

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ —
МСХА ИМЕНИ К. А. ТИМИРЯЗЕВА»

На правах рукописи

Прохоров Артем Анатольевич

**ПРОВИНЦИАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СОСТОЯНИЯ
ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ПОЧВ АГРОЛАНДШАФТОВ
ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ**

Специальность: 4.1.3. Агрохимия, агропочвоведение, защита и карантин
растений

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата биологических наук

Научный руководитель

Доктор биологических наук,

профессор,

Борисов Борис Анорьевич

Москва 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---|----|
| ВВЕДЕНИЕ | 4 |
| ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ..... | 10 |
| 1.1 Современные представления о почвенном органическом веществе и его лабильной части | 10 |
| 1.2 Географические закономерности формирования ПОВ и его лабильной части | 19 |
| 1.3 Характеристика современных методов исследования почвенного органического вещества | 26 |
| 1.4 Проблема интерпретации данных, выпаханность как форма деградации почв | 32 |
| 1.5 Агроэкологические аспекты неоднородности свойств почв, агрогенная трансформация как фактор деградации | 39 |
| ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ..... | 47 |
| 2.1.1 Среднерусская широколиственно-лесная провинция..... | 47 |
| 2.1.2 Среднерусская лесостепная провинция | 49 |
| 2.1.3 Предкавказская провинция..... | 50 |
| 2.1.3.1 Краснодарский край почвенный округ Н1 IV | 50 |
| 2.1.3.2 Ростовская область почвенный округ Н1 II..... | 53 |
| 2.1.3.3 Республика Кабардино-Балкария почвенный Округ Н1 VI..... | 55 |
| 2.2 Почвенные условия | 56 |
| 2.3 Используемые термины и классификации..... | 66 |
| 2.4 Характеристика полевых методов исследования..... | 68 |
| 2.5 Характеристика лабораторных методов исследования | 68 |
| 2.6 Характеристика статистических методов анализа и используемого ПО ... | 73 |
| 2.7 Структура анализируемых данных..... | 75 |
| ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ..... | 77 |
| 3.1 Особенности накопления органического вещества в агроландшафтах предкавказской провинции..... | 77 |
| 3.1.1 Агрохимические свойства почв | 77 |
| 3.1.2 Содержание лабильных и стабильных компонентов ПОВ | 80 |
| 3.2 Особенности накопления органического вещества в агроландшафтах среднерусской широколиственно-лесной провинции | 99 |
| 3.2.1 Агрохимические свойства почв | 99 |

| | |
|--|-----|
| 3.2.2 Содержание лабильных и стабильных компонентов ПОВ | 101 |
| 3.3 Особенности накопления органического вещества в агроландшафтах среднерусской-лесостепной провинции | 112 |
| 3.3.1 Агрохимические свойства почв | 112 |
| 3.3.2 Содержание лабильных и стабильных компонентов ПОВ | 113 |
| 3.4. Особенности накопления почвенного органического вещества в зависимости от климатических и геоморфологических условий | 118 |
| 3.5 Трансформация химических свойств почв в агроландшафтах..... | 122 |
| 3.6 Группировка и диагностический потенциал показателей органического вещества в почвах разных провинций..... | 128 |
| 3.7 Провинциальные особенности насыщения почв углеродом | 134 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 145 |
| ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ | 148 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | 149 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ | 183 |

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследований

Изучение воздействия на почву и его вклада в перераспределение углерода в пулах почвенного органического вещества (ПОВ) агроландшафтов в рамках современных взглядов на биосферу является важной областью исследований в почвоведении (Cotrufo 2022; Kuzyakov, 2015; Когут, 2015; Lal, 2003; Six et al., 2002). В результате формирования и функционирования агроландшафтов на протяжении последних лет существенно ускорились темпы естественной минерализации органического вещества, а также интенсивность процессов эрозии относительно темпов поступления и накопления углерода в почвах. (Cotrufo, 2021). Важной характеристикой ПОВ являются характерные скорости процессов накопления и закрепления в почве (Kuzyakov, 2015), которые существенно меняются в агроландшафтах. При систематическом техногенном воздействии на почву за счет механической обработки, внесения удобрений и мелиорантов, происходит перераспределение углерода внутри функциональных пулов (Семенов, 2024) и, по оценкам (Sanderman et al., 2017), на сегодняшний день это привело к глобальной потере до 133 Пг углерода из верхнего метрового слоя. Изучение агрогенного воздействия на почву и его вклада в перераспределение углерода в пулах ПОВ агроландшафтов является важным направлением исследований в агропочвоведении. Трансформация свойств почв и системы ПОВ в агроландшафтах рассматривается как один из факторов, определяющих вклад наземных экосистем в формирование глобального баланса углерода.

С 1980-х годов был накоплен огромный эмпирический материал и заложены концептуальные основы функционирования и формирования системы ПОВ. Как отмечают авторы (Cotrufo, 2022), за последнее десятилетие было разработано множество новых концепций функционирования и распределения углерода в экосистемах, каждая из которых по-своему интерпретирует механизмы перераспределения и стабилизации углерода в почве. Эти подходы нуждаются в согласовании и формализации применительно

к почвам агроландшафтов, где интенсивность антропогенного воздействия существенно изменяет характер функционирования ПОВ. (Schmidt et al., 2011; Cotrufo et al., 2013, 2015; Lehmann and Kleber, 2015; Liang et al., 2017; Lehmann et al., 2020; Daly et al., 2021). Эти новые достижения должны быть увязаны в единую теорию с возможностью ее формализации, необходимой для разработки эффективных стратегий оптимизации режимов почвенного органического вещества (Blankinship et al., 2018) и предотвращения деградации почв агроландшафтов (Кузуяков, 2020).

Цель и задачи исследования

Цель работы – оценка провинциальных особенностей состояния почвенного органического вещества в агроландшафтах европейской части России.

В работе были поставлены следующие задачи:

1. Охарактеризовать климатические условия, рельеф, особенности проявления эрозионных процессов и повышенного увлажнения, а также агрохимические и физические свойства почв и характеристики почвенного органического вещества (содержание общего и лабильного углерода, углерода легких денситометрических фракций) для почв агроландшафтов и необрабатываемых участков с учетом провинциальных особенностей.
2. Оценить соотношения функциональных пулов ПОВ в почвах агроландшафтов и фоновых участках в условно-референтном состоянии с учетом провинциальных особенностей.
3. Проанализировать влияние рельефа, климатических параметров и почвенных характеристик на процессы накопления ПОВ в почвах агроландшафтов с учетом их принадлежности к агроэкологическим группам.
4. Оценить пространственную вариабельность содержания лабильных фракций ПОВ в агроландшафтах, значимость и достоверность различий на уровне агроэкологических групп с учетом провинциальных особенностей.
5. Выявить степень сопряженности ряда свойств почв со снижением содержания почвенного органического углерода и пределы потенциального

накопления стабильного углерода в почвах агроландшафтов с учетом провинциальных особенностей.

Научная новизна

Вклад агроэкологических факторов в процессы стабилизации и дестабилизации органических веществ при формировании агроландшафтов до настоящего времени оставался мало изучен на уровне отдельных почвенно-экологических условий. Впервые для почв агроландшафтов определена пространственная вариабельность почвенных параметров: содержания активного (перманганат-окисляемого) углерода фракции РОХС, углерода легкой денситометрической фракции $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$ и азота в ее составе, в почвах разных агроэкологических групп в пределах европейской части России. Впервые построены логистические кривые насыщения углеродом тяжелой денситометрической фракции (C_{HF}) для почв агроландшафтов в различных почвенно-экологических условиях.

Важный элемент новизны – впервые исследованы зависимости перераспределения фракций углерода от агроэкологических факторов и физико-химических свойств почв в различных почвенно-климатических условиях с использованием методов математической статистики на основе большого эмпирического материала.

Получены данные о пространственном варьировании фракций ПОВ в зависимости от рельефа и климатических параметров в агроэкологических группах почв. Проведена оценка степени сопряженности различных почвенных свойств со снижением содержания $C_{орг}$.

Теоретическая и практическая значимость

Выводы диссертационной работы, сделанные на основе статистического анализа массива данных, полученных в течение трех полевых сезонов, способствуют более полному пониманию вклада агрогенного фактора в процессы трансформации и перераспределение пулов ПОВ. Количественная характеристика перераспределения фракций ПОВ в почвах разных агроэкологических групп европейской части России позволяет получить более

точные оценки пространственного варьирования показателей и вклада агроэкологических факторов в потенциал накопления ПОВ. Полученные данные о степени сопряженности почвенных свойств к снижению содержания $C_{орг}$ могут быть использованы при параметризации и экспериментальной проверке региональных моделей функционирования почвенного органического вещества в агроландшафтах. Данные также могут быть широко использованы для оценки современного состояния и мониторинга почв агроландшафтов европейской части России. Логистические кривые насыщения и региональная оценка пределов накопления C_{HF} могут служить количественной характеристикой, отражающей потенциал связывания углерода почвами.

Положения, выносимые на защиту

1. Для почв с высоким содержанием углерода в лёгкой фракции $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$ в естественном (условно-референтном) состоянии характерна тенденция к более выраженному снижению ее содержания при переходе к квазиравновесному состоянию в агроландшафте.

2. Независимо от почвенно-экологических условий, содержание фракции $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$ в % от массы почвы является наиболее чувствительным параметром к изменению типа землепользования, проявлению эрозионных процессов.

3. Фракция перманганат-окисляемого углерода является информативным маркером изменения типа землепользования в почвах черноземного типа, но характеризуется низкой чувствительностью при оценке проявления эрозионных процессов и гидроморфизма.

4. Зависимость C_{HF} от $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$ для исследуемых почв различных провинций описывается логистической моделью с различающимися значениями асимптотического параметра K_i , при этом форма зависимости характеризуется убывающим предельным приростом C_{HF} по мере увеличения доли $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$.

Апробация работы, конференции и публикации

Основные положения и результаты исследования были представлены автором в виде устных и стендовых докладов на 16 международных и всероссийских конференциях и форумах включая: «Почвоведение горизонты будущего 2022», всероссийский молодежный научный форум «Наука будущего - наука молодых 2023», Всероссийский молодежный научный форум «Наука будущего - наука молодых 2025», «Молодежная научная конференция VII Вильямсовские чтения 2022», «Почвоведение: горизонты будущего 2023», Почвоведение: горизонты будущего 2024», «IX Вильямсовские чтения 2024», «Международная научная конференция молодых учёных и специалистов, посвящённая 180-летию со дня рождения К.А. Тимирязева», «Агрометеорология XXI века: материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 90-летию кафедры метеорологии и климатологии», «Международная научная конференция молодых учёных и специалистов, посвящённая 160-летию Тимирязевской академии 2025», «Экологическая безопасность в условиях антропогенной трансформации природной среды, конференция молодых ученых, посвященная памяти Н.Ф. Реймерса и Ф.Р. Штильмарка 2023», «Докучаевские молодежные чтения 2023 Матрица почвоведения», Докучаевские молодежные чтения 2024 традиции и инновации в почвоведении», «II Никитинские чтения Актуальные проблемы почвоведения, агрохимии и экологии в природных и антропогенных ландшафтах 2023».

По материалам диссертации опубликовано 20 работ, включая 5 статей рецензируемых научных изданиях, 1 статья, индексируемая в базе данных Scopus, 1 патент, 13 работ в других изданиях.

Личный вклад автора

Автору принадлежит подбор и обобщение литературного материала, участие в проведении полевых работ (апрель 2022 г. - август 2024 г.), полевые измерения различных свойств почв, закладка и морфологическое описание почвенных разрезов, проведение почвенно-ландшафтного обследования

исследуемой территории и построение почвенных и агроэкологических карт, работа с данными дистанционного зондирования и климатическими базами данных, лабораторный анализ отобранных проб почв, статистическая обработка массива экспериментальных данных, обобщение и интерпретация полученных результатов, подготовка публикаций и настоящей рукописи.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, 3 глав основной части: обзора литературы, описания объектов и методов исследования, результатов исследования и заключения, изложена на 192 страницах печатного текста, включает список литературы из 253 источников, в том числе 182 на английском языке, содержит 47 рисунков, 5 таблиц, 10 приложений.

Благодарности

Автор глубоко признателен руководству кафедры почвоведения, геологии и ландшафтоведения РГАУ-МСХА им. К. А. Тимирязева за предоставленную возможность проведения исследований по теме диссертации. Автор считает своим долгом выразить благодарность научному руководителю д.б.н., профессору Борисову Борису Анорьевичу, руководителю Испытательного центра почвенно-экологических исследований (ИЦПЭИ) РГАУ-МСХА к.с.-х.н. Ефимову Олегу Евгеньевичу, профессору Кузякову Якову Викторовичу за помощь в подборе материала для обзора литературы. Сотруднику ИЦПЭИ РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева Котюн Дарье Николаевне. Отдельную благодарность автор выражает коллегам Петрову Вадиму Николаевичу и Куприянову Алексею Николаевичу за помощь в проведении полевых работ. Большое содействие в приобретении научных знаний и формировании исследовательских навыков оказали сотрудники и преподаватели кафедры почвоведения РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, которым автор признателен и благодарен.

ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

1.1 Современные представления о почвенном органическом веществе и его лабильной части

На современном этапе развития почвоведения как науки, исследования в области локального рассмотрения функций, оценки пространственной неоднородности, а также возможностей регулирования и управления балансом углерода в наземных экосистемах являются наиболее актуальными, в особенности в связи с глобальными изменениями, происходящими в биосфере, обусловленными потеплением климата (Lal, 2004). По современным оценкам, почва является крупнейшим на планете резервуаром углерода (Lal, 2004; Семенов, 2015; Six, 2002; Cotrufo, 2021; Cotrufo, 2025; Tian et al., 2015; Wang et al., 2014; Kuzyakov, 2015). Сложность, гетерогенность и динамичность системы почвенного органического вещества (ПОВ) не позволяет изучать его напрямую, в связи с чем появляются новые косвенные методы как измерения, так и оценки состояния ПОВ в наземных экосистемах и агроландшафтах. (Six, 2002; Когут, 2003; Борисов, 2008; Culman, 2012; Кузяков, 2020)

Важность органического вещества (ОВ) для ключевых функций почвы изучается на протяжении длительного времени как отечественными, так и зарубежными авторами (Six, 2002; Борисов, 2008; Johnston et al., 2009; Артемьева, 2010; Когут, 2012; Culman, 2012; Холодов, 2019; Кузяков, 2020; Заварзина и др., 2021). При этом сам термин «почвенное органическое вещество» за последние 20 лет в рамках проводимых исследований многократно дополнялся и в своем современном представлении учитывает множество экосистемных функций почв. На протяжении достаточно длительного промежутка времени при изучении ПОВ господствовала гумификационная теория, предполагающая формирование в почве специфических гумусовых веществ, которые впоследствии классифицировались и использовались как для агрономической, так и генетической оценки почв (Орлов, 1980; Когут, Семенов, 2015; Артемьева, 2010). Совокупность органических веществ, прошедших стадии гумификации,

традиционно причислялась к категории гумусовых веществ (ГВ). При этом существует несколько определений данного термина, каждый из которых охватывает ряд свойств и функций (Когут, 2015). И.В. Тюрин в своих работах отмечал, что под гумусом следует понимать сложный динамический комплекс, включающий многочисленные и разнообразные по своей природе неразложившиеся остатки растений, животных, живой и мертвой микробной биомассы, промежуточные продукты распада сложных органических групп и гуминовые вещества (Тюрин, 1965). Впоследствии Орловым Д.С. было предложено определение, согласно которому к гумусу следует причислять все органические соединения почвенного профиля, утратившие связь со структурными элементами клеток ткани (Орлов, 1996). В современном же представлении под гумусом предложено понимать подсистему почвы, сформированную из органических веществ и соединений растительного, животного и микробного происхождения, прошедших гумификационные и негумификационные стадии стабилизации (Когут, Семенов, 2015). При этом, как отметили авторы (Когут, Семенов, 2014), в рамках предложенного определения особенно важным дополнением является именно выделение как гумификационных, так и негумификационных стадий и процессов стабилизации. Почвенный «гумус» является промежуточным связующим звеном между живой и неживой формой существования органического вещества в почве.

