тамбовской низменности //Почвоведение. – 2014. – №. 4. – С. 387-387.
31. Зайдельман Ф. Р. и др. Новообразования (ортштейны и псевдофибры) поверхностно-оглеенных супесчаных почв севера Тамбовской равнины //Почвоведение. – 2019. – №. 5. – С. 544-557.

32. Красина Т. В. Агрофизические свойства, гидрологический режим, продуктивность и диагностика черноземовидных оглеенных почв юга Тамбовской низменности: дис. на соискание степени канд. биол. наук. – М.: МГУ им. М. В. Ломоносова, 2014.
33. Когут Б. М., Семенов В. М. Оценка насыщенности почвы органическим углеродом // Бюллетень Почвенного института им. ВВ Докучаева. – 2020. – №. 102. – С. 103-124.
34. Мазиров, М. А., Шеин, Е. В., Корчагин, А. А., Шушкевич, Н. И., & Дембовецкий, А. В. (2012). Полевые исследования свойств почв: учебное пособие к полевой практике по направлению 021900-Почвоведение.
35. Мильков Ф. Н. Лесостепь Русской равнины: опыт ландшафтной характеристики. – АН СССР, 1950.
36. Неуструев С. С. Классификация почвообразовательных процессов // Изд-во Высших геогр. курсов. – 1916.
37. Новиков П. М. Террасовые почвы Среднего Заволжья, их генезис и эволюция (на примере Кутулукского массива орошения) // Тр. Почв. ин-та им. ВВ Докучаева. – 1952. – Т. 37.
38. Органическое вещество почв Российской Федерации. / Орлов Д. С., Бирюкова О. Н., Суханова Н. И. – Москва: Наука, 1996. – 256 с.
39. Орлов Д.С. Гумусовые кислоты почв. М., 1974.
40. Розов Н.И., Вадковская О.Л. Почвы // В кн.: Лесостепь и степь Русской равнины. М.: АН СССР. 1956. С. 107-124.
41. Романенков, В. А., Мешалкина, Ю. Л., Горбачева, А. Ю., Добровольская, В. А., & Кренке, А. Н. (2023). Прогноз динамики запасов углерода в почвах возделываемых земель Европейской России в контексте стратегии низкоуглеродного развития. Известия Российской академии наук. Серия географическая, 87(4), 584-596.
42. Пономарёва В.В., Плотникова Т.А. Гумус и почвообразование. – Л.: Наука, 1980
43. Савич В.И., Кауричев И.С., Латфулина Г.Г. Окислительно-восстановительные свойства почв // Почвоведение. 1980. - № 4. – С. 73-82.
44. Самойлова Е. М. Луговые почвы лесостепи // М.: Изд-во МГУ. – 1981.
45. Самойлова Е.М., Зубкова А.И., Черкашина Н.Ч. Гумус луговых почв Тамбовской низменности. – Тез. докл. IV делегатского Всесоюзного общ-ва почвоведов. Алма-Ата, 1970, с. 137.
Самойлова Е.М., В.И. Макеева черноземно-луговые почвы и их диагностика / Е.М. Самойлова, В.И. Макеева // почвоведение. – 1979. – № 12. – С. 16-21

- 46.Самойлова Е.М. Якушевская И.В. Характеристика комплекса луговых почв колючей лесостепи//Почвоведение, 1970. – №3.
- 47.Самойлова Е.М. Черноземно-луговые почвы лесостепи Русской равнины // Вестн. МГУ. Сер. почвоведение. 1978а. № 3. С. 3–11.
- 48.Семенов В. М., Когут Б. М. Почвенное органическое вещество. – 2015.
- 49.Семенов В.М., Лебедева Т.Н., Овсепян Л.А., Семенов М.В., Курганова И.Н. Пулы и фракции органического углерода в почве: структура, функции и методы определения // Почвы и окружающая среда. 2023. Т. № 1. С. 4-19. DOI: <https://doi.org/10.31251/pos.v6i1.199>.
- 50.Семенов В.М., Лебедева Т.Н., Зинякова Н.Б., Соколов Д.А. Размеры и соотношения пулов органического углерода в серой лесной почве при многолетнем применении минеральных и органических удобрений // Почвоведение. 2023. № 4. С. 482–501. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X22601426>.
- 51.Сибирцев Н. М. Об основаниях генетической классификации почв //Собр. соч. – 1895. – Т. 2.
- 52.Соколов Д. А. Окислительно-восстановительные процессы в почвах техногенных ландшафтов: дис. – Новосибирск, 2009, 2009.
- 53.Сорокина О. А. Оценка пространственного варьирования показателей плодородия серых почв лесостепной зоны Красноярского края //Наука и образование: опыт, проблемы, перспективы развития. – 2016. – С. 172-175.
- 54.Степанцова Л. В. Агрофизические свойства, гидрологический режим и диагностика черноземовидных почв севера Тамбовской низменности: дис. – Московский государственный университет им. МВ Ломоносова (МГУ). Факультет почвоведения, 2012.
- 55.Степанцова Л. В., Красин В. Н., Никифорова А. С. Некоторые аспекты проблемы переувлажнения черноземов севера Тамбовской области. – 2006.
- 56.Степанцова Л. В., Красин В. Н. Количественный показатель глубины залегания грунтовых вод в черноземовидных почвах севера Тамбовской равнины //Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. – 2011. – №. 2-1. – С. 108-111.
- 57.Степанцова Л. В., Красин В. Н., Гаврилов А. О. Влияние залежного состояния на физико-химические свойства и структуру чернозема выщелоченного севера Тамбовской области //Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК–продукты здорового питания. – 2014. – №. 4. – С. 7-13.
- 58.Степанцова Л. В., Красин В. Н., Красина Т. В. Деградация органического вещества черноземных почв севера Тамбовской области под влиянием переувлажнения //Технологии пищевой и перерабатывающей