Традиционно, в методиках изучения ПОВ, разрабатываемых в СССР, широко использовался химический анализ. Оксидиметрический метод Тюрина в различных его модификациях, в основе которого лежит использование хромовой смеси в качестве окислителя, в соответствии с методическими указаниями по проведению комплексного мониторинга плодородия почв от 2003 г. до сих пор остается единственным используемым показателем оценки состояния органического вещества при проведении агрохимического обследования. Помимо определения окисляемого углерода, широко распространены методы оценки фракционно-группового состава и выделение

фракций гуминовых и фульвокислот (Фоминых и др., 2009; Холодов и др., 2023). Соотношения групп и фракций гумусовых веществ (ГВ) используют для характеристики качественного состава органического вещества и оценки плодородия почв (Заварзина и др., 2021). При проведении агрономической и генетической оценки почв во многих исследованиях используется оценка типа и состава гумуса по соотношениям фракций ГВ, при этом выделяя фульватный тип гумуса с преобладанием доли фульвокислот в % от общего содержания гумусовых кислот и гуматный – с преобладанием доли гуминовых кислот. Весьма подробная схема образования гумусовых веществ в процессе циклов био-абиотической трансформации растительных остатков представлена в работе (Stevenson, 1994). Аналогичная схема также была предложена в монографии (Когут, Семенов, 2015) - рисунок 1.

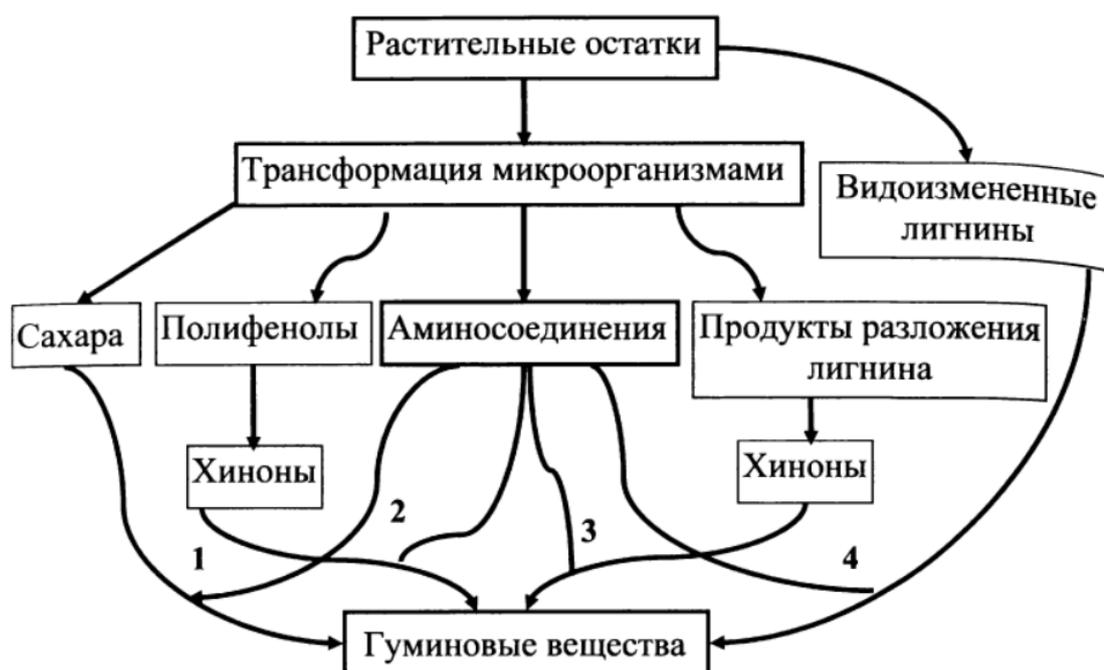


Рис. 1 Механизмы образования гумусовых веществ из растительных остатков (Когут, Семенов, 2015)

Следует отметить, что подход, в основе которого лежит выделение химических фракций ГВ, опирается на экстракцию органических веществ путем использования растворов кислот и щелочей в различных концентрациях (Stevenson, 1994). При этом, если вернуться к определению понятия «гумус»,

становится весьма разумным предположить, что в силу своей гетерогенности и сложности состава, весьма трудоемко отделить специфические органические вещества или ГВ от веществ неспецифической природы (Орлов, 1975). В обзорной работе (Холодов и др., 2023) авторы также отмечают, что за последние годы (2010-2022) вышел ряд статей, авторы которых утверждают, что ГВ являются следствием воздействия на почву агрессивных экстрагентов, способных вызывать реакции образования цепочечных структур, которые позднее и причисляются к различным фракциям ГВ, исходя из способности выпадать в осадок при различных уровнях pH среды (Kleber, Johnson, 2010; Lehmann, Kleber, 2015; Kleber, Lehmann, 2019). При этом основная идея данных работ подтверждает ранние выводы, описанные Орловым Д.С. (Орлов, 1975) о том, что в силу сложности и гетерогенности, химическая экстракция не позволяет отделить специфическое ОВ от неспецифического. Однако, также существует и ряд работ, авторы которых критикуют такой радикальный подход. Среди прочих следует выделить работу (Olk, 2019), в которой автор приходит к выводу, что химическое фракционирование и выделение ГВ, хоть и не лишено определенных недостатков, однако помогает решать ряд как прикладных, так и фундаментальных задач.

Научное понимание ПОВ как объекта исследования сильно продвинулось за последнее десятилетие. Было разработано достаточно большое количество новых концепций (Schmidt et al., 2011; Cotrufo et al, 2013; Cotrufo et al 2015; Lehmann, Kleber, 2015; Liang et al., 2017; Lehmann et al., 2020; Daly et al., 2021). Одна из наиболее важных концептуальных моделей, которая была разработана, описана и частично верифицирована — это идея стабилизации углерода в почве. Процессы формирования и стабилизации ПОВ в почве происходят в микромасштабах, в пределах 1-1000 мкм (Kravchenko and Guber, 2017), однако такое их следствие, как процесс формирования устойчивых агрегатов из элементарных почвенных частиц и дальнейший переход к структурным отдельностям, проявляется в более крупном масштабе наблюдений, что напрямую влияет на свойства почв агроландшафтов. Одна из наиболее простых

и объективных концепций (Six, 2002; Cotrufo, Jocelyn, Lavallee, 2022) это выделение пулов: дискретного органического вещества, не связанного прочно с минеральной массой почвы - фракцию POM (Particulate Organic Matter), минерал-ассоциативных комплексов MAOM (Mineral-Associated Organic Matter), а также пула растворимого органического вещества DOM (Dissolved Organic Matter).

Стоит отметить, что в отечественных работах фракцию POM часто называют легкой денситометрической фракцией или ЛФ. Данное сокращение широко распространено и его можно встретить в работах (Артемьева, 2010; Артемьева, 2014). Ранее, при разработке концепций оптимизации режима органического вещества в агроландшафтах, на кафедре почвоведения РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева было предложено использовать фракцию ЛФ для оценки степени выпаханности почвы (Борисов, 2008). Под выпаханностью в данном случае понималась форма деградации почв в агроландшафтах, а фракция ЛФ идентифицировалась как наиболее чувствительный маркер качества почв, реагирующий на изменение экологических факторов и характеризовалась как легкоразлагаемое органическое вещество (ЛОВ). Принято считать, что фракция ЛФ в почве является наиболее подвижной, потенциально-минерализуемой и среднее время ее существования в почве варьирует в меньших диапазонах, чем для органического вещества органоминеральных комплексов (Когут, Семенов, 2015). Однако авторы работы (Angst et al., 2017) также отмечают, что твердофазное органическое вещество фракции ЛФ, может быть достаточно стабильным при проявлении процесса окклюдирования частичками минералов. Тем не менее ПОВ, связанное с почвенными минералами, является наиболее стабильным пулом за счет более выраженной устойчивости к микробному разложению (Тулина, Семенов, 2010).

Таким образом ЛФ (LF или POM) фракция преимущественно растительного происхождения, содержит много структурных соединений углерода с низким содержанием азота и сохраняется в почве за счет биохимической устойчивости к разложению, физической защищенности при

покрытии мелкими частичками почвенных минералов. МАОМ состоит преимущественно из продуктов жизнедеятельности микроорганизмов, в большей степени обогащена азотом, и сохраняется в почве благодаря физико-химическому соединению с почвенными минералами (Cotrufo, 2022). Две эти фракции могут быть препаративно разделены гранулометрически или денситометрически (Шаймухаметов, 1994; Когут, 2003; Jone, 2005; Борисов, 2008; Артемьева, 2015) и демонстрируют последовательные различия во времени оборота, причем РОМ более уязвима к возмущениям и среднее время существования углерода РОМ обычно существенно меньше, чем углерода фракции МАОМ (Cotrufo, 2021).

Помимо использования классических химических методов, в последнее время для разделения ПОВ на лабильный и стабильный пулы, используют биокинетические методы (Тулина, 2014; Ларионова и др., 2015; Семенов, 2023). Авторы работы (Ларионова и др., 2015) отмечают, что, что время обновления лабильного пула, подверженного разложению микроорганизмами, может варьировать от нескольких суток до нескольких недель, его размер 1–5% от величины $C_{орг}$, что можно определить в ходе лабораторных измерений. Устойчивый пул ОВ, который составляет 95–99% от $C_{орг}$, невозможно определить в лабораторных условиях путем инкубации, разделив на условно слабо/средне и высоко стабильный за счет длительного среднего времени пребывания в почве. По данным аппроксимации по модели время обновления стабильного пула составляет от 10 до 30 лет (Schadel et al., 2013).

В работе (Zhiming et al., 2021) авторы отмечают, что лабильный органический углерод почвы является наиболее активным компонентом ПОВ и может быть классифицирован как: углерод микробной биомассы, растворенный органический углерод, легкоокисляемый органический углерод и легкая фракция ОВ (Wang et al., 2003). Активные фракции ПОВ - основной источник энергии для почвенных микроорганизмов, которые в свою очередь могут не только регулировать доступность питательных веществ для сельскохозяйственных культур, но и оптимизировать физико-химические

свойства почвы и участвовать в обороте ПОВ и круговороте углерода (Dikgwatlhe et al., 2014). Рядом исследователей (Banger et al., 2010; Das et al., 2017; Yu et al., 2020) было установлено, что активные фракции ПОВ более чувствительны к круговороту углерода в почве, чем валовое содержание ПОВ по фракции $C_{[total]}$. Среди активных фракций ПОВ содержание растворенного органического углерода и углерод микробной биомассы положительно коррелирует с поступлением углерода и ростом числа микроорганизмов. (Tian et al., 2015; Wang et al., 2014) Содержание растворенного органического углерода, лёгкой фракции и углерода микробной биомассы по наблюдением авторов (Fan, Wu, 2020) являются ключевыми факторами, влияющими на бактериальные сообщества, в то время как легкоокисляемый органический углерод - основной фактор, влияющий на сообщества почвенных грибов.

Таким образом, в связи со сложностью структуры, наличием гетерогенности, а также действием множества факторов, влияющих на динамику системы ПОВ, в основе современного его понимания, лежат пуловые модели. На сегодняшний день одной из наиболее распространенных является трёхкомпонентная модель, предложенная в работе (Six et al., 2002), включающая активный, медленный и консервативный теоретические пулы, что позволяет классифицировать фракции ОВ и методы их исследования.

К активному пулу прежде всего относят незащищенное и легкодоступное для микроорганизмов ОВ. В соответствии с этим, к данному пулу относят легкоразлагаемое ОВ, легкие гранулоденситометрические фракции не связанные прочно с минеральной массой, растворенное ОВ, экстрагируемое водными растворами при различных температурах, солерастворимое ОВ, легкоокисляемое ОВ, а также углерод микробной биомассы (Когут, Булкина, 1987; Six 2002; Culman, 2012; Zhiming 2021; Cotrufo 2022; Culman, 2023).

Медленный пул характеризуется большей устойчивостью ОВ к микробному разложению за счет двух основных факторов: большая степень стабилизации за счет физической защищенности, наличие более сложной химической структуры, устойчивой к разложению (Семенов, 2006). К данному

пулу также относят легкие фракции дискретного органического вещества, стабилизированные в агрегатах.

В стабильный пул ОВ, прежде всего, входят минерал-ассоциативные фракции, обладающие наибольшей степенью стабильности и устойчивостью к микробному разложению. В работе (Ларионова и др., 2015) к стабильному пулу авторы относят ОВ, неэкстрагируемое 6 н. раствором соляной кислоты. В традиционном для школы почвоведения СССР подходе выделения химических фракций, стабильным пулом является гумин или негидролизуемый остаток.

Помимо пуловой модели ПОВ в работе (Кузуяков, 2015) была предложена концепция «горячих точек», локализованных в почве в виде пространств, характеризующихся более высокими характерными скоростями протекающих процессов. Все процессы, связанные с трансформацией, синтезом и новообразованием ОВ в почве обусловлены деятельностью микроорганизмов. В работе (Young et al, 2008) авторы отмечают, что пространство, занимаемое колониями микроорганизмов, составляет менее 1% от всего объема почвы на нашей планете. В соответствии с этим применение концепции «горячих-точек» по отношению к исследованиям ПОВ видится весьма разумным решением. При этом, помимо понятия «горячая точка», авторами также вводится термин «горячий момент» (hot moments), под которым следует понимать формирование в горячих точках условий, при которых характерные скорости процессов многократно возрастают (Кузуяков, 2015). В качестве наиболее распространенных примеров «горячих точек» и «горячих моментов» можно отметить работы, в которых изучается: влияние органических удобрений на микробное сообщество, влияние различных норм и видов минеральных удобрений на почвенный микробиом, влияние системы обработки почв и технологий обработки почв на активность почвенных микроорганизмов (Strong et al., 1997). С этой точки зрения концепция горячих точек и горячих моментов, не классифицирует ПОВ на пулы, не выделяет лабильное, подвижное, защищенное и стабильное ОВ, а, в большей степени, позволяет изучать характерные времена и скорости процессов трансформации ОВ при снятии

ограничений с почвенных микроорганизмов, не позволяющих им функционировать в полном объеме (Kuzyakov, 2015).