- промышленности АПК–продукты здорового питания. – 2015. – №. 2 (6). – С. 7-14.
59. Столбовой В. С., Филь П. П. Оценка содержания углерода в сельскохозяйственных почвах Европейской территории России для климатических проектов // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2023. – Т. 87. – №. 4. – С. 568–583.
60. Тиходеева М., Лебедева В. Практическая геоботаника. Анализ состава растительных сообществ. – Litres, 2022.
61. Титлянова А. А., Вишнякова Е. К. Изменение продуктивности болотных и травяных экосистем по широтному градиенту // Почвы и окружающая среда. – 2022. – Т. 5. – №. 2. – С. 32-50.
62. Тумин Г.М. Почвы Тамбовской губернии. Тамбов, 1915. Ч. I. 102 с.
63. Тюрин И. В. К методике анализа для сравнительного изучения состава почвенного гумуса // Труды Почвенного института АН СССР. – 1951. – Т. 38. – С. 5.
64. Филь П.П. Влияние западных урочищ на гидрологическое функционирование лесостепных ландшафтов Окско-Донской низменности. Диссертация на соискание ученой степени кандидата географических наук. Москва, МГУ им. МВ Ломоносова – 2025.
65. Химия почв. / Орлов Д. С., Садовникова Л.К., Суханова Н.И. – М: Высш. шк., 2005. – 558 с.
66. Холодов В. А. и др. Органическое вещество и минеральная матрица почв: современные подходы, определения терминов и методы изучения (обзор) // Бюллетень Почвенного института имени ВВ Докучаева. – 2023. – №. 117. – С. 52-100.
67. Чендев Ю. Г. Реакция серых лесных почв на земледельческое освоение в разных климатических условиях // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2015. – №. 2. – С. 59-67.
68. Шишов Л. Л., Тонконогов В. Д., Лебедева И. И., Герасимова М. И. Классификация и диагностика почв России. – Смоленск: Ойкумена, 2004. – 342 с.
69. Ярилова Е.А., Гришина Л.А., Сребнова Л.В. Микроморфология органического вещества почв сопряжённых ландшафтов Тамбовской низменности. – Биол. науки, 1975, № 3, с. 97–104.
70. Bansal S., Tangen B., Finocchiaro R. Land management strategies influence soil organic carbon stocks of prairie potholes of North America // Wetland Carbon and Environmental Management. – 2021. – С. 273–285.
71. Bedard-Haughn A. Managing excess water in Canadian prairie soils: A review // Canadian Journal of Soil Science. – 2009. – Т. 89. – №. 2. – С. 157-168.

72. Bobrenko, I. A., Matveychik, O. A., Bobrenko, E. G., & Popova, V. I. (2021). Changes in humus content in forest-steppe soils of Western Siberia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 624(1), 012219. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/624/1/012219>
73. Bradski G., Kaehler A. *Learning OpenCV: Computer vision with the OpenCV library*. – " O'Reilly Media, Inc.", 2008.
74. Brown, R., Zhang, Z., Comeau, L.-P., and Bedard-Haughn, A. (2017). Effects of drainage duration on mineral wetland soils in a Prairie Pothole agroecosystem. *Soil Tillage Res.* 168, 187–197. doi:10.1016/j.still.2016.12.015
75. Bruggisser, M., Wang, Z., Ginzler, C., Webster, C., & Waser, L. T. (2024). Characterization of forest edge structure from airborne laser scanning data. *Ecological Indicators*, 159, 111624.
76. Chendev Y. G., Sauer T. J., Gennadiev A. N., Novykh L. L., Petin A. N., Zazdravnykh E. A., Burras C. L. Accumulation of organic carbon in chernozems (Mollisols) under shelterbelts in Russia and the United States // *Eurasian Soil Science*. – 2015. – T. 48. – № 1. – C. 43–53.
77. Chizen C. J., Bedard-Haughn A. K. Drivers of soil carbon variability in North America's prairie pothole wetlands: A review // *Wetlands*. – 2025. – T. 45. – №. 1. – C. 18.
78. Chizen C. J., Bedard-Haughn A. K., Pennock D. J. Soil carbon dynamics in drained prairie pothole wetlands // *Frontiers in Environmental Science*. – 2024. – T. 12. – C. 1353802.
79. Cline, A. V., & Laroque, C. P. (2025). Below-ground carbon gradients surrounding Saskatchewan's native agricultural copses. *Science of The Total Environment*, 979, 179525. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179525>
80. Cortus B. G., Jeffrey S. R., Unterschultz J. R., Boxall P. C. The economics of wetland drainage and retention in Saskatchewan // *Canadian Journal of Agricultural Economics*. – 2011. – T. 59. – № 1. – C. 109–126.
81. Doetterl S., Berhe A. A., Arnold C., Bodé S., Fiener P., Finke P., Six J. A landscape-scale view of soil organic matter dynamics // *Nature Reviews Earth & Environment*. – 2025. – C. 1–15.
82. Don A., Sommer M., Schlichting A., Ehlers K., Leinemann T., Flessa H. Carbon sequestration in soils and climate change mitigation – definitions and pitfalls // *Global Change Biology*. – 2024. – T. 30. – № 1. – C. e16983.
83. Dong Z., Jiang Q., Shao Y., Wang Y., Chen Z., Li Y., Zhang X. Prediction of soil organic carbon content in complex vegetation areas based on CNN-LSTM model // *Land*. – 2024. – T. 13. – № 7. – C. 915.
84. Dormann C. F., Elith J., Bacher S., Buchmann C., Carl G., Carré G., Lautenbach S. Collinearity: a review of methods to deal with it and a