Важность хот-спотов на микроуровне, таким образом, определяется их значимостью для функций на более высоких масштабах (Blagodatsky, Smith, 2012), при этом концепция, подразумевающая наличие в почве «горячих точек», согласуется с представлениями о том, что процессы формирования и стабилизации ПОВ происходят на очень малых масштабах, в пределах 1-1000 мкм (Kravchenko, Guber, 2017), однако их влияние на процесс агрегирования проявляется на более крупном масштабе, вплоть до целых экосистем (Cotrufo, 2022).

В работе (Когут, Милановский 2023), авторы критикуют оксидиметрический метод Тюрина за его низкую воспроизводимость и для проведения оценки содержания и запасов ПОВ рекомендуют использовать фракцию $C_{[total]}$ определяемую при сжигании проб почв на автоматическом анализаторе. В работах (Culman, 2012; Culman, 2024) оксидиметрическая фракция РОХС (Permanganate oxidizable carbon) позиционируется как маркер характеризующей биологическую активность и качество почв. В работе (Kuzyakov, 2020) авторы, в целом, делают акцент на относительной оценке качества почв и их устойчивости к процессам деградации, избегая абсолютных количественных величин и шкал в пользу введения зональных эталонов недеградированных почв.

1.2 Географические закономерности формирования ПОВ и его лабильной части

Основной источник воспроизводства органических веществ в почве – поступление свежих растительных остатков. Существует три основных пути включения ОВ в ПОВ: выделение экссудатов из корней, оборот корневой массы и поступления растительных остатков с поверхности с отпадом. Количество поступающих ОВ варьирует в пространстве и времени и зависят от типа экосистемы (Семенов, Когут, 2015).

В рамках изучения зональных особенностей накопления ПОВ в нашей стране следует обратить внимание на работы Когута Б.М. В работе «Оценка содержания гумуса в пахотных почвах России» (Когут, 2012) дана оценка содержания гумуса в пахотных почвах зонального ряда, основанная на теоретическом и экспертном подходах. Представлен обзор градаций почв по содержанию гумуса. Одна из наиболее важных особенностей градации, предложенной в данной работе, это оценка зависимости степени гумусированности от гранулометрического состава почв. Одной из проблем оценки почвы по степени гумусированности в соответствии с классификацией почв 1977 выступал тот факт, что содержание гумуса рассматривается на видовом уровне, в то время как гранулометрический состав никак не учитывает зональные особенности гумусонакопления (Когут, 2012). В работе (Ганжара, Борисов, 2008) авторами рассмотрены зональные особенности накопления легкоразлагаемого органического вещества (ЛОВ) или легкой денситометрической фракции ЛФ_{св}. Авторами установлено, что в почвах зонального ряда от дерново-подзолистых почв южно-таежной подзоны до черноземов степной зоны происходит сокращение запасов ЛОВ и сокращение относительного содержания углерода ЛОВ в % от содержания общего углерода. При этом данная тенденция к сокращению нарушалась в зоне распространения каштановых и светло-каштановых почв. Выводы по данной работе также затрагивают и вопросы накопления ЛОВ в пахотных почвах, в связи с чем

следует отметить, что тенденции к накоплению ЛОВ в пахотных почвах выражены идентично целинным, однако интенсивность процесса накопления и закрепления во всех почвенных зонах была выражена слабее, что в первую очередь, было связано с меньшим количеством и иным качеством поступающих в почву растительных остатков. Также авторами (Борисов, Ганжара, 2008) отмечена важная закономерность, которая не раз была подтверждена в наших более поздних исследованиях (Прохоров и др., 2023; Прохоров и др., 2024), что содержание ЛОВ увеличивалось на полугидроморфных аналогах зональных почв.

В работе (Артемьева и др., 2013) авторы рассматривают процессы стабилизации в зоне распространения дерново-подзолистых почв. В рамках данного подхода, помимо легкой гранулоденситометрической фракции ЛФ $< 1.6 \text{ г/см}^3$, используемой как маркер качества (Ганжара, Борисов, 2004; Ганжара, Борисов 2008), рассматриваются легкие фракции, стабилизированные за счет формирования агрегатов. Авторами установлено, что в зоне дерново-подзолистых почв, при формировании агроландшафтов существенно снижается доля легкой гранулоденситометрической фракции, не стабилизированной в агрегатах. Установлено, что уровень накопления ЛФ_{св} $< 1.6 \text{ г/см}^3$ в агроландшафтах в 9 раз ниже, чем в естественных лесных экосистемах.

При рассмотрении влияния экологических факторов и географического положения на систему ПОВ особое внимание следует уделить работе (Bongiorno et al., 2019), в рамках которой авторами рассмотрены закономерности накопления и трансформации ОВ лабильных фракций в разных климатических зонах Европы при различных уровнях интенсификации, способах обработки почвы и системах применения удобрений. В данном исследовании авторы рассматривают накопление следующих фракций ПОВ: дискретное органическое вещество, гидрофильное, термо-водногидролизуемое органическое вещество, перманганат-окисляемое органическое вещество, дискретное органическое вещество размером $> 53 \text{ мкм}$ (Weil et al., 2003; Ghani et al., 2003; Wyngaard et al., 2016) Авторами установлено, что для исследуемого

ряда биоклиматических зон в Европе, все лабильные фракции оказались чувствительными к землепользованию, при этом в системе минимальной обработки почвы и системе со внесением органических удобрений уровень накопления лабильного ОВ во всех случаях был выше. Авторы работы подчеркивают, что различные фракции лабильного углерода входят в разные пулы ОВ, причем перманганат-окисляемое органическое вещество (Weil et al., 2003) и легкая фракция (Cotrufo, 2021) представляют пулы наиболее чувствительные к землепользованию и системам почвообработки, что по заключению авторов делает их более подходящими для использования в качестве индикаторов качества почвы.

В работе (Мукина, Шпедт, 2006) авторы оценивают запасы ЛОВ или легкой фракции в залежных и пахотных серых лесных и черноземных почвах Красноярского края и приходят к выводу, что запасы ЛОВ на залежных участках серых лесных и темно-серых лесных почв, в среднем, в 1,5-2 раза выше, а на выщелоченных и обыкновенных черноземах, в среднем, выше в 1,8-3 раза. В данной работе авторы оценивали ряд почвенно-климатических округов, лесостепной и степной зоны. При этом один из выводов данной работы состоит в том, что климатические условия существенно влияют на темпы накопления легкой фракции ОВ на залежных землях.

Анализируя географические закономерности распределения ПОВ также следует отметить работу (Liang, Wei et al., 2021) где авторами произведен глобальный мета-анализ и рассмотрены закономерности факторов, оказывающих влияние на стабилизацию ОВ в гидроморфных и автоморфных почвах на примере агроландшафтов с рисовыми севооборотами. В рамках данного исследования установлено, что при совместном рассмотрении влияния среднегодовой температуры и осадков, запасы углерода и азота в пахотных автоморфных почвах, как правило, выше в более гумидных условиях и наименьшие в теплом и сухом климате. Количественный анализ также показал, что гидроморфные почвы (в частности, рисовые) за счет искусственного затопления в связи с особенностями технологии возделывания, потенциально

способны накапливать и аккумулировать большие запасы ПОВ в сравнении с зональными автоморфными. Достигается по мнению авторов это в большей степени за счет того, что в анаэробных условиях при подтоплении процессы минерализации ОВ существенно замедляются, при этом уровень поступления ОВ с пожнивными остатками риса также выше в сравнении с злаковыми культурами (озимой пшеницей и ячменем). Это утверждение о более высоком уровне поступления ОВ из корневой системы риса также подтверждается и в работе (Sokol, Bradford, 2019), авторы которой приходят к выводу, что биомасса корней риса, по сравнению с биомассой кукурузы или пшеницы существенно выше. В работах (Khan et al., 2016; Chen et al., 2020) также рассматривается вопрос, связанный с увеличением микробной биомассы и ее метаболитов в рисовых почвах, что тем самым увеличивает долю лабильного и потенциально минерализуемого ОВ. Избыточный гидроморфизм оказывает влияние на процесс агрегации. В гидроморфных почвах доля микроагрегатов, как правило, выше за счет накопления частиц с выраженной водопрочной структурой. Увеличение количества микроагрегатов в гидроморфных почвах также повышает стабильность окклюдированных ОВ (Denef et al, 2007) или фракций LF_{agr1} и LF_{agr2} (Артемьева, 2010). Таким образом, за счет искусственного подтопления и воссоздания анаэробных условий, географические закономерности накопления ПОВ в гидроморфных почвах меняются и последние могут накапливать большие количества ПОВ за счет более интенсивно протекающих процессов стабилизации (Liang, Wei et al., 2021).

Одним из наиболее важных показателей качества ПОВ, зависящем от экологических условий, является соотношение углерод: азот (C:N). Циклы углерода и азота тесно связаны между собой через биомассу растений и ПОВ, стабильность углерода обусловлена содержанием в почве азота и его доступностью (Averill, Waring, 2017). Соотношение между почвенным органическим углеродом и общим азотом традиционно используется в качестве косвенного показателя качества ПОВ, потенциала иммобилизации азота или минерализации органического вещества (Mullen, 2011, Cotrufo et al., 2021). В

работе (Amorim et al., 2022) авторы собрали информацию из 74 исследований, проведенных в период с 1980 по 2019 год, охватывающих 29 стран и широкий спектр экологических условий. Авторами проанализированы данные о содержании почвенного органического углерода (Total-Carbon), общего азота (Total-Nitrogen) и соотношении C:N в гранулометрических фракциях почвы. Корреляционный анализ и анализ с использованием алгоритма случайного леса показали, что содержание общего углерода и общего азота, в основном, контролируется экзогенными климатическими факторами, а именно температурой и количеством осадков, что согласуется с выводами (Liang, Wei et al., 2021) При этом, по мнению (Amorim et al., 2022) соотношение C:N в почве в большей степени зависит от локальных факторов, например, от гранулометрического состава. Авторами также установлена закономерность, в рамках которой соотношение C:N было различным при рассмотрении разных гранулометрических фракций.

Несмотря на то, что содержание в почве азота и углерода можно использовать как один из наиболее простых маркеров качества ПОВ (Cotrufo, 2021), ряд исследователей также утверждает, что для раскрытия механизмов, лежащих в основе устойчивости ПОВ, крайне важно иметь представление о структуре ПОВ на молекулярном уровне (Kögel-Knabner, 2002; Kögel-Knabner 2017). В работах (Thevenot et al., 2010; Schmidt et al., 2011) авторами было доказано, что лигнин является достаточно устойчивым с точки зрения химической структуры и может достаточно быстро разрушаться при оптимальных условиях увлажнения и теплообеспеченности. Такие соединения, как длинноцепочечные алканы и аминсахара, характеризуются более длительным характерных временем существования, могут доминировать в стабилизированном ПОВ при оптимальных экологических условиях (Jansen, Wiesenberg, 2017; Barre et al., 2018; Joergensen, 2018). В работе (Leman et al., 2020) авторы предложили концептуальную схему, показывающую важность молекулярного разнообразия ПОВ. В целом, разложение ПОВ протекает быстрее при высоком молекулярном разнообразии, поскольку микробное

разложение субстрата ограничивается сложностью состава соединений (Cotrufo et al., 2013). Однако недостаточно изучен вопрос о том, как количественно оценить качественный состав субстрата ПОВ за счет гетерогенности и гетерохронности для прогнозирования разложения и сохранения ПОВ (Lehmann et al., 2020).

Таким образом, уровни содержания ПОВ в почве, его стабильность и свойства контролируются группами факторов, вклад которых меняется в зависимости от пространственных масштабов (Doetterl et al., 2015; Hobley et al., 2015; Viscarra Rossel et al., 2019; Wiesmeier et al., 2019). Комбинации био-абиотических факторов, играющих ключевые роли в процессах трансформации и накопления ОВ в почве, в какой-то степени фрактальны и масштабируемы. На уровне экосистем ключевая роль принадлежит климатическим параметрам, в частности, соотношению тепла и влаги (Liang, Wei et al., 2021). В работе (Wiesmeier et al., 2019) авторы также указывают на то, что климат, растительность и свойства почвообразующих пород являются основными факторами, оказывающими влияние на стабильность органического углерода в почве, но их иерархия и взаимодействия до сих пор не изучены в полной мере.

Оценивая географические закономерности распределения ОВ, авторы в работе (Cotrufo et al., 2021) предлагают достаточно интересную концепцию – «*In-N-Out framework*» Данное представление отражает ряд географических закономерностей формирования ПОВ, а также формирует и категоризирует различные переменные, которые влияют на процессы стабилизации ПОВ. В соответствии с данной концепцией (Cotrufo et al., 2021), в системах, где фотосинтез растений ограничен, в большей степени, чем микробная активность, биогеохимический круговорот в почве ограничивается поступлением углерода. Минерализация и ограниченное поступление углерода от растений, вызывает ряд эффектов, при этом верхний слой почвы имеет минимальное накопление дискретных органических веществ (РОМ), а запасы углерода РОМ в почве низкие с относительно запасов минерально-ассоциированного органического вещества. Такой сценарий формирования ПОВ на территории нашей страны

можно наблюдать в зоне распространения каштановых почв. В соответствии с (Cotrufo et al., 2021), системы с ограниченным поступлением углерода характеризуются избытком общего N, что приводит к размыканию циклов азота и углерода. В экосистемах, характеризующихся условиями, в которых почвенные микроорганизмы в большей степени ограничены агроэкологическими (в том числе климатическими) факторами, чем растения, биогеохимия верхнего слоя почвы ограничивается выходом углерода. В соответствии с ожиданиями (Cotrufo et al., 2021), эти системы будут характеризоваться более высоким накоплением РОМ (ЛФ или ЛОВ) по сравнению с минерал-ассоциативным углеродом, что частично подтверждается экспериментальными данными (Когут, 2003; Борисов, 2008; Артемьева, 2010) и в большей степени характерно для почв таёжно-лесной зоны и севера лесостепи, где формирование ОВ в соответствии с (Когут, Семенов, 2015) идет по консервационному пути. Большая часть почвенного азота остается иммобилизованной в РОМ, что приводит к сокращению в почве доступного азота. Системы со сбалансированным поступлением углерода растениями при оптимальном соотношении тепла и влаги, как ожидают авторы (Cotrufo et al., 2021), будут характеризоваться равными долями распределения РОМ и МАОМ и наличием замкнутых циклов азота и углерода. Предложенная структура достаточно хорошо описывает общие географические закономерности формирования ПОВ, однако, при масштабировании не учитывает переменные, которые оказывают существенное влияние на параметры, связанные с функционированием экосистемы. Данный подход хорошо работает при рассмотрении автоморфных зональных почв, однако экологические и агроэкологические факторы могут способствовать тому, что удельный вес определенных параметров в рамках концепции «In-N-Out framework» (Cotrufo et al., 2021) будет не столь значительным. Например, как это было доказано в работе (Liang, et al., 2021), где авторы приходят к выводу, что локальные факторы, связанные с повышенной степенью гидроморфизма влияют на процессы стабилизации ПОВ в большей степени, чем климатические условия.

1.3 Характеристика современных методов исследования почвенного органического вещества

В настоящее время существует достаточно широкий спектр методов, позволяющих в лабораторных условиях проводить анализ образцов почвы для рассмотрения различных пулов углерода и оценки экосистемных функций ПОВ. (Six, 2000; Hartemink et al., 2008; Когут, Семенов, 2015; Cotrufo, 2022; Холодов, 2023).

Широкое распространение в трудах отечественных и зарубежных ученых получили экстракционные методы, связанные с изучением химических фракций извлекаемого или растворимого ОВ (Холодов, 2023). Одним из наиболее распространенных методов выделения химических фракций, гидролизуемых в кислой и щелочной среде, выступает обработка проб 0,1 н. раствором NaOH с последующим подкислением и выделением препаратов гуминовых кислот (Кононова, 1963). Одним из наиболее важных критериев, используемых для оценки качества ОВ и условий его формирования, выступает отношение фракций гуминовых и фульвокислот (Ганжара, 2010). При этом, к классу гуминовых кислот причисляют щелочно-гидролизуемые ОВ, способные коагулировать и образовывать осадок в щелочной среде, а также характеризующиеся наличием циклических структур в молекулярном строении (Холодов, Ярославцева, 2015). Соотношение фракций гуминовых и фульвокислот - важный качественный показатель, используемый в качестве интегрального параметра плодородия. В работах (Кононова, 1963; Ярославцева, 2020; Холодов, 2023) авторы отмечают, что для полимерных комплексов гуминовых кислот характерно наличие ядерной части, представленной преимущественно циклическими структурами. Фульвокислоты при этом характеризуются преимущественно алифатическим строением полимерных молекул. Фракции ГВ являются важными критериями для оценки целого комплекса экзогенных факторов, а также свойств ПОВ, но в свою очередь вероятностная природа формирования биополимеров за счет их самосборки на минеральной матрице во многих случаях не позволяет в полной мере охватить

все информационно значимые преобразования ОВ в почве в результате смены режима землепользования или внешних экзогенных факторов (Когут, 2003; Cotrufo, 2013; Таргульян, 2019). Наиболее отчетливо данные тенденции можно отследить в районе центрально-черноземной зоны на пахотных почвах. Несмотря на то, что в агроландшафтах происходит изменение режима поступления органического вещества, за счет сокращения уровня поступления свежего ОВ и обеднения почв легкоразлагаемым органическим веществом (ЛОВ) (Борисов, Ганжара, 2008), качественные показатели соотношения фракций гуминовых и фульвокислот во многих случаях изменяются не так существенно (Борисов и др., 2008). В то же время, у метода химического фракционирования ПОВ есть еще один существенный недостаток, заключающийся в применении "жестких" экстрагирующих растворов щелочей и кислот, под действием которых нарушается нативная структура молекул биополимеров. Существует также группа работ, в которых утверждается, что фракции фульвокислот могут являться "артефактом" - следствием применения агрессивного экстрагента в процессе экстракции (Когут, Семёнов, 2015).

Широкое распространение наряду с методами химического фракционирования получили методы выделения фракций углерода по размеру и плотности (Травникова, Шаймухаметов, 1984; Титова, 1995; Борисов, Ганжара, 2008; Six, 2002; Артемьева, 2010; Cotrufo, 2013; Фарходов и др., 2022; Семенов, 2023). Данная группа методов позволяет охватить пространственное распределение ОВ в минеральной матрице. Отделить ПОВ в разной степени прочности связанное с минеральной частью почвы и оценить степень значимости органоминеральных взаимодействий в процессе стабилизации углерода в целом. В рамках метода гранулоденситометрического фракционирования соотношение легких и тяжелых фракций выступает в роли одного из важнейших качественных показателей. Как правило, на участках, вовлеченных в интенсивное сельскохозяйственное пользование, сокращается доля легких денситометрических фракций $f.POM < 1.6 \text{ г/см}^3$ или $POM < 1.6 \text{ г/см}^3$ (LF, ЛФ, ЛОВ - наименование легких фракций в разных работах может

отличаться в зависимости от используемой методики выделения и времени написания работы в период 1995-2022 г.) (Артемьева, 2003; Борисов, Байбеков, Ганжара, 2004; Jon, 2005; Когут, 2006; Шпедт, 2006; Борисов, 2008; Семенов, 2013; Фарходов, 2020). Методы физического фракционирования широко используются для оценки: степени выпаханности, структурного состояния, влияния агротехнологий на ОВ, для анализа влияния смены режима землепользования на состояние ПОВ, выявления наиболее значимых механизмов стабилизации почвенного углерода (Six, 2002; Артемьева, 2017; Семенов 2023).

Для изучения «активного пула» ПОВ во многих исследованиях рассматривают фракции, извлекаемые из почвы с использованием мягких экстрагентов (вода, растворы солей), либо фракции, окисляемые растворами сильных окислителей в слабой концентрации (Culman, 2012; Nortcliff, 2014). Изучая фракции углерода в инкубационном эксперименте в работе (Akinseteet al., 2014), авторы использовали в качестве мягких экстрагентов для выделения наиболее подвижных органических соединений воду различной температуры. В результате была установлена зависимость, что при сокращении доли термоводногидролизуемого углерода фракции (на 90-ый день инкубирования) происходит его мобилизация и доля лабильной водногидролизуемой фракции снова повышается. Авторы также отмечают важность изучения динамики различных выделяемых фракций не только в верхнем слое почвы 0-25 см, но и на большей глубине. Особенно это актуально при сельскохозяйственном использовании черноземов ЦЧЗ, так как углеродный профиль этих почв может быть значительно мощнее, чем первые десятки сантиметров.

В рамках каждого из методов можно рассматривать различные качественные и количественные характеристики системы ПОВ, но наибольший информационный охват и представление о факторах, свойствах, протекающих процессах, а также пространственной неоднородности распределения органического вещества можно получить, используя системный подход. Оценка степени гумификации легких денситометрических фракций, анализ

распределения фракций гуминовых веществ в разных гранулометрических фракциях или изучение динамики лабильных водногидролизующих и термоводногидролизующих веществ тяжёлых денситометрических фракций позволит получить наиболее близкую к действительности картину пространственного распределения, подвижности и минерализационной способности ПОВ (Когут, Семенов, 2015).

В работе (Семенов, 2023) авторы отмечают, что разделение ПОВ на пулы и фракции позволяет понять природу и функции данной системы, охарактеризовать его качество, состав и свойства. Авторами на примере серых лесных почв было установлено, что наиболее логично рассматривать консервативные свойства и депонирующие фракции путем использования гранулометрических и гранулоденситометрических методов, а динамические за счет оценки микробиологической активности. При этом данный подход кажется весьма логичным, и, как было отмечено выше, уже не раз были предложены и использовались модели подобного типа. Одна из особенностей проведения оценки состояния органического вещества в почвах разных природных зон — это широкая вариативность и пространственная неоднородность данных. При этом, оценивая подобного рода исследования состояния органического вещества почв для площади порядка 2000-5000 га (среднее по размерам сельскохозяйственное предприятие), следует признать их высокую трудоемкость и стоимость (Прохоров, 2024). Как было уже отмечено, метод, предложенный в работе (Weil, 2003), а позднее более детально рассмотренный в работах (Culman, 2012, Culman, 2021, Прохоров, 2024), основанный на окислении наиболее активной компоненты ПОВ (перманганат-окисляемого органического углерода – РОХС) может выступать неплохой альтернативой для изучения динамических свойств почвенного органического вещества. В работе (Culman, 2012) установлено, что накопление фракции РОХС в серии исследований на территории США (в разных природных зонах) тесно коррелировало с содержанием в почве углерода микробной биомассы.

Оценивая различные свойства ПОВ, следует отметить, что, в первую очередь, данная система находится в состоянии динамического равновесия с экзогенными факторами, и выглядит весьма разумным разделением свойств ПОВ на структурные и процессные (Six 2006; Холодов 2023; Семенов 2023). При этом существующая концепция памяти почв (Таргульян, Бронникова, 2019) предполагает накопление *in situ* твердофазных продуктов функционирования (ТПФ), отражающих в себе протекающие процессы. К таковым прежде всего следует отнести фракции РОМ и МАОМ, соотношение которых отражает экзогенные условия, что установлено рядом работ, включая (Борисов 2008; Cotrufo 2022), а также очень хорошо отражено в предложенной структуре данных In-out (Cotrufo, 2021). Фракции минерал-ассоциативного органического вещества в большей степени отражают именно структурные пулы ПОВ и могут быть использованы для оценки потенциала накопления ОВ, а также оценки степени деградации почв агроландшафтов относительно своих целинных аналогов. Для оценки же процессных пулов в работах отечественных авторов преобладает подход, основанный на анализе микробиологической активности почвы и скорости минерализации ОВ, с использованием методов: субстрат-индуцированного дыхания (Ананьева и др., 2011), который основан на измерении первоначального выделения CO_2 из почвы обогащенной глюкозой или биокинетического фракционирования (Семенов и др., 2006). В работе (Cotrufo, 2019) авторы отмечают, что процессы трансформации ОВ существенно связаны с возможностями накопления в почве азота и соотношением C:N. Также в данной работе авторы отмечают, что доля углерода между МАОМ и РОМ, а также соотношение между углеродом и азотом влияют на его запасы в почве и потенциал его накопления. В соответствии с этим понимание физического распределения органического вещества в пулах МАОМ и РОМ может помочь в управлении земельными ресурсами для более эффективного связывания углерода. В соответствии с этим, если емкость возможного поглощения почвой углерода в значительной степени зависит от содержания в почве азота, выглядит логичным предположить, что косвенно

процессные пулы можно оценить, используя показатель соотношения C:N во фракциях РОМ и МАОМ.

В работе (Poeplau et. al, 2018) были рассмотрены различные методы фракционирования ПОВ. В общей сложности авторами проанализированы 20 методик фракционирования, оценены возможности выделения фракций с различной скоростью оборота, на примере почв агроландшафтов с трех экспериментальных участков почв зоны умеренного климата. Результаты исследований показали, что подход с использованием сочетания физического (плотность, размер) и химического фракционирования (окисление, экстракция), являлся наиболее эффективным для разделения ПОВ на фракции с различными скоростями оборота, однако данный подход не лишен недостатков. В этой же работе авторы отмечают, что различные процедуры фракционирования и выделения целевых фракций, по которым возможна оценка структурных и процессных пулов ПОВ в разных протоколах проведения анализа не одинаковы и на один образец в соответствии с протоколами может уходить от 0,5 до 27 часов рабочего времени. Авторы заключают, что даже самые лабильные фракции, выделенные с помощью ансамбля из 20 различных методов фракционирования, не могут быть напрямую связаны с пулами углерода свежего растительного опада и активных пулов, оборот которых составляет 1-2 года (Coleman, 1996; Andrén, Kätterer, 1997; Когут 2015) Несмотря на то, что LF во многих исследованиях в том числе (Когут 2003; Young, 2005; Борисов 2008; Артемьева 2010; Прохоров, 2023) рассматривалась как фракция, которая характеризуется наибольшими скоростями оборота в почве, в работе (Poeplau et al., 2018) установлено, что фракционирование по плотности не является подходящим способом выделения фракций, которые состоят только из свежего растительного материала и вещества микробной биомассы и в большинстве случаев денситометрические методы позволяют проводить оценку именно структурных пулов ПОВ. Стоит также отметить, что в рамках данной работы было установлено, что наличие и содержание Al и Fe более сильный фактор для стабилизации ПОВ. Несмотря на существующую критику приравнивания

химической стабильности к биологической стабильности ПОУ (Leifeld, Lützow, 2014), авторы подтверждают, что ПОВ, устойчивое к химическому окислению, характеризуется самой низкой скоростью оборачиваемости.

Существует группа современных методов экстракции ПОВ с помощью «мягких» экстрагентов, наиболее распространенным является способ экстракции водой при различных температурах от 25° до 90° (Ghani, 2003; Nortklif 2014). В большинстве методов фракционирования экстрагируемый водой углерод концептуально рассматривается как лабильная фракция ПОВ из-за его высокой биодоступности (Zimmermann et. al., 2007; Zhao et. al., 2008). В то же время хорошо известно, что растворенный органический углерод обычно варьируется по своей биологической доступности (Kalbitz et. al., 2003).

В работе авторов (Роерлау, Дон, 2013) установлено, что экстрагированная водой фракция углерода менее чувствительна к изменению землепользования, чем углерод фракции $C_{[total]}$ определяемый при сухом сжигании пробы. Это хорошо согласуется с результатами (Роерлау et al., 2018). Однако как отмечают авторы (Роерлау et al., 2018) концепция извлечения лабильного ПОВ водой может быть несправедлива. Авторы работы (Lützow et. al., 2008), также пришли к выводу, что достаточно трудно использовать экстрагируемый водой углерод в качестве фракции ПОВ с четко выраженной скоростью оборота. Тем не менее, благодаря своей высокой мобильности, водорастворимый углерод является ключевым функциональным пулом, который полезен для понимания и моделирования вертикального распределения ПОВ в профиле почвы (Neff, Asner, 2001).