- simulation study evaluating their performance // *Ecography*. – 2013. – T. 36. – C. 27–46.
85. Dvorakova, K., Heiden, U., Pepers, K., Staats, G., van Os, G., & van Wesemael, B. (2023). Improving soil organic carbon predictions from a Sentinel-2 soil composite by assessing surface conditions and uncertainties. *Geoderma*, 429, 116128.
86. Erdős L., Tölgyesi C., Cserhalmi D., Tolnay D., Conradi T., Bátori Z., Valkó O. Habitat complexity of the Pannonian forest-steppe zone and its nature conservation implications // *Ecological Complexity*. – 2014. – T. 17. – C. 107–118.
87. Erdős L., Tölgyesi C., Horzse B., Tolnay D., Türei D., Kis-Tóth K., Bátori Z. The influence of forest/grassland proportion on the species composition, diversity and natural values of an eastern Austrian forest-steppe // *Russian Journal of Ecology*. – 2017. – T. 48. – C. 350–357.
88. Euliss N. H. Jr., Gleason R. A., Olness A., McDougal R. L., Murkin H. R., Robarts R. D., Rosenberry D. O. North American prairie wetlands are important nonforested land-based carbon storage sites // *Science of the Total Environment*. – 2006. – T. 361. – № 1–3. – C. 179–188.
89. Salem B. B. *Arid Zone Forestry: A Guide for Field Technicians* (Fao Conservation Guide, 20). – 1989.
90. Fil P. P., Smirnova M. A., Lozbenev N. I., Dobrohotov A. V. Estimation of infiltration volumes and rates in seasonally water-filled topographic depressions based on remote-sensing time series // *Sensors*. – 2021. – T. 21. – № 21. – C. 7403.
91. Finke P. *Philosophy Behind SoilGen // Modelling Soil Development Under Global Change*. – Cham: Springer Nature Switzerland, 2024. – C. 19-23.
92. Georgiou K., Abramoff R. Z., Harte J., Riley W. J., Torn M. S. Soil carbon saturation: what do we really know? // *Global Change Biology*. – 2025. – T. 31. – № 5. – C. e70197.
93. Gilbert B., Bennett J. R. Partitioning variation in ecological communities: do the numbers add up? // *Journal of applied ecology*. – 2010. – T. 47. – №. 5. – C. 1071-1082.
94. Gleason R. A., Euliss N. H. Jr., Tangen B. A., Laubhan M. K., Browne B. A. *Ecosystem services derived from wetland conservation practices in the United States Prairie Pothole Region with an emphasis on the US Department of Agriculture Conservation Reserve and Wetlands Reserve Programs*. – Reston: US Geological Survey, 2008.
95. Hayashi, M., van der Kamp, G., & Rosenberry, D. O. (2016). Hydrology of Prairie Wetlands: Understanding the Integrated Surface-Water and Groundwater Processes. *Wetlands*, 36(S2), 237–254. <https://doi.org/10.1007/s13157-016-0797-9>.

96. Herman J., Usher W. SALib: An open-source Python library for sensitivity analysis // *Journal of Open Source Software*. 2017. V. 2. № 9. P. 97.
97. Huang W., Hall S. J., Bhattacharjee L., Roden E. Controls on organic and inorganic soil carbon in poorly drained agricultural soils with subsurface drainage // *Biogeochemistry*. – 2023. – T. 163. – № 2. – C. 121–137.
98. IPCC. (2021). Annex VII: Glossary. In J. B. R. Matthews, V. Möller, R. Diemen, J. S. Fuglestvedt, V. Masson-Delmotte, C. Méndez, S. Semenov, & A. Reisinger (Eds.), *In climate change 2021: The physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change* (pp. 2215–2256). Cambridge University Press.
99. Jilling A., Kane D., Williams A., Grandy A. S. Wet-dry cycling influences the formation of mineral-associated organic matter and its sensitivity to simulated root exudates // *Geoderma*. – 2024. – T. 445. – C. 116869.
100. Kakhani N., Alamdar S., Kebonye N. M., Amani M., Scholten T. Towards explainable AI: interpreting soil organic carbon prediction models using a learning-based explanation method // *European Journal of Soil Science*. – 2025. – T. 76. – № 2. – C. e70071.
101. Korschuh H. Assessing microbial community dynamics and carbon mineralization with depth across an eroded agricultural landscape at St. Denis National Wildlife Area. – 2013.
102. Lal R. Managing soils and ecosystems for mitigating anthropogenic carbon emissions and advancing global food security // *Bioscience*. – 2010. – T. 60. – № 9. – C. 708-721.
103. Lal R. Managing chernozem for reducing global warming // *Regenerative Agriculture: What's Missing? What Do We Still Need to Know?*. – Cham : Springer International Publishing, 2021. – C. 81-93.
104. Lavalley J. M., Soong J. L., Cotrufo M. F. Selective preservation of pyrogenic carbon across soil organic matter fractions and its influence on calculations of carbon mean residence times // *Geoderma*. – 2019. – T. 354. – C. 113866.
105. Lee S. J., Seo D. K., Kim Y. S. Estimation of high-resolution soil moisture in Canadian croplands using deep neural network with Sentinel-1 and Sentinel-2 images // *Remote Sensing*. – 2023. – T. 15. – № 16. – C. 4063.
106. Ling J., Zhao Y., Li Z., Chen Y., Sun W., Li W., Zhang W. Soil organic carbon thresholds control fertilizer effects on carbon accrual in croplands worldwide // *Nature Communications*. – 2025. – T. 16. – № 1. – C. 3009.
107. Mahoney, M. J., Johnson, L. K., Silge, J., Frick, H., Kuhn, M., & Beier, C. M. (2023). Assessing the performance of spatial cross-validation approaches for models of spatially structured data. arXiv Preprint. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2303.07334>

108. Marcílio W. E., Eler D. M. From explanations to feature selection: assessing SHAP values as feature selection mechanism //2020 33rd SIBGRAPI conference on Graphics, Patterns and Images (SIBGRAPI). – Ieee, 2020. – C. 340-347.
109. McBratney A. B., Santos M. L. M., Minasny B. On digital soil mapping //Geoderma. – 2003. – T. 117. – №. 1-2. – C. 3-52.
110. Millett B., Johnson W. C., Guntenspergen G. Climate trends of the North American prairie pothole region 1906–2000 //Climatic Change. – 2009. – T. 93. – №. 1. – C. 243-267.
111. Minasny B., McBratney A. B. Machine Learning and Artificial Intelligence Applications in Soil Science //European Journal of Soil Science. – 2025. – T. 76. – №. 2. – C. e70093.
112. Mitchell A. D. Buried Surface Horizons in Saskatchewan Croplands Provide Insight into Microbial Soil Carbon Cycling and Development of Persistent Organic Matter : дис. – 2024.
113. Padarian J., Minasny B., McBratney A. B. Using deep learning for digital soil mapping //Soil. – 2019. – T. 5. – №. 1. – C. 79-89.
114. Padarian J., Minasny B., McBratney A. B. Soil carbon sequestration potential in global croplands // PeerJ. – 2022. – T. 10. – C. e13740.
115. Pennock D., Bedard-Haughn A., Viaud V. Chernozemic soils of Canada: genesis, distribution, and classification //Canadian Journal of Soil Science. – 2011. – T. 91. – №. 5. – C. 719-747.
116. Petrovskaja A., Ryzhakov G., Oseledets I. Optimal soil sampling design based on the maxvol algorithm //Geoderma. – 2021. – T. 402. – C. 115362.
117. Phillips, R.L., Eken, M.R. & West, M.S. Soil Organic Carbon Beneath Croplands and Re-established Grasslands in the North Dakota Prairie Pothole Region. Environmental Management 55, 1191–1199 (2015). <https://doi.org/10.1007/s00267-015-0459-3>
118. Prikhodko, V.E., Cheverdin, Y.I. & Titova, T.V. Changes in the organic matter forms in chernozems of the Kamennaya Steppe under different land uses, locations, and hydromorphism degrees. Eurasian Soil Sc. 46, 1230–1240 (2013). <https://doi.org/10.1134/S1064229313120065>
119. Prikhodko, V.E., Manakhov, D.V. Transformation of the organic matter of steppe soils of the Trans-Ural region after their conversion into the reserved regime. Eurasian Soil Sc. 47, 236–244 (2014). <https://doi.org/10.1134/S1064229314020082>
120. Rowley M. C., Grand S., Verrecchia É. P. Calcium-mediated stabilisation of soil organic carbon //Biogeochemistry. – 2018. – T. 137. – №. 1. – C. 27-49.

121. Sanderman J., Hengl T., Fiske G. J. Soil carbon debt of 12,000 years of human land use //Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2017. – T. 114. – №. 36. – C. 9575-9580.
122. Shabtai I. A., Wilhelm R. C., Schweizer S. A., Hettinga K. A., Herrmann A. M., Whitman T., Lehmann J. Calcium promotes persistent soil organic matter by altering microbial transformation of plant litter // Nature Communications. – 2023. – T. 14. – № 1. – C. 6609.
123. Shamrikova E. V. et al. Methods for measuring organic carbon content in carbonate-containing soils: a review //Eurasian Soil Science. – 2024. – T. 57. – №. 3. – C. 380-394.
124. Sobol' I.M. Sensitivity estimates for nonlinear mathematical models // Mathematical Modelling and Computational Experiments. 1993. V. 1. № 4. P. 407–414.
125. Stewart R. E., Kantrud H. A. Classification of natural ponds and lakes in the glaciated prairie region. – US Bureau of Sport Fisheries and Wildlife, 1971. – T. 92.
126. Stolbovoi V. Carbon in agricultural soils of Russia //Proceedings of the OECD expert meeting on soil organic carbon indicators for agricultural land, Ottawa, Canada. – 2002. – C. 15-18.
127. Suleymanov A. et al. Field-scale digital mapping of top-and subsoil Chernozem properties //Precision Agriculture. – 2024. – T. 25. – №. 3. – C. 1636-1657.
128. Tangen, B. A., Finocchiaro, R. G., and Gleason, R. A. (2015). Effects of land use on greenhouse gas fluxes and soil properties of wetland catchments in the Prairie Pothole Region of North America. *Sci. Total Environ.* 533, 391–409. doi:10.1016/j.scitotenv.2015.06.148
129. Tangen, B. A., and Bansal, S. (2019). *Soil properties and greenhouse gas fluxes of Prairie Pothole Region wetlands: a comprehensive data release.* doi:10.5066/F7KS6QG2
130. Tangen, B. A., & Bansal, S. (2020). Soil organic carbon stocks and sequestration rates of inland, freshwater wetlands: Sources of variability and uncertainty. *Science of The Total Environment*, 749, 141444. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141444>
131. Tian, F., Cai, Z., Jin, H., Hufkens, K., Scheifinger, H., Tagesson, T., ... Eklundh, L. (2021). Calibrating vegetation phenology from Sentinel-2 using eddy covariance, PhenoCam, and PEP725 networks across Europe. *Remote Sensing of Environment*, 260, 112456. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112456>
132. Timofeeva M. V., Yudina A. V. Permanganate Oxidizable Carbon in Humus Horizons of Soils in the European Russia //Eurasian Soil Science. – 2025. – T. 58. – №. 4. – C. 53.