1.4 Проблема интерпретации данных, выпаханность как форма деградации почв

Функционируя в условиях агроландшафтов в широком спектре экосистемных услуг, предоставляемых почвой, происходит смещение в сторону преобладания удельного веса продукционной функции (Кузюаков, 2020). С точки зрения концепции оценки «Здоровья почв», предложенной в работе (Махаржан et al., 2020), авторы рассматривают определяемые и диагностируемые

почвенные свойства, как переменные, оказывающие влияние на производственный процесс и получение высоких урожаев. В работе (Kuzyakov, 2020) утверждение о том, что при оценке здоровья почв концепция должна опираться на наиболее значимые маркеры качества, выходит за пределы оценки только агрономически значимых свойств и появляется положение о том, что наиболее рациональный подход сводится к оценке степени деградации почв агроландшафтов по отношению к их целинным аналогам. Аналогичную концепцию, завязанную на оценке степени выпаханности почвы, предложили в работе (Борисов, 2004). Многие авторы (Six, 2002; Когут, 2003; Артемьева, 2010) аналогично предлагали оценивать состояние выпаханности почв используя различные маркеры качества, среди которых: содержание бихромат окисляемого углерода или $C_{орг}$, содержание легкой денситометрической фракции ($ЛФ < 1.6 \text{ г/см}^3$ или ЛОВ), показатели характеризующие соотношение агрономически ценных агрегатов и т.д. Параметр выпаханности в данном контексте рассматривается как определенная форма деградации почв агроландшафтов относительно своих целинных аналогов. В работах большого числа авторов отмечается, что функционирование почвы в агроландшафте приводит к снижению содержания почвенного органического вещества (Six, 2000; Борисов, 2008; Когут, 2012; Kuzyakov 2020). В работе (Jensen et al., 2020) авторы рассматривают комбинации одновременных сценариев деградации и восстановления почвы в долгосрочном эксперименте при использовании разных способов обработки почвы. При этом модель деградации почвы включала преобразование пастбищ в пахотные земли и пар, в то время как модель восстановления включала формирование пастбищ и залежей из пахотных земель. Авторами были рассмотрены две фракции ПОВ: перманганат-окисляемая (РОХС) и углерод, экстрагируемый горячей водой при температуре 90°C . Авторами установлено, что скорость восстановления почвы была существенно ниже, чем скорость деградации, при этом содержание фракций маркеров было существенно связано с проявлением механизмов стабилизации (Jensen et al., 2020).

По мнению (Lal, 2003) эрозия является наиболее распространенной формой деградации почв. Вопросы связанные с изучением влияния процесса эрозии на фракции ПОВ были рассмотрены в работах (Травникова, 2006; Артемьева, 2008; Артемьева, 2010; Травникова и др., 2010; Артемьева и др., 2021). Авторами установлено, что в пределах различных зон проявления эрозионных процессов на склонах, приуроченных к определенным формам рельефа, формируются специфические почвенные комбинации. Для них характерны совершенно определенные параметры гумусового состояния, в том числе химической структуры и состава разных пулов ПОВ.

Одна из основных проблем связанная с оценкой степени деградации почв, состоит в сложности интерпретации данных, а также в трудоемкости и стоимости проведения лабораторных измерений (Culman, 2012). В нашей стране наиболее распространённым методом и единственным параметром почв, определяемым в рамках проведения агрохимического мониторинга земель сельскохозяйственного назначения, является определение содержания углерода гумуса методом Тюрина (в различных модификациях) при использовании в качестве окислителя хромовой смеси (Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия земель сельскохозяйственного назначения, 2003). При этом в ряде работ было установлено, что данная фракция не всегда является чувствительным маркером состояния почв, т.к. данный бихромат-окисляемый пул включает в себя большую часть функциональных пулов ПОВ и тренды снижения содержания в почве $C_{орг}$ могут несколько исказить действительное состояние почвы при проявлении процессов деградации. (Nortklif, 2014; Прохоров, 2024). Большой интерес для проведения оценок, в данном случае представляют фракции лабильного, активного и легкоразлагаемого ПОВ. (Борисов 2008; Culman 2012; Прохоров 2024). При использовании лабильных компонентов для оценки степени деградации или выпаханности почвы (Борисов, Ганжара, 2008) не учитывается вклад стабильного ПОВ в процесс формирования «буферной емкости». Однако, принятие допущений и использование маркеров приводит к некоторым

искажениям оценок. В действительности процессы трансформации активной части ПОВ зависят от комплекса факторов и характеризуются стохастической природой (Cotrufo, 2021).

В работе (Cotrufo, 2019) авторы проследили за разложением меченого надземного растительного материала и его включением в органическое вещество почвы в течение трех лет на пастбище в Канзасе, США, используя инкубацию для определения скорости разложения и структуры пулов органического вещества, полученного из свежего субстрата. Данное исследование показало, что значительная часть (до 19%) углерода из свежего ОВ не минерализуется до CO_2 , а образует минерал-ассоциативные комплексы. В рамках исследования также установлены два пути трансформации ОВ, способствующих формированию ПОВ: микробная трансформация, более значимая на ранней стадии разложения, когда разрушаются лабильные компоненты ОВ и физическое разрушение дискретных частиц свежего ОВ. Промежуточные стадии, в большей степени характеризовались разложением структурных соединений (например, лигнина и инкрустированной лигнином целлюлозы). Эти два пути, по мнению автора (Cotrufo, 2022), приводят к различным механизмам стабилизации ПОВ: стабилизация минералами через микробиологический пул или же физическое разрушение и окклюдование (протекция) наиболее устойчивых к разложению химических структур при формировании агрегатов. В обоих случаях, как отмечают авторы, возможна физическая окклюзия и формирование фракций оРОМ (Six, 2002; Young, 2005) или ЛФ_{агр} (Артемьева, 2010). При этом можно заключить, что легкая фракция РОМ в почве может являться маркером качества (особенно в агроландшафтах), но при этом качество фракции РОМ, способность к разложению, а также ее структура будут во многом определять процессы ее трансформации в почве и вклада в процесс агрегации (Когут 1998, Прохоров, 2023). Как отмечалось в работе (Cotrufo, 2021) азот является одним из наиболее важных параметров, оказывающих влияние на накопление почвенного углерода. В концепции «In-N-Out framework» объясняются зависимости между накоплением фракций МАОМ

и РОМ при учете климатических параметров, из чего следует, что оценка степени выпаханности и интенсивность деградации почв будут зависеть от экзогенных климатических факторов (Cotrufo, 2021; Прохоров 2024). Значимость вклада климата в процессы стабилизации углерода также рассматривают и авторы (Liu et al, 2021), отмечая, что при проявлении избыточного гидроморфизма значимость климатической компоненты для процесса стабилизации почвенного углерода ослабевает.

Как было отмечено выше, под выпаханностью почв понимают форму деградации вследствие функционирования в агроландшафте (Борисов 2008, Прохоров, 2024). В зарубежной литературе аналогично встречается термин «Soil Health Gap» - пробел в здоровье почвы (Maharjan et al, 2020). Авторы работы (Maharjan et al, 2020) рассматривают концепт, в рамках которого выдвигают «Soil Health Gap» как основу поиска маркеров для оценки относительного качества почв агроландшафтов в их сопоставлении с неиспользуемыми целинными почвами. Пробел в здоровье почвы может быть определен на основе общего совокупного (индексированного) или конкретного свойства почвы, такого как почвенный углерод. Аналогичный подход был использован в работе (Kuzyakov et al, 2020), где авторы предлагают модель формализации оценок степени деградации почв при сопоставлении естественных (нативных) почв и почв, функционирующих в условиях агроландшафтов.

Одна из наиболее важных проблем, связанная с оценкой степени деградации почвы, степени смывости, уровня обеспеченности факторами, обуславливающими стабильность и нормальное функционирование состоит в принципе подбора метода оценки (Kuzyakov et al, 2020). Очень часто в различных работах авторы разрабатывают собственную методологию оценки качества почв, основанную на идеях и концептах позволяющих решать конкретные задачи. Существует большая дискуссия по поводу терминов "качество почвы" и "плодородие почвы", и ранее исследователи различали качество почвы и плодородие почвы. В рамках современной терминологии

качество почвы — это способность почв выполнять различные функции для биологической продуктивности, обеспечения экосистемных услуг, поддержания экологической устойчивости и обеспечения среды обитания растений и животных (Doran et al., 1994). Поскольку эти функции невозможно измерить напрямую в силу того, что они не являются чем-то детерминированным, в качестве косвенных маркеров различных функций почвы выбираются соответствующие физические, химические и биологические параметры (Karlen et al., 2004). Важнейшее условие для того, чтобы свойство почвы рассматривалось в качестве индикатора качества почвы - чувствительность к любым изменениям, происходящим в рамках рассматриваемой функции почвы. Другие важные характеристики показателей качества почвы включают: положительную корреляцию с экосистемными услугами, трудоемкость измерения, чувствительность к способам регулирования (Andrews et al., 2004). В период с 1990 г. активно начали развиваться идеи, связанные с использованием индексов качества почв или Soil quality index (SQI). По своей сути индекс качества почвы — это измеряемый параметр, который влияет на способность почвы выполнять определенную функцию (Karlen et al., 2006). Наиболее распространенный метод расчета SQI был описан Andrews et al., 2004; Askari, Holden, 2015). Он состоит из трех последовательных шагов: выбор ключевых показателей качества, присвоение соответствующих баллов и веса каждому показателю и объединение различных показателей в одно значение индекса. Ключевые показатели могут включать в себя физические, химические и биологические атрибуты почвы, образуя большую матрицу данных. Одним из часто используемых методов является выбор минимального набора данных с помощью анализа главных компонент (PCA) (Andrews et al., 2002; Armenise et al., 2013). В дополнение к частично субъективному подбору маркеров качества и подбору свойств почвы, рассматриваемых в таких SQI по мнению (Kuzyakov, 2020), следует выделить два основных недостатка, ограничивающих применимость такого рода индексов качества: сравнение различных SQI между разными исследованиями очень сложно, а в большинстве случаев невозможно

за счет разных параметров почвы и разных весовых коэффициентов этих параметров, используемых при расчёте SQI; чувствительность отдельных параметров к деградации почвы зависит от направления деградации и факторов ее обуславливающих (химическая природа факторов, физическая или биологическая природа). Например, чрезмерное применение удобрений, высокая механическая нагрузка или химическое загрязнение как фактор, по-разному влияют на процессы уплотнения, разрушения агрегатов и эрозии. Таким образом, если учесть тот факт, что под степенью выпаханности почв предполагается определенная форма деградации, то наиболее правильный подход при оценке данного параметра должен заключаться в поиске наиболее значимых «маркеров» специфических для каждой почвенно-экологической зоны (Прохоров, 2024). При этом к категории универсальных маркеров агроэкологических условий во многих работах относят содержание почвенного органического углерода (Doran et al., 1994; Bünemann et al., 2018), прежде всего, по следующим причинам: содержание ПОУ определяет различные физические, химические и биологические свойства почв, ПОУ чувствителен к типу землепользования и большинству форм деградации почвы, ПОУ тесно связан со многими свойствами почв, ПОУ использовался в большинстве предыдущих SQI (Kuzyakov, 2020).

Важно также отметить, что при изучении состояния ПОВ следует учитывать и пространственную неоднородность почв в агроландшафтах (Хитров и др., 2023). Авторы (Хитров и др., 2023) отмечают, что теоретические основы пространственной изменчивости почвенных свойств были сформулированы в монографии Самсоновой (Самсонова, 2008) Авторами (Хитров и др., 2023) установлено, что при площади исследуемого участка менее 400 м² (20 × 20 м) абсолютное стандартное отклонение $C_{орг}$ чаще всего составляет от 0,1 до 0,5%, в редких ситуациях до 1,5%, а коэффициент вариации от 2 до 30%. В диапазоне площади участка от 0,1 до 100 га абсолютное стандартное отклонение остается приблизительно в тех же пределах, а коэффициент вариации изменяется в интервале 5–50%. На больших

территориях (>100 га) разброс обоих показателей становится еще больше. Данная тенденция, по мнению авторов, обусловлена увеличением сложности почвенного покрова при переходе от отдельных элементарных почвенных ареалов, составляющих от нескольких квадратных метров до нескольких гектаров. Авторами (Liptzin et al., 2022) при обработке данных со 124 многолетних полевых опытов в США и Канаде был установлен широкий разброс значений коэффициентов вариации индикаторов содержания $C_{орг}$ и перманганат-окисляемого углерода РОХС. По медиане и межквартильному размаху фракция РОХС, варьировала приблизительно в 1,5 раза меньше, чем $C_{орг}$. При этом авторы (Liptzin et al., 2022) отмечают сильную корреляцию между используемыми индикаторами.

1.5 Агроэкологические аспекты неоднородности свойств почв, агрогенная трансформация как фактор деградации

В работах (Elliott, 1986; Jastrow, 1996) предполагается, что иерархическая организация почвенных агрегатов играет решающую роль в стабилизации ПОВ. Под иерархией понимается, что агрегаты (<53 мкм) действуют как физический барьер между микроорганизмами и субстратом и, таким образом, защищают ПОВ от быстрой минерализации (Six, et al., 2002; Семенов, Когут, 2015). При такой организации агрегатов любой макроагрегат содержит субъединицы микроагрегатов и, следовательно, определенную долю стабилизированного углерода, которая определяется такими факторами как: тип землепользования (пашня, залежь, пастбище и т.д.), минералогический и гранулометрический состав, тип растительности (за счет возможности корневых волосков разных растений по разному проникать внутрь агрегатов) (Traore et al., 2000 ; Rillig, 2004; Rasse et al., 2005). Тот факт, что агрегаты и особенно микроагрегаты учувствуют в стабилизации ПОВ, возможность разрушения и трансформации агрегатов за счет воздействия внешних агентов (экзогенный потенциал климата и биоты) (Таргульян, 2015), разрушение агрегатов и ввод нового ОВ в макроагрегаты, приводит к постоянному смешению молодых и старых пулов

ПОУ, что обуславливает гетерогенность и гетерохронность. Также в работе (Puget et al., 2000; Virto et al., 2010) было показано, что в почвах агрегаты подвергаются быстрому обороту (Puget et al., 2000; Virto et al., 2010).

Обработка почвы - один из важнейших факторов, регулирующих устойчивость ПОВ в агроландшафтах (Andrew et al., 2021). При этом общие изменения в функциональных пулах ПОВ достаточно хорошо описываются при выделении пулов РОМ и МАОМ. В работах (Blanco-Moure et al., 2013; Belmonte et al., 2018; Samson et al., 2020) показано, что сокращение обработки почвы при выращивании зерновых культур и винограда приводит к повышению содержания углерода в почве, особенно в верхнем слое 0-5 см; это увеличение объясняется преимущественно увеличением содержания фракции РОМ и, в меньшей степени обусловлено МАОМ. Авторы работы (Trumbore, 2009) отмечают, что увеличение РОМ происходит, когда данная фракция защищена от микробного разложения путем агрегации и существуют определенные условия почвенной среды, такие как низкий уровень кислорода, избыток влаги и низкие температуры. Механическая обработка разрушает стабильные агрегаты, повышает уровень кислорода в почве и изменяет водный режим путем воздействия на поровое пространство, тем самым увеличивая скорость разложения фракции РОМ, но в отличие от этого, скорость разложения МАОМ гораздо менее чувствительна к этим изменениям (Lavallee et al., 2020). Общее воздействие безотвальной обработки и глубокого рыхления на почвы агроландшафтов является дискуссионным вопросом, и во многих случаях достоверное увеличение содержания углерода в поверхностном слое почвы компенсируется перераспределением углерода в почвенном профиле, что означает, что общее содержание ПОВ в целом в почве может не измениться, о чем свидетельствуют также наблюдения авторов (Powlson et al., 2014; Mary et al., 2020). При этом как отмечают (Mary et al., 2020) способ обработки почвы влияет на уровень поступления свежего ОВ в почву.