133. Qiu, Z., Shi, Y., Yang, F., Li, J., Long, H., & Zhang, G. (2025). Steppe or forest? Multiple methods reveal organic matter sources of Chernozems and Phaeozems region in Northeast China. *Catena*, 252, 108837. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2025.108837>
134. USDA, 2017. Soil survey manual. In: Soil Survey Division Staff; Soil Conservation Service
135. Volume Handbook 18. U.S. Department of Agriculture (chapter 3)
136. Walkley A., Black I. A. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method //Soil science. – 1934. – T. 37. – №. 1. – C. 29-38.
137. Xu, X., Pei, J., Xu, Y., & Wang, J. (2020). Soil organic carbon depletion in global Mollisols regions and restoration by management practices: A review. *Journal of Soils and Sediments*, 20, 1173-1181.
138. Zaidelman F. R. et al. Neoformations (nodules and placic layers) in surface-gleyed loamy sandy soils of the northern part of the Tambov Plain //Eurasian Soil Science. – 2019. – T. 52. – №. 5. – C. 494-506.
139. Zeng L. et al. A review of vegetation phenological metrics extraction using time-series, multispectral satellite data // Remote Sensing of Environment. 2020. V. 237. 111511.
140. Zhao Q. et al. The effects of drainage on the soil fungal Community in Freshwater Wetlands //Frontiers in Ecology and Evolution. – 2022. – T. 10. – C. 837747.
141. Zhang Z. et al. Nutrient dynamics within drainage ditches under recent, medium, and long-term drainage in the Black soil zone of southeastern Saskatchewan //Geoderma. – 2017. – T. 289. – C. 66-71.
142. Zhang, L., Cai, Y., Huang, H., Li, A., Yang, L., & Zhou, C. (2022). A CNN-LSTM model for soil organic carbon content prediction with long time series of MODIS-based phenological variables. *Remote Sensing*, 14(18), 4441. <https://doi.org/10.3390/rs14184441>
143. Zhu, M., Feng, Q., Qin, Y., Cao, J., Zhang, M., Liu, W., & Li, B. (2019). The role of topography in shaping the spatial patterns of soil organic carbon. *Catena*, 176, 296–305. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.01.029>
144. Zimmermann M., Leifeld J., Schmidt M.W.I., Smith P., Fuhrer J. Measured soil organic matter fractions can be related to pools in the RothC model // European Journal of Soil Science. 2007. V. 58. P. 658–667.
145. Zou, X., Zhang, Z., Zhou, Z., Qiu, Q., & Luo, J. (2022). Landscape-scale spatial variability of soil organic carbon content in a temperate grassland: Insights into the role of wind erosion. *Catena*, 207, 105635. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105635>

Обозначения и сокращения.

BI2 – индекс яркости (Brightness Index 2)

БПЛА – беспилотный летательный аппарат

CBC – CatBoost (градиентный бустинг с категориальными признаками)

CNN – свёрточная нейронная сеть (Convolutional Neural Network)

CV – коэффициент вариации (Coefficient of Variation)

EOS (EOSD) – дата окончания вегетационного сезона (End of Season Date)

ERA5 – реанализ Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды

EVI2 – двухполосный улучшенный вегетационный индекс (Enhanced Vegetation Index 2)

FAO – Продовольственная и сельскохозяйственная организация ООН

GDOWN (Greendown) – скорость осеннего спада (угловой коэффициент нисходящего участка фенологической кривой)

GUP (Greenup) – скорость весеннего нарастания (угловой коэффициент восходящего участка фенологической кривой)

IPCC – Межправительственная группа экспертов по изменению климата

LiDAR – Light Detection and Ranging (лазерное сканирование)

LR – линейная регрессия (Linear Regression)

LSTM – сеть с долгой краткосрочной памятью (Long Short-Term Memory)

MAOM – минерал-ассоциированное органическое вещество (mineral-associated organic matter)

MLP – многослойный перцептрон (Multilayer Perceptron)

MSAVI – модифицированный почвенно-скорректированный вегетационный индекс (Modified Soil Adjusted Vegetation Index)

NDVI – нормализованный разностный вегетационный индекс (Normalized Difference Vegetation Index)

NDVI_{re1}, NDVI_{re3} – вегетационные индексы на основе красного края спектра (Red Edge NDVI)

NDWI – нормализованный разностный индекс влажности (Normalized

Difference Water Index)

NPP – чистая первичная продукция (Net Primary Productivity)

PIR – диапазон интервала предсказания (Prediction Interval Range)

PLSR – регрессия на частичных наименьших квадратах (Partial Least Squares Regression)

POM – частично разложившееся органическое вещество (particulate organic matter)

PPI – индекс фенологии растительности (Plant Phenology Index)

PPR – регион прерийных подходов (Prairie Pothole Region)

RF – случайный лес (Random Forest)

RgI – индекс шероховатости (Roughness Index)

RMSE – корень средней квадратичной ошибки (Root Mean Square Error)

RothC – модель оборота углерода в почве (Rothamsted Carbon Model)

RPIQ – отношение межквартильного размаха к RMSE (Ratio of Performance to Interquartile Range)

R^2 – коэффициент детерминации

Season Len – продолжительность вегетационного сезона (разность EOS и SOS)

SHAP – значения Шепли для интерпретации моделей (SHapley Additive exPlanations)

SoilGen – процессно-ориентированная имитационная модель почвообразования (Finke, 2024)

SOS (SOSD) – дата начала вегетационного сезона (Start of Season Date)

SPI – индекс потока (Stream Power Index)

SVR – метод опорных векторов для регрессии (Support Vector Regression)

TP – совокупная продуктивность (интеграл значений вегетационного индекса за сезон, Time-integrated Productivity)

TPI – индекс положения в рельефе (Topographic Position Index)

TRI – индекс пересечённости рельефа (Terrain Ruggedness Index)

TSDM – накопленный дефицит влаги в верхнем горизонте (Topsoil Soil

Moisture Deficit)

TWI – топографический индекс влажности (Topographic Wetness Index)

VRM – вектор шероховатости рельефа (Vector Ruggedness Measure)

WRB – World Reference Base for Soil Resources (Мировая реферативная база почвенных ресурсов)

ВЗ – влажность завядания

ВРК – влажность разрыва капилляров

ГК – гуминовые кислоты

ГК-I, ГК-II, ГК-III – первая, вторая и третья фракции гуминовых кислот (по Тюрину – Пономарёвой)

ГТК – гидротермический коэффициент Селянинова

ЕТР – Европейская территория России

ЖМК – железо-марганцевые конкреции

МГ – максимальная гигроскопичность

МГК – метод главных компонент

НВ – наименьшая влагоёмкость

ОЗПМ – ожелезнённые зоны по порам и макропорам

ПВ – полная влагоёмкость

ПОВ – почвенное органическое вещество

Сгк:Сфк – отношение углерода гуминовых кислот к углероду фульвокислот

Сорг – органический углерод

СПП – структура почвенного покрова

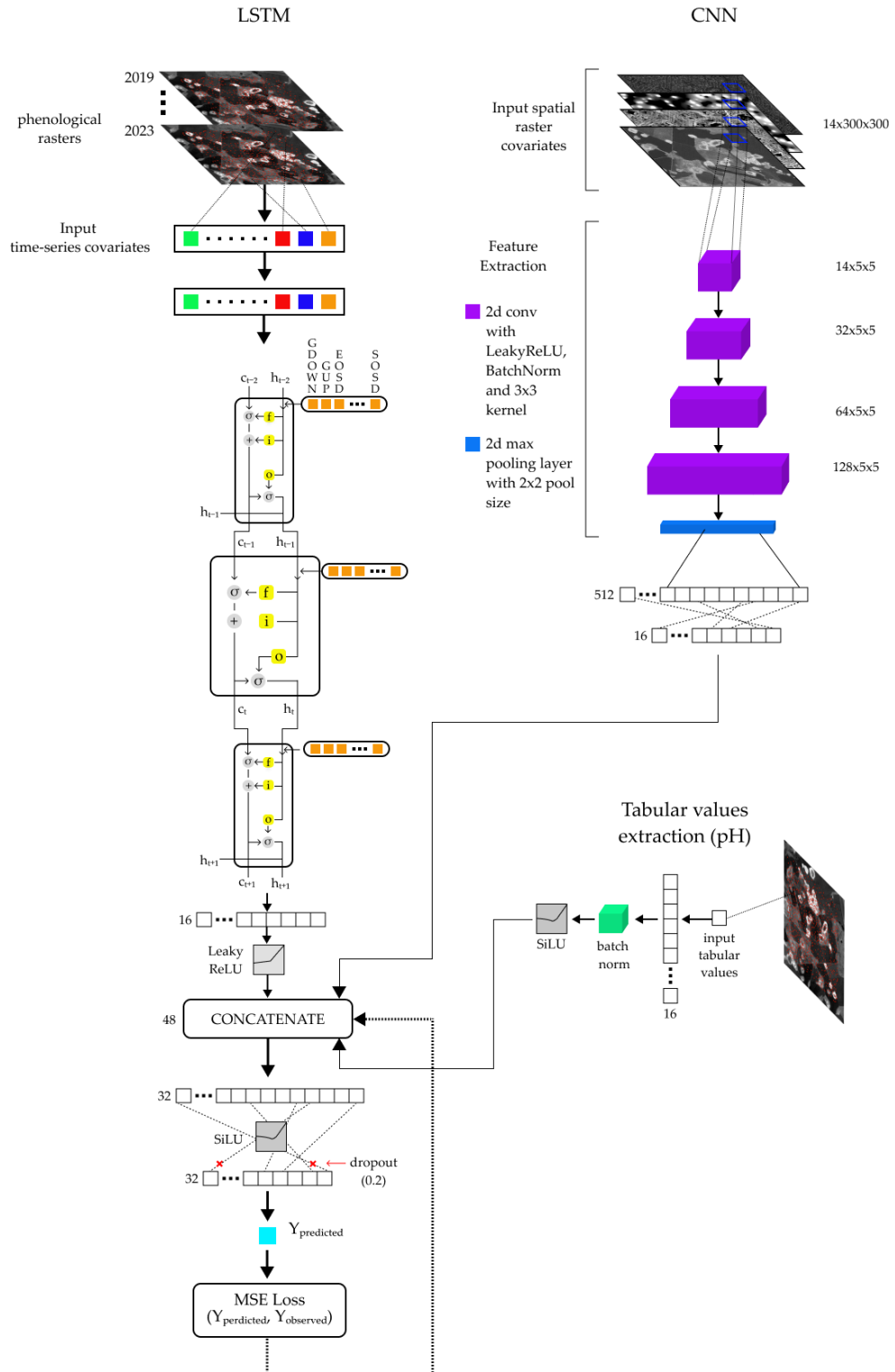
УГВ – уровень грунтовых вод

ФК – фульвокислоты

ЦМР – цифровая модель рельефа

Приложение 1.