Содержание ПОВ в пастбищных экосистемах в соответствии с данными (Guillaume et al., 2021) выше, чем агроландшафтах. При этом как

обрабатываемые участки, так и лесные экосистемы по наблюдениям (Poerlau, Don, 2013; Cotrufo et al., 2019) в большинстве случаев обеднены углеродом фракции МАОМ по сравнению с пастбищами. В ряде работ соотношение углерода МАОМ и доли частиц глины и ила использовались в качестве маркера качества почв при оценке режимов землепользования и их влияния на ПОВ. (Hassink, 1997). Эта зависимость широко использовалась впоследствии для оценки влияния типа землепользования и системы земледелия на процессы трансформации углерода (Carter et al., 2003; Sparrow et al., 2006; Zhao et al., 2006; Gregorich et al., 2009; Liang et al., 2009), а также при оценках потенциала почвенной секвестрации и уровней аккумуляции углерода в разных экосистемах (Angers et al., 2011; Wiesmeier et al., 2015; McNally et al., 2017; Chen et al., 2019). Взаимосвязь между долей углерода фракции МАОМ и массовой долей пыли и глинистых частиц изначально была описана уравнением линейной регрессии на примере широкого диапазона почв умеренного и тропического климата (Hassink, 1997). Однако, в работе (Six et al., 2002) авторы установили, что эта взаимосвязь не является универсальной и сильно зависит от минералогического состава.

В последнее время лишь в нескольких исследованиях предпринимались попытки разработать новые соотношения, адаптированные к местным агроэкологическим условиям. В работах (Liang et al., 2009; Wiesmeier et al., 2015) исследования были проведены на естественных пастбищах, расположенных в аридных и гумидных условиях на севере Китая. Другое исследование, проведенное в Канаде, выявило зависимость, аналогичную с той, что была предложена (Hassink, 1997). Кроме того, утверждалось, что использование регрессии по методу наименьших квадратов недооценивает уровень, на котором фракция МАОМ насыщается углеродом, поскольку методика подразумевает, что около половины наблюдений, попадающих выше линии регрессии перенасыщены, в то время как другая половина, расположенная ниже линии регрессии, недонасыщены (Feng et al., 2013; Beare et al., 2014). Анализ граничных линий с использованием квантилей был

впоследствии использован в работах (Beare et al., 2014; Fujisaki et al., 2018; Baldock et al., 2019; Cai et al., 2021).

В работах (Jilling et al., 2020; Guillaume et al., 2022) на основании полученных данных, авторы резюмируют, что тип севооборота влияет не только на пулы органического вещества с быстрым оборотом, такие как углерод РОМ, но также и на минерал-ассоциативные органические вещества фракции МАОМ (Lavallee et al., 2019). Также авторы отмечают, что результаты работы (Guillaume et al., 2022) не согласуются с выводами других исследований (Barr'e et al., 2017; Cotrufo et al., 2019), где доля органического углерода в различных фракциях была относительно одинаковой для всех типов землепользования (пашня, пастбище, естественные экосистемы). К аналогичным же результатам пришли авторы (McNally et al., 2017), что может указывать на то, что в рамках одного типа землепользования или одной системы с частыми преобразованиями (пашня-пастбище), доля РОМ также ограничена максимальным уровнем, характерным для этой экосистемы и преобразование пашни в пастбище не приводит к насыщению фракции РОМ дополнительным углеродом. Это, в свою очередь, ставит под сомнение концепцию о том, что дополнительная секвестрация углерода может быть достигнута с помощью фракции РОМ, после насыщения углеродом фракции МАОМ (Cotrufo et al., 2019).

Кроме того, относительно фиксированное соотношение между углеродом РОМ и МАОМ означает, что концепция насыщения углеродом МАОМ адекватна для оценки (Barr'e et al., 2017). В соответствии с данными (Guillaume et al., 2022) около 20% накопления углерода в МАОМ потенциально может переходить во фракции РОМ. Фракции РОМ являются лабильными фракциями с более высокой скоростью оборота (Meyer et al., 2017) и, следовательно, они более чувствительны к изменению внешних экзогенных факторов, в том числе климатических.

В работе (Nadal-Romero et al., 2021) авторы отмечают, что накопление ПОВ после перевода сельскохозяйственных угодий в залежь в зонах распространения лесной растительности происходит медленно, особенно на

первых этапах восстановительных сукцессий. В этом смысле, как подмечают авторы данной работы, время является ключевым экологическим фактором и элементом, который необходимо учитывать при изучении и прогнозировании накопления ПОВ.

Количество углерода, накопленного в почвах агроландшафтов, в первую очередь, определяется балансом между поступлениями углерода за счет разложения растительной биомассы и потерями за счет окисления в дополнение к эрозии и вымыванию. (Lal et al., 2015; Ahkami et al., 2017). Наиболее выражен процесс накопления углерода в диверсифицированных системах севооборота, где чередование типа корневых систем, типов культур и подхода к обработке почвы характеризуются широкой вариабельностью (McDaniel et al., 2014; King, Blesh, 2018). Присутствие в севообороте многолетних или покровных культур, обеспечивает большее поступление ОБ в почву. Данные культуры также способствуют лучшему развитию почвенного микробиома, как отмечают в своей работе авторы (Fauson et al., 2017; Pausch, Kuzyakov, 2018). Такие севообороты могут существенно повлиять на перераспределение ОБ по функциональным пулам, изменить химические свойства растительных остатков, изменить долю доступного азота и фосфора (Fageria et al., 2005; Maltais-Landry et al., 2014). Эти различия в функциональных признаках могут оказывать значительное влияние на агроэкосистемы и повышать качество и количество поступающего ОБ. (Tiemann et al., 2015; Grabau, Chen, 2016; Li et al., 2018).

Многие исследования также показали, что почвенная биота является важным экологическим фактором, оказывающим существенное влияние на процессы круговорота углерода в почве посредством группы процессов (Dungait et al., 2012; Zhang et al., 2013; Trivedi et al., 2016): перераспределения ОБ по фракциям (ПОМ, МАОМ), повышения стабильности ОБ за счет формирования агрегатов, разложения ОБ и его секвестрации. Эти процессы - ключевые факторы регулирования и стабилизации потоков углерода в надземной части почвы, они оказывают ключевое воздействие на процессы формирования ПОВ (Wardle, 2013). В работе (Zhang et al., 2021) авторы

описывают как диверсифицированные севообороты влияют на распределение углерода. В данном обзоре авторы отмечают, что подземная компонента ОВ, представленного в виде корневых остатков, корневых выделений, а также микробиома оказывает больший вклад в процесс формирования и стабилизации ПОВ, чем надземные источники ОВ, из чего следует заключить, что большее количество фотосинтетически фиксированного углерода сельскохозяйственными культурами в подземные пулы будет стимулировать образование стабильного ПОВ (Pausch, Kuzyakov, 2018; Sokol, Bradford, 2019).

В то же время, как отмечают авторы (Zhang et al., 2021), ссылаясь на более ранние работы (Kaiser et al., 2015; Pausch, Kuzyakov, 2018), основные источники углерода - поступление свежего ОВ из растительных остатков, второстепенные – поступление из элементов ризосферы и корневых экссудатов, продуктов жизнедеятельности микроорганизмов, а чистое количество углерода, поступающего в подземные пулы, в значительной степени зависит от типа растительности и типа корневой системы. По сравнению с монокультурными системами земледелия, в диверсифицированных севооборотах повышаются уровни поступления свежего ОВ в подземные структурные пулы. В работе (King, Blesh, 2018) авторы рассматривали севообороты, включающие покровные и многолетние культуры. Было установлено, что в отличие от бессменных систем земледелия, в таких севооборотах с чередованием типов корневых систем и высокой долей многолетних бобовых культур, значительно увеличиваются нормы поступления в почву ОВ за счет большего количества подземных источников углерода. Многолетние бобовые травы и травосмеси накапливают до 33 % углерода в виде подземных пулов и корневых экссудатов (Pausch, Kuzyakov, 2018). В работе (Pausch et al., 2013) авторы указывают, что данная особенность заключается в необходимости аккумулировать активный пул веществ для оптимизации ростовых процессов в весенний период. В отличие от многолетних, культуры, выращиваемые в течение одного вегетационного сезона, аккумулируют в подземных пулах около 21% фиксированного углерода, поскольку большая его часть попадает в зерно и

отчуждается из системы в процессе уборки. (Pausch, Kuzyakov, 2018). Включение многолетних трав в однолетние системы может увеличить продуктивность фитоценоза и повысить эффективность фотосинтеза культур севооборота, в основном, за счет повышения доступности азота, что в соответствии с предложенной структурой In-out (Cotrufo, 2021) и по данным авторов (Zhao et al., 2010) увеличит скорость обмена углерода надземных и почвенных пулов. Аналогичным образом, в зернопропашном севообороте с покровными культурами в почву поступает больше углерода из побегов и корней по сравнению с севооборотом без покровных культур, что связано с увеличением периода присутствия фотосинтетически активной растительности, это повышает общую биомассу, которая, в конечном итоге, возвращается в почву (King, Blesh, 2018).

В агроэкосистемах влияние разнообразия севооборота на биоразнообразие почвы может быть связано с изначально низким уровнем биоразнообразия почвенного микробиома, что приводит к низкой точке насыщения почвы углеродом и вызывает эффекты, связанные с более интенсивным протеканием процесса минерализации ОВ. В работе (McDaniel et al., 2014) авторы подчеркнули, что изменения микробной биомассы углерода не коррелируют с количеством культур в севообороте. В соответствии с этим, для усиления долгосрочных эффектов, влияющих на процессы накопления углерода, следует учитывать функциональное разнообразие растений, а не фокусироваться исключительно на межвидовом разнообразии культур в севооборотах (Wurst, Ohgushi, 2015).

Повышенный гидроморфизм, как следствие особенностей рельефа, также является важным агроэкологическим фактором, оказывающим существенное влияние на стабильность ПОВ. В отличие от автоморфных, гидроморфные и полугидроморфные почвы характеризуются уникальным сочетанием экзогенных и эндогенных факторов, что влияет на окислительно-восстановительные процессы, трансформацию и оборот органического вещества почвы, и круговорот элементов питания (Kögel-Knabner et al., 2010;

Liu et al., 2021). Динамика окислительно-восстановительных процессов и уровня pH, а также растворимость и биоразложение органических веществ сильно влияют на биогеохимию таких почв (Kögel-Knabner et al., 2010; Boye et al., 2017; Qiu et al., 2018). Периодические анаэробные условия снижают скорость разложения свежего ОВ (Lin, 2001; Qiu et al., 2018), тем самым увеличивая накопление углерода (Wang et al., 2015; Liu et al., 2016; Liu et al., 2018). При этом обработка почвы ежегодно на одну и ту же глубину также является причиной застоя воды в уплотненной зоне подпахотного горизонта, что способствует уменьшению макропор (Eickhorst, Tippkötter, 2009). При этом проникновение растущих корней в почву при наличии уплотнения затруднено и изменяет локализацию накопления ПОУ (Fabrizzi et al., 2005). Избыток воды также препятствует вертикальному росту корней большинства растений (Whitmore, Whalley, 2009). Поток O_2 к корням ограничен, что ухудшает корневое дыхание (Eavis et al., 1969). Избыток влаги препятствуют поступлению O_2 из атмосферы, микробный метаболизм переключается с аэробного на факультативный, что приводит к анаэробной ферментации ОВ.

ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования по теме диссертационной работы проведены по ряду ключевых участков на территории Среднерусской широколиственно-лесной (2023 г.), Среднерусской - лесостепной (2024 г.) и Предкавказской (2022-2024 г.) почвенных провинций. Исследуемые участки локализованы на территории Калужской области (Бабынинский р-н), Воронежской области (Каменский р-н), Ростовской области (Зерноградский р-н), Краснодарского края (Новокубанский, Мостовской р-ны), Республики Кабардино-Балкария (Терский р-н). Анализ почвенно-ландшафтных условий и описание почвенных профилей были произведены в полевых условиях в период 14.04.2022-15.08.2024.

2.1.1 Среднерусская широколиственно-лесная провинция

Исследуемый участок приурочен к центральной части Калужской области (Бабынинский район – предприятие «СП Лидер»). Территория преимущественно равнинного типа с крупными массивами эрозионных склонов и вытянутых увалов. Территория приурочена к Среднерусской широколиственно-лесной провинции серых лесных почв, Тульскому округу серых, светло-серых и тёмно-серых лесных почв (Л1 III) (Урусевская, 2020). В структуре почвенного покрова преобладают неконтрастные комбинации серых лесных и светло-серых лесных почв, их слабосмытых и среднесмытых аналогов на склонах крутизной от 2°, встречаются серые лесные поверхностно-глееватые и грунтово-глеевые почвы.

Тип рельефа – волнистая эрозионная равнина с четко выраженными водораздельными поверхностями, переходящими в склоны различной крутизны и экспозиции. Характерно усиление эрозионных процессов на склонах южной экспозиции. На рисунке 2 представлена цифровая модель рельефа для исследуемой территории, полученная путем обработки данных SRTM-global в программе SAGA-GIS с использованием алгоритма сглаживания (Vosselman, 2000), отмечены точки, в которых производился отбор проб для дальнейшего лабораторного анализа. При этом на участках было выделено два отдельных массива.