Архитектура нейронной сети, использованной для пространственного прогноза (оригинал взят из Bardashov et al., 2026, препринт)



Приложение 2.

Разрез С2. Чернозём квазиглеевый

Залежь, выположенная поверхность. AU (0–20) – AUlc (20–53) – AUbca (53–69) – BSAauq (69–86) – BSAQ (86–105) – Q (115–170+)

Горизонт, глубина (см)	Цвет, окраска	Структура, плотность, влажность	Гран. состав	Включения и новообразования	HCl; переход
AOv 0–15	Однородный, тёмно-серый, почти чёрный (10YR 3/1)	Мелкокомковатая к зернистой, хорошо выражена; рыхлый; влажный–сырой	Тс-глина	Обильно пронизан корнями, дернина. Новообр.: нет	–; ясный по плотности, ровная
AO 15–32	Неоднородный; тёмно-серый (10YR 4/1), светлеет книзу (10YR 5/1), осветлённые пятна (10YR 7/2)	Средне-мелкокомковато-ореховатый, хорошо выражена; уплотнённый; влажный–сырой	Тс-глина	Корни, растительные остатки. Новообр.: осветлённые зоны с отмытыми зёрнами кварца	–; ясный по цвету, ровная
Ghi 32–36	Неоднородный: пятна сероватосизого (10YR 7/1), тёмно-серого (10YR 3/1), серого с буроватым (10YR 4/2)	Массивный, плохо оструктурен; очень плотный; сухой	Глина	Мелкие угли. Новообр.: редкие Fe-Mn конкреции и примазки, гумусовая пропитка	–; ясный по цвету, ровная
Gel 36–42	Неоднородный; сизый с сероватым (10YR 8/1), редкие жёлто-охристые области (10YR 6/6)	Слабо выражена, массивный; плотный; сухой	Глина	Редкие угольки. Новообр.: охристые зоны, мелкие Fe-Mn конкреции	–; ясный по цвету, слабоволнистая
G 42–50+	Неоднородный; охристо-бурый (10YR 5/6), сизые пятна и полосы (Gley2 8/10BG)	Слабо выражена, массивный; плотный; сухой	Глина	Новообр.: охристые зоны, Fe-Mn конкреции; сизые зоны, кутаны по граням агрегатов	–

Разрез С2. Чернозём квазиглеевый

Залежь, выположенная поверхность. AU (0–20) – AUlc (20–53) – AUbca (53–69) – BSAauq (69–86) – BSAQ (86–105) – Q (115–170+)

Горизонт, глубина (см)	Цвет, окраска	Структура, плотность, влажность	Гран. состав	Включения и новообразования	HCl; переход
AU 0–20	Однородный, тёмно-серый, почти чёрный (10YR 2/1)	Зернистый, мелкокомковатый, хорошо выражена; рыхлый; увлажнённый–влажный	Глина	Обильно пронизан корнями, дернина. Новообр.: нет	Нет; ясный по вскипанию, ровная
AUlc 20–53	Однородный, чуть светлее	Зернистая, мелкокомковато-ореховатая, хорошо	Глина	Обильно пронизан корнями. Новообр.: нет (в т.ч. карбонатов)	+; ясный по цвету и

	вышележащего (10YR 3/1)	выражена; рыхлый; влажный–сырой			вскипанию, ровная
AUбса 53–69(72)	Неоднородный, буровато-тёмно-серый (10YR 3/2), пятна-кратовины палевого цвета (10YR 6/3–6/4)	Мелко- и среднеореховатый, хорошо выражена; уплотнённый; увлажнённый	Глина	Кратовины с материалом нижележащего горизонта. Новообр.: карбонатов нет	+; ясный по цвету, слабоволнистая
BCAауq 69(72)–82(86)	Неоднородный; палевый (10YR 6/4), светло-серые полосы (10YR 6/2), охристые зоны (10YR 5/6). Самый светлый в профиле	Средне-крупноореховатый, хорошо выражена; плотный; увлажнённый	Глина	Кратовины (10YR 3/1). Новообр.: Fe-Mn примазки и конкреции, охристые зоны	+; ясный по цвету, слабоволнистая
BCAQ 82(86)–105	Неоднородный, буровато-палевый (10YR 6/4), сизо-серые (10YR 7/1) и охристые зоны (10YR 6/6)	Ореховато-призматическая, хорошо выражена; плотный; свежий	Глина	Кратовины. Новообр.: Fe-Mn конкреции, охристые и сизые зоны, сизый налёт по граням педов	+; постепенный по ухудшению структуры
Q 115–170+	Неоднородный, буровато-палевый с оливковым (10YR 6/3), охристые и серо-сизые полосы	Ореховато-призматическая, средней выраженности; плотный; свежий	–	Кратовины. Новообр.: Fe-Mn конкреции, сизые зоны, сизый налёт по граням педов	Нет

Разрез С3. Агросолюнец тёмногумусовый квазиглеевый

Склон западины, пашня. PU (0–9) – ASN (9–40) – ASNбса (40–65) – BCAq (65–134) – Q (134–160+)

Горизонт, глубина (см)	Цвет, окраска	Структура, плотность, влажность	Гран. состав	Включения и новообразования	HCl; переход
PU 0–9	Тёмно-серый (10YR 4/2)	Бесструктурный; уплотнённый; мокрый	Тс с песком	Обильное кол-во корней. Новообр.: нет	Нет; ясный по плотности, ровная
ASN 9–40	Тёмно-серый с буроватым (10YR 3/2), темнее вышележащего	Ореховато-призматический; очень плотный; увлажнённый	Глина	Нет. Новообр.: нет	Основная масса – нет; «полоса» вскипает; ясный по цвету, слабоволнистая
ASNбса 40–65	Неоднородный: тёмно-серый (10YR 4/2), охристо-сизые зоны (10YR 6/6), белёсая полоса с карбонатами (10YR 8/2)	Ореховатая с глыбистостью, хорошо выражена; очень плотный; свежий	Глина	Белёсая полоса с карбонатами. Новообр.: мелкая белоглазка, пятна карбонатов, кутаны по граням педов	+; ясный по цвету, ровная