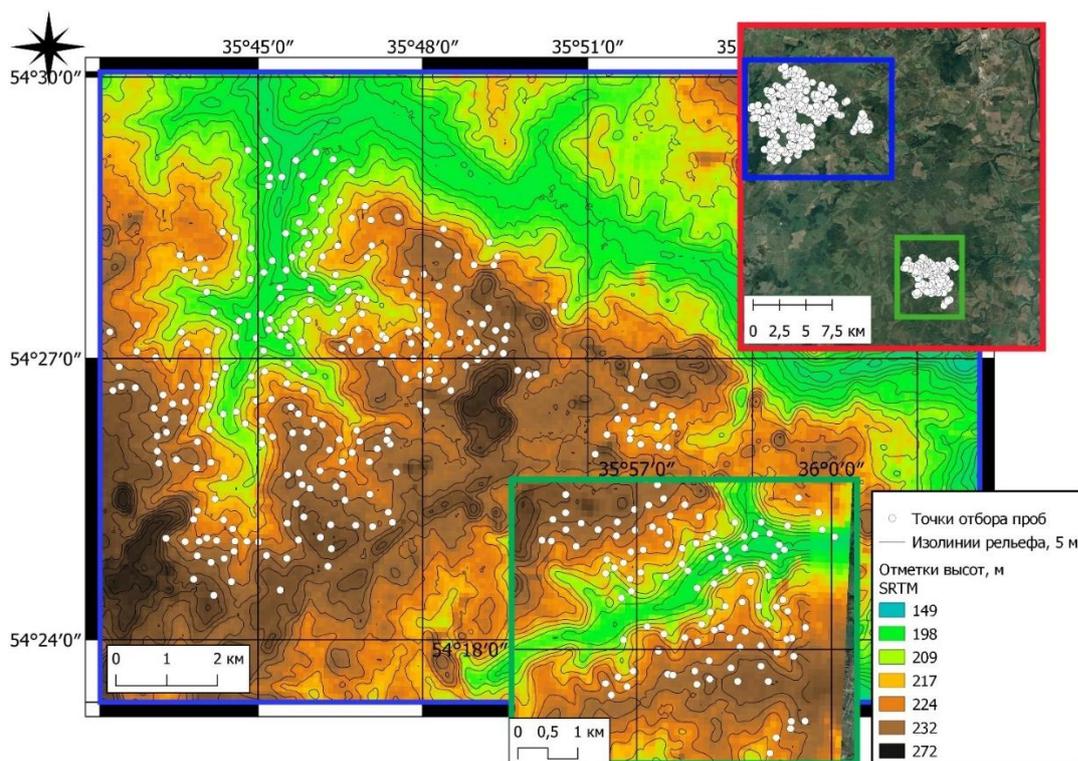


Рис.2 Цифровая модель рельефа исследуемых участков

При подсчете данных за период 1973-2022 гг. (Copernicus Climate Change Service, 2017) средняя сумма активных температур $>10^{\circ}\text{C}$, рассчитанная по датам устойчивого перехода через 10°C , составляет $2097-2252^{\circ}\text{C}$. Согласно многолетним данным (1973-2022 гг.) за год в среднем выпадает 633 мм осадков. Количество осадков за год варьирует от 344 мм до 834 мм.

Почвообразующие породы исследуемой территории представлены отложениями покровного и делювиального генетических типов. Наиболее распространенными почвообразующими породами являются покровные средние суглинки. Гранулометрический состав представлен иловато-крупнопылеватыми, песчано-крупнопылеватыми разностями. В гранулометрическом составе покровных отложений преобладают крупнопылеватые (0,05-0,01 мм) и иловатые (менее 0,001 мм) фракции. Делювиальные отложения встречаются локально, в основном, в нижних частях крупных склонов, протяженностью не менее 800-1200 м, на выположенных шлейфах.

2.1.2 Среднерусская лесостепная провинция

Исследуемый участок приурочен к территории Каменского района Воронежской области (ООО «ЦЧ АПК»). Согласно почвенно-географическому районированию (Урусевская, 2020) относится к Среднерусской лесостепной почвенной провинции чернозёмов оподзоленных, выщелоченных и типичных мощных и среднемощных, Воронежско-Борисоглебскому округу чернозёмов типичных и выщелоченных мощных и среднемощных на покровных отложениях с пятнами луговых почв, солонцов и солодей по западинам. Индекс почвенного округа - М1 V. В структуре почвенного покрова преобладают неконтрастные комбинации типичных и выщелоченных черноземов мощных и среднемощных тяжелосуглинистых на покровных отложениях. Исследуемые участки представлены на рисунке – 3.

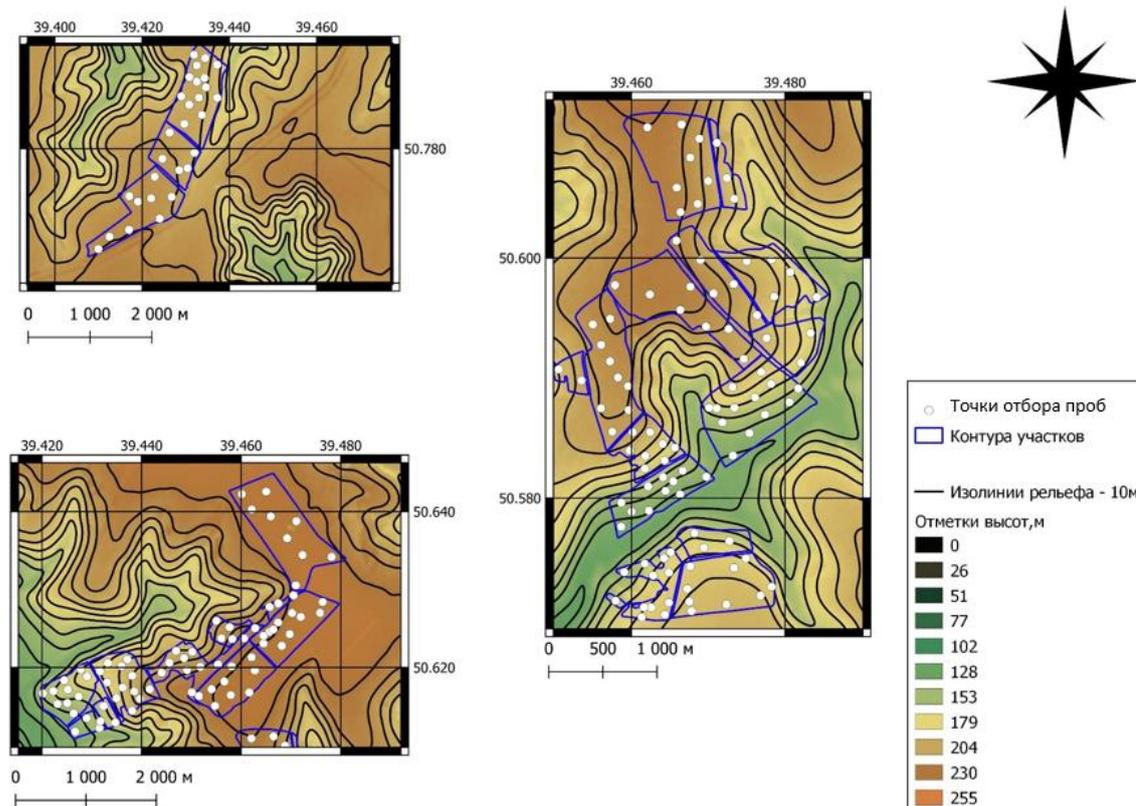


Рис.3 Цифровая модель рельефа исследуемых участков

Абсолютный максимум температуры достигает $+38,5^{\circ}\text{C}$, абсолютный минимум $-34,8^{\circ}\text{C}$. Многолетняя максимальная среднесуточная температура составляет $+31,8^{\circ}\text{C}$, наименьшая $-30,6^{\circ}\text{C}$ по данным за период 1975-2023 гг.

(Copernicus Climate Change Service, 2017) Средняя годовая температура воздуха составляет 7,4°C. При подсчете данных за период 1975-2023 гг. средняя сумма активных температур >10°C, рассчитанная по датам устойчивого перехода через 10°C, составляет 2933°C, при этом оценивая два периода осреднения 1975-2000 и 2001-2023 уровень обеспеченности последних соответствует величинам 2761° и 3128°. За год в среднем выпадает 641 мм осадков. Количество осадков за год варьирует от 422 мм (2020 г.) до 911 мм (1995 г.) (Copernicus Climate Change Service, 2017)

Исследуемая территория представляет собой волнистую равнину, расчлененную элементами гидрографической сети различной глубины и степени врезанности. Коэффициент расчленённости территории неоднородный, в южной части массива - высокий, по мере повышения уровня высотных отметок до 230 м по данным SRTM - global степень неоднородности территории снижается.

Среди генетических типов четвертичных отложений преобладают покровные суглинки. По гранулометрическому составу покровный генетический тип варьирует от тяжелосуглинистого до легкоглинистого при содержании физической глины в диапазоне от 41,2% до 61,4 %.

2.1.3 Предкавказская провинция

2.1.3.1 Краснодарский край почвенный округ Н1 IV

Исследуемые участки приурочены к территории Новокубанского (ООО «Агрокомплекс Новокубанский») и Мостовского (ИП «Чичова О.А.») районов Краснодарского края. Согласно почвенно-географическому районированию (Урусевская, 2020) исследуемые объекты принадлежат к Почвенной провинции Предкавказских чернозёмов, Майкопскому округу чернозёмов обыкновенных, типичных и выщелоченных мицелярно-карбонатных мощных и сверхмощных малогумусных, чернозёмов слитых, лугово-чернозёмных выщелоченных и буровато-серых и буровато-тёмно-серых лесных почв глинистых и суглинистых на аллювиальных, пролювиальных и делювиальных отложениях. Индекс почвенного округа - Н1 IV. В структуре почвенного покрова участка

локализованное на территории Новокубанского района преобладают неконтрастные комбинации типичных черноземов (фациальный подтип – очень теплые кратковременно промерзающие) сверхмощных и мощных, на территории Мостовского района контрастные комбинации черноземов выщелоченных (фациальный подтип – очень теплые кратковременно промерзающие) различной степени смывтости и луговато-черноземных почв.

Коэффициент расчленённости территории (Кирюшин, 2005) исследуемых участков в Новокубанском районе – слабый, в Мостовском районе – средний. На полях встречаются элементы микрорельефа: западины и ложбино-образные понижения, которые играют роль в локальном перераспределении влаги. Участки, локализованные на территории Новокубанского района, приурочены к поверхности вытянутого увала с уклоном до 1° . Исследуемая территория в Мостовском районе с точки зрения макрорельефа относится к типу предгорных преимущественно элювиально-делювиальных равнин, в основном, включает в себя крупные массивы склонов и поверхностей с уклоном до 1° . Комплекс типов мезорельефа включает в себя ландшафтные катены с перепадами высот до 50-80 м. Учитывая литологическое строение, а также особенности проявления процессов гидроморфизма и водной эрозии, согласно природно-сельскохозяйственному районированию СССР, территория относится к волнисто-увалистым глинистым и суглинистым, местами щебневатым равнинам, наклонной и слабонаклонной части левокубанской аллювиальной и делювиальной равнины (Кирюшин, 2005).

На участке в Мостовском районе водораздельные поверхности занимают около 20% площади. Частично встречаются элементы микрорельефа: микропонижения, западины и ложбинообразные понижения. Основную площадь занимают участки, расположенные на склонах и выположенных шлейфах. Склоны с уклонами $2-3^\circ$ и $3-5^\circ$ приурочены к западному и северо-западному массиву исследуемых участков. Точки заложения почвенных разрезов и отбора проб представлены на рисунке 4.

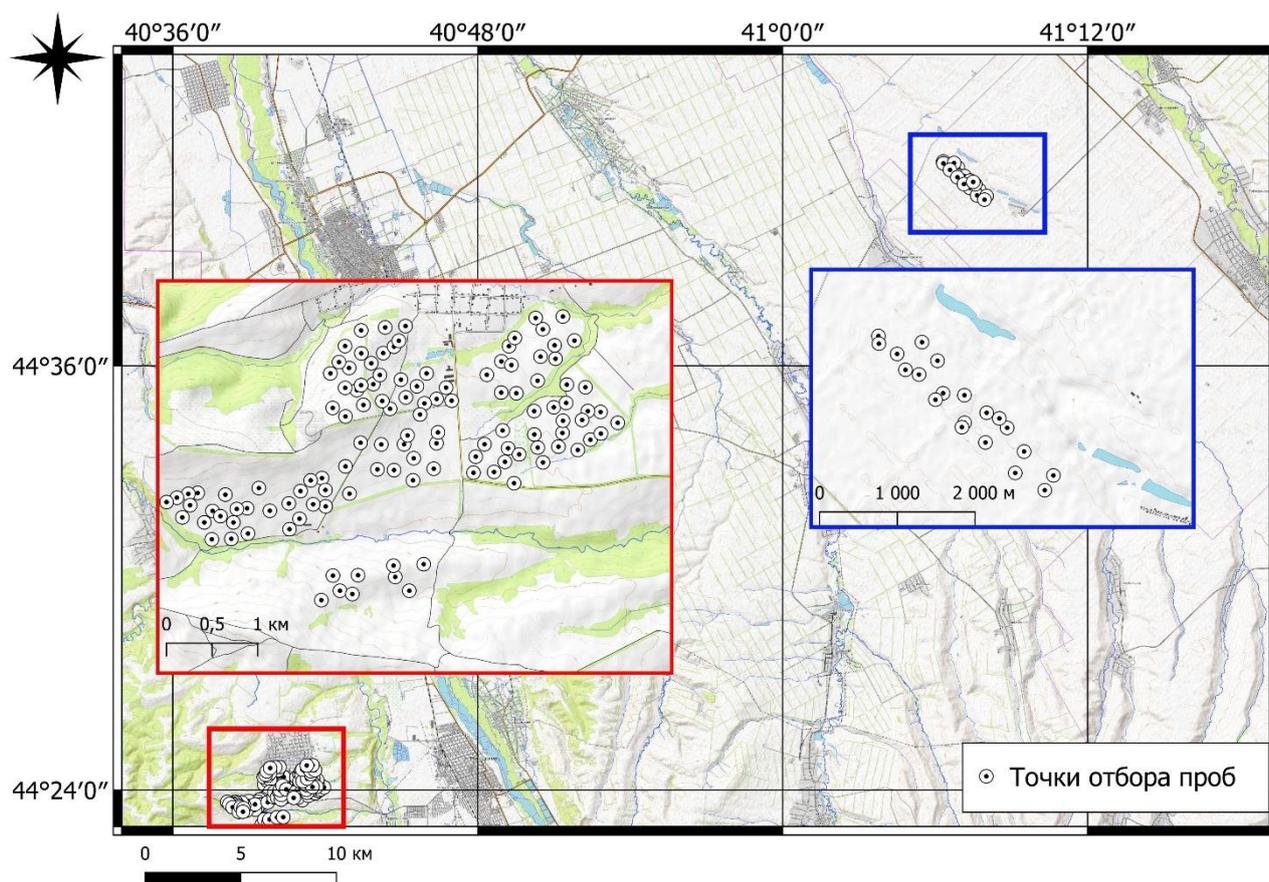


Рис.4 Исследуемые участки округ Предкавказская провинция

Территория расположена в умеренном климатическом поясе с умеренно континентальным типом климата. Основным фактором, обуславливающим особенность климата, является локализация в передгорной местности и близость Черного моря, что существенно сказывается на количестве выпадающих осадков: в среднем 600 мм на территории Новокубанского района и 850-1000 на территории Мостовского (Copernicus Climate Change Service, 2017).

Годовая амплитуда температур составляет в среднем 23°C, достигая в некоторые годы 28°C. (Copernicus Climate Change Service, 2017) Абсолютный максимум температуры достигает +37,1°C, абсолютный минимум -24,1°C. По данным за период 1973-2023 гг. максимальная среднесуточная температура составляет +29,4°C, наименьшая -19,3°C, за год в среднем выпадает 600 мм осадков на равнинной территории и 820 мм в предгорьях. Количество осадков варьирует от 415 мм (2020 г.) до 1039 мм (2021 г.)