BCAq 65–134	Неоднородный, палево-бурый с серым (10YR 5/3), тёмные полосы – кутаны (10YR 3/1)	Ореховато-призматическая, хорошо выражена; плотный; свежий	Глина	Единичная кротовина. Новообр.: белоглазка, журавчики, толстые кутаны; сизые потёки, охристые зоны, Fe-Mn конкреции	+; постепенный по уменьшению кутан
Q 134–160+	Неоднородный, палево-бурый с серым (10YR 5/3), кутаны (10YR 3/1)	Крупно-ореховато-призматическая, средняя выраженность; плотный; свежий	Глина	Нет. Новообр.: белоглазка, журавчики (менее плотные), кутаны (меньше); сизые потёки, Fe-Mn конкреции	+

Разрез С4. Агрочернозём квазиглеевый

Пашня, межзападинное пространство. PU (0–28) – AU (28–40) – AU_{бса} (40–70) – BCA_{аи} (70–100) – BCA_q (100–140) – Q (140–160+)

Горизонт, глубина (см)	Цвет, окраска	Структура, плотность, влажность	Гран. состав	Включения и новообразования	HCl; переход
PU 0–28	Тёмно-серый, почти чёрный (10YR 3/1)	Мелкокомковатый с зернистостью, хорошо выражена; рыхлый–уплотнённый; увлажнённый–влажный	Глина	Редкие корни. Новообр.: нет	Нет; ясный по плотности
AU 28–40	Тёмно-серый, темнее вышележащего (10YR 2/1)	Мелкокомковато-ореховатая с зернистостью, хорошо выражена; уплотнённый; увлажнённый	Глина	Редкие корни. Новообр.: нет	Нет; ясный по вскипанию, ровная
AU _{бса} 40–70(80)	Чуть светлее вышележащего (10YR 3/2)	Мелкокомковато-ореховатая с зернистостью, хорошо выражена; плотный; увлажнённый	Глина	Нет. Новообр.: диффузные пятна карбонатов, мелкая белоглазка	+; ясный по цвету, слабоволнистая
BCA _{аи} 70(80)–100	Неоднородный, палево-бурый с серым (10YR 3/3), светлые пятна кротовин (10YR 5/2)	Ореховатый; плотный; увлажнённый	Глина	Кротовины с окарбоначенным материалом. Новообр.: журавчики, белоглазка, тёмные кутаны по граням педов	+
BCA _q 100–140	Неоднородный, палево-бурый с серым (10YR 4/3), светлые пятна (10YR 5/2)	Ореховато-призматическая, хорошо выражена; плотный; свежий	Глина	Единичная кротовина. Новообр.: белоглазка, журавчики, кутаны; сизые потёки, охристые зоны, Fe-Mn конкреции	+; постепенный
Q 140–160+	Палево-бурый с сероватым (10YR 5/4)	Не определена (буровая колонка); плотный; свежий	Глина	Нет. Новообр.: белоглазка, журавчики, сизые потёки, охристые	+

				зоны, Fe-Mn конкреции	
--	--	--	--	--------------------------	--

Разрез С5. Агрочернозём квазиглеевый

Пашня, межзападинное пространство. PU (0–25) – AU (25–60) – AU_{bca} (60–70) – BSA_{au} (70–90) – BSA_q (90–120) – Q (120–150+)

Горизонт, глубина (см)	Цвет, окраска	Структура, плотность, влажность	Гран. состав	Включения и новообразования	HCl; переход
PU 0–25	Тёмно-серый, почти чёрный (10YR 3/1)	Мелкокомковатый с зернистостью, хорошо выражена; рыхлый– уплотнённый; увлажнённый–влажный	Глина	Редкие корни. Новообр.: нет	Нет; ясный по плотности
AU 25–60	Тёмно-серый, почти чёрный (10YR 3/1)	Мелкокомковато- ореховатая с зернистостью, хорошо выражена; уплотнённый; увлажнённый	Глина	Редкие корни. Новообр.: нет	Нет; ясный по вскипанию, ровная
AU _{bca} 60–70	Светлее вышележащего (10YR 3/2)	Мелкокомковато- ореховатая с зернистостью, хорошо выражена; плотный; увлажнённый	Глина	Нет. Новообр.: диффузные пятна карбонатов	+; ясный по цвету, слабоволнистая
BSA _{au} 70–90	Неоднородный, палево-бурый с серым (10YR 3/3), светлые пятна кратовин (10YR 5/2)	Ореховатый; плотный; увлажнённый	Глина	Кратовины с окарбонченным материалом. Новообр.: журавчики, белоглазка, тёмные кутаны по граням педов	+
BSA _q 90– 120	Неоднородный, палево-бурый с серым (10YR 4/3), светлые пятна (10YR 5/2)	Призматическая, ореховато- призматическая, хорошо выражена; плотный; свежий	Глина	Единичные кратовины. Новообр.: белоглазка, журавчики, кутаны; сизые потёки, охристые зоны, Fe-Mn конкреции	+; постепенный
Q 120– 150+	Палево-бурый с сероватым (10YR 5/4)	Не определена (буровая колонка); плотный; свежий	Глина	Нет. Новообр.: белоглазка, журавчики, сизые потёки, охристые зоны, Fe-Mn конкреции	+