Почвообразующие породы на исследуемой территории объединяются в следующие группы по генетическим типам отложений: лёссовидные, делювиальные, элювиальные. Лёссовидные тяжелые суглинки и глины распространены как почвообразующие породы на территории Новокубанского района. Содержание физической глины варьирует в пределах 45-59%, преобладает фракция крупной пыли. Делювиальные суглинки и глины залегают на склонах в Мостовском районе. На исследуемой территории представлены, в основном, в западной части на склоновых землях и шлейфах склонов. Элювиальные отложения характеризуются большей степенью однородности и сортированностью материала. Распространены в западном массиве полей на участке в Мостовском районе. Благодаря высокому содержанию мелкой и средней пыли, а также частиц ила, элювиальные суглинки и глины характеризуются низкой водопроницаемостью. Содержание физической глины в элювиальных и делювиальных отложениях в Мостовском районе варьирует в пределах 42,2 – 59,8%.

2.1.3.2 Ростовская область почвенный округ Н1 II

Исследуемые участки локализованы в Зерноградском районе Ростовской области (ЗАО «СКВО»). Согласно почвенно-географическому районированию (Урусевская, 2020). территория принадлежит к почвенной провинции Предкавказских чернозёмов обыкновенных и южных мицелярно-карбонатных мощных и сверхмощных малогумусных, Азово-Кубанскому округу чернозёмов обыкновенных мицелярно-карбонатных глинистых и тяжелосуглинистых на лёссовидных отложениях. Индекс почвенного округа - **Н1 II**.

Территория расположена в южной части Русской равнины. С точки зрения макрорельефа участок относится к типу скульптурных или эрозионных, в основном включает в себя крупные массивы склонов. Комплекс типов мезорельефа представлен двумя крупными увалами в южной и восточной части - смыкающихся и образующих общий водораздельный узел. На участках часто встречаются элементы микрорельефа: западины и ложбинообразные понижения. Основную площадь занимают участки, расположенные на

субгоризонтальных поверхностях с уклоном около 1° , часть исследуемых участков приурочена к склонам крутизной $3-5^\circ$. Точки отбора проб и цифровая модель рельефа представлены на рисунке – 5.

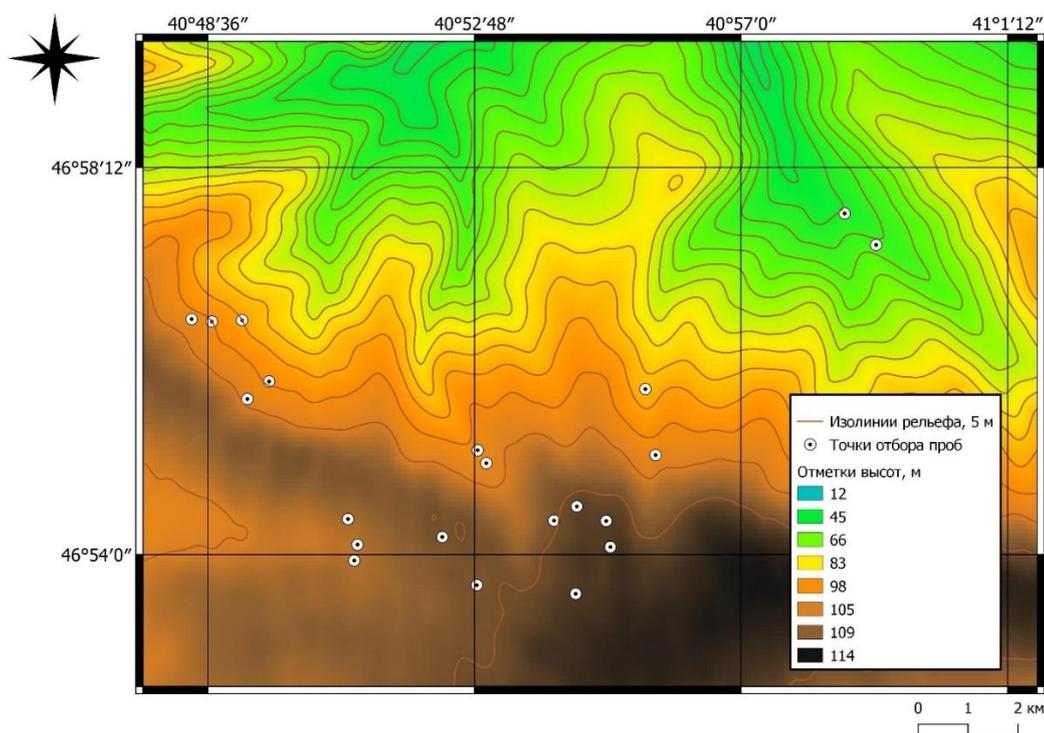


Рис.5 Исследуемые участки округ Н1 II

Территория расположена в умеренном климатическом поясе, атлантико-континентальной европейской области с умеренно континентальным типом климата, который характеризуется недостаточным увлажнением. Годовая амплитуда температур составляет в среднем 29°C , достигая в некоторые годы $33-37^\circ\text{C}$ (Copernicus Climate Change Service, 2017). Максимальные среднемесячные амплитуды температур достигают $28-30^\circ\text{C}$ при средних $15-20^\circ\text{C}$. Согласно многолетним данным (2001-2021 гг.) за год в среднем выпадает 540 мм осадков. Количество осадков за год варьирует от 368 (2007 г.) до 715 (2021 г.) мм.

Почвообразующие породы представлены в основном тяжелыми лёссовидными суглинками и глинами, характеризующимися желто-палевой окраской, неплотным сложением, большой порозностью и содержанием фракций крупной пыли в среднем в пределах 25%. В структуре почвенного покрова преобладают неконтрастные комбинации черноземов обыкновенных

(фациальный подтип – очень теплые кратковременно промерзающие) среднемощных и их слабосмытых аналогов.

2.1.3.3 Республика Кабардино-Балкария почвенный Округ Н1 VI

Исследуемые участки локализованы в Терском районе Республики Кабардино-Балкария. Согласно почвенно-географическому районированию (Урусевская, 2020). территория принадлежит к почвенной провинции Предкавказских чернозёмов обыкновенных и южных мицелярно-карбонатных мощных и сверхмощных малогумусных, Грозненскому округу чернозёмов обыкновенных и выщелоченных мицелярно-карбонатных, луговых и лугово-чернозёмных карбонатных почв глинистых и тяжелосуглинистых на аллювиальных, пролювиальных и делювиальных отложениях Индекс почвенного округа - Н1 VI. Точки отбора проб представлены на рисунке – 6.



Рис.6 Точки отбора почвенных проб

Образцы почв были отобраны из агроландшафтов Республики Кабардино-Балкария (КФХ Бариев). Комплекс типов мезорельефа включал в себя участки пологих склонов южной экспозиции, в слабой степени подверженных

процессам водной эрозии. Перепад высот составляет 170-180 м (Farr et al., 2007). Основные почвообразующие породы - лессовидные тяжелые суглинки. В структуре почвенного покрова преобладают комбинации черноземов обыкновенных (фациальный подтип – очень теплые кратковременно промерзающие) и их смытых аналогов, по понижениям локально встречаются луговато-черноземные почвы. Общее количество точек отбора проб 47 шт.

Территория расположена в умеренном климатическом поясе с умеренно континентальным типом климата, с высоким потенциалом теплообеспеченности и низкими амплитудами температур. В соответствии со среднемноголетними метеоданными: абсолютный максимум температуры достигает +39,2°C, абсолютный минимум -29,7°C. Многолетняя максимальная среднесуточная температура составляет +32,6°C, наименьшая -22,8°C по данным за период 1977-2023 гг. Средняя годовая температура воздуха составляет 11,1°C. (Copernicus Climate Change Service, 2017) Среднемноголетняя сумма осадков, выпадающих за вегетационный период, варьирует в диапазоне от 266 мм до 627 мм при среднем значении 452 мм.

Поверхности с уклоном менее 1° занимают основную площадь исследуемой территории. Встречаются элементы микрорельефа: микропонижения, западины и ложбинообразные понижения. Перепады высот на исследуемых участках 172-180 м.

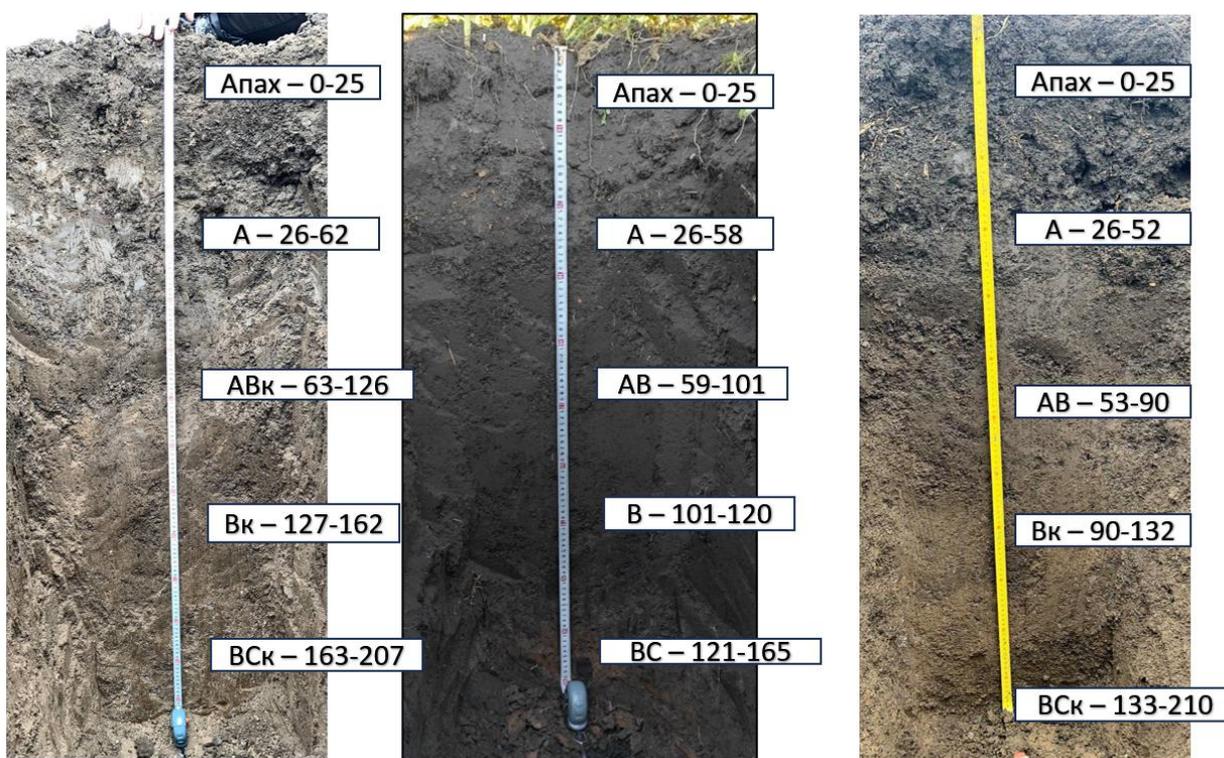
Обследуемая территория принадлежит к северной части Кабардинской равнины и относится к области аккумулятивных равнин Терско-Кумской впадины. Поверхностно дочетвертичные образования полностью перекрыты современными. На всей исследуемой территории в качестве основных почвообразующих пород выступают лессовидные тяжелые суглинки.

2.2 Почвенные условия

В рамках проведения исследований ряд ключевых участков был выбран на территории: Предкавказской, Среднерусской широколиственно-лесной, Среднерусской лесостепной почвенных провинций. На территории Новокубанского района ключевой участок общей площадью 30 га, почвенный

покров представлен неконтрастными комбинациями черноземов типичных (фациальный подтип – очень теплые кратковременно промерзающие) среднемощных и мощных тяжелосуглинистых на тяжелых лессовидных суглинках. Участки приурочены преимущественно к плоским водораздельным поверхностям, перепады высот в пределах 1 м, все почвы с точки зрения типизации земель классифицируются как плакорная агроэкологическая группа (Кирюшин, 2005).

На территории Мостовского района Краснодарского края площадь исследуемых участков составляла 499 га. С точки зрения структуры почвенного покрова преобладают преимущественно контрастные комбинации черноземов, выщелоченных (фациальный подтип – очень теплые кратковременно промерзающие) и черноземов выщелоченных (фациальный подтип – очень теплые кратковременно промерзающие) различной степени смытости от слабосмытых до сильносмытых среднемощных и мощных тяжелосуглинистых и легкоглинистых с луговато-черноземными мощными и сверхмощными тяжелосуглинистыми и легкоглинистыми почвами. С точки зрения геоморфологического строения участки приурочены к склонам крутизной от 2° до 7°, почвообразование протекает преимущественно на делювиальных и пролювиальных отложениях с высоким содержанием фракций мелкой и средней пыли. Все нижние (транс-аккумулятивные) части склонов испытывают существенное переувлажнение за счет избыточного поверхностного стока. В нижних частях склонов распространены луговато-черноземные почвы склонные к поверхностному коркообразованию при пересыхании.



К 1977 – Чернозем типичный сверхмощный легкоглинистый на легкоглинистых лессовидных отложениях
К 2008 – Агрочернозём миграционно-мицелярный сверхмощный глубокопахотный легкоглинистый на легкоглинистых лессовидных отложениях
WRB – Chernozem Naplic Clayic Hypereutric

К 1977 – Луговато-черноземная мощная среднегумусная легкоглинистая на легкоглинистых лессовидных отложениях
К 2008 - Агрочернозём глинисто-иллювиальный глееватый мощный глубокопахотный легкоглинистый на легкоглинистых лессовидных отложениях
WRB – Phaeozem Gleyic

К 1977 – Чернозем выщелоченный мощный тяжелосуглинистый на легкоглинистых делювиальных суглинках
К 2008 – Агрочернозём глинисто-иллювиальный мощный глубокопахотный легкоглинистый на легкоглинистых лессовидных отложениях
WRB – Chernozem Luvic Loamic Colluvic

Рис. 7 Морфологическое строение типовых почвенных профилей Н1 IV

На территории Зерноградского района Ростовской области площадь исследуемая площадь составила 107 га. На участке преобладают неконтрастные комбинации черноземов обыкновенных (фациальный подтип – очень теплые кратковременно промерзающие) среднемощных тяжелосуглинистых на тяжелых лессовидных суглинках их слабосмытых и среднесмытых аналогов и луговато-черноземных почв среднемощных и мощных тяжелосуглинистых на тяжелых лессовидных суглинках. Черноземы обыкновенные (фациальный

подтип – очень теплые кратковременно промерзающие) и луговато-черноземные почвы распространены преимущественно на субгоризонтальных поверхностях, приуроченных к вершинам вытянутого с запада на восток увала. Проявлению луговатости способствует наличие замкнутых понижений и вытянутых ложбин с перепадами высот до 0,5 м на территории с уклоном менее 1°, что обуславливает формирование локальных участков накопления поверхностной влаги, особенно в весенний период. Эрозионные участки локализованы в восточной части массива и приурочены к склонам крутизной 2-4°.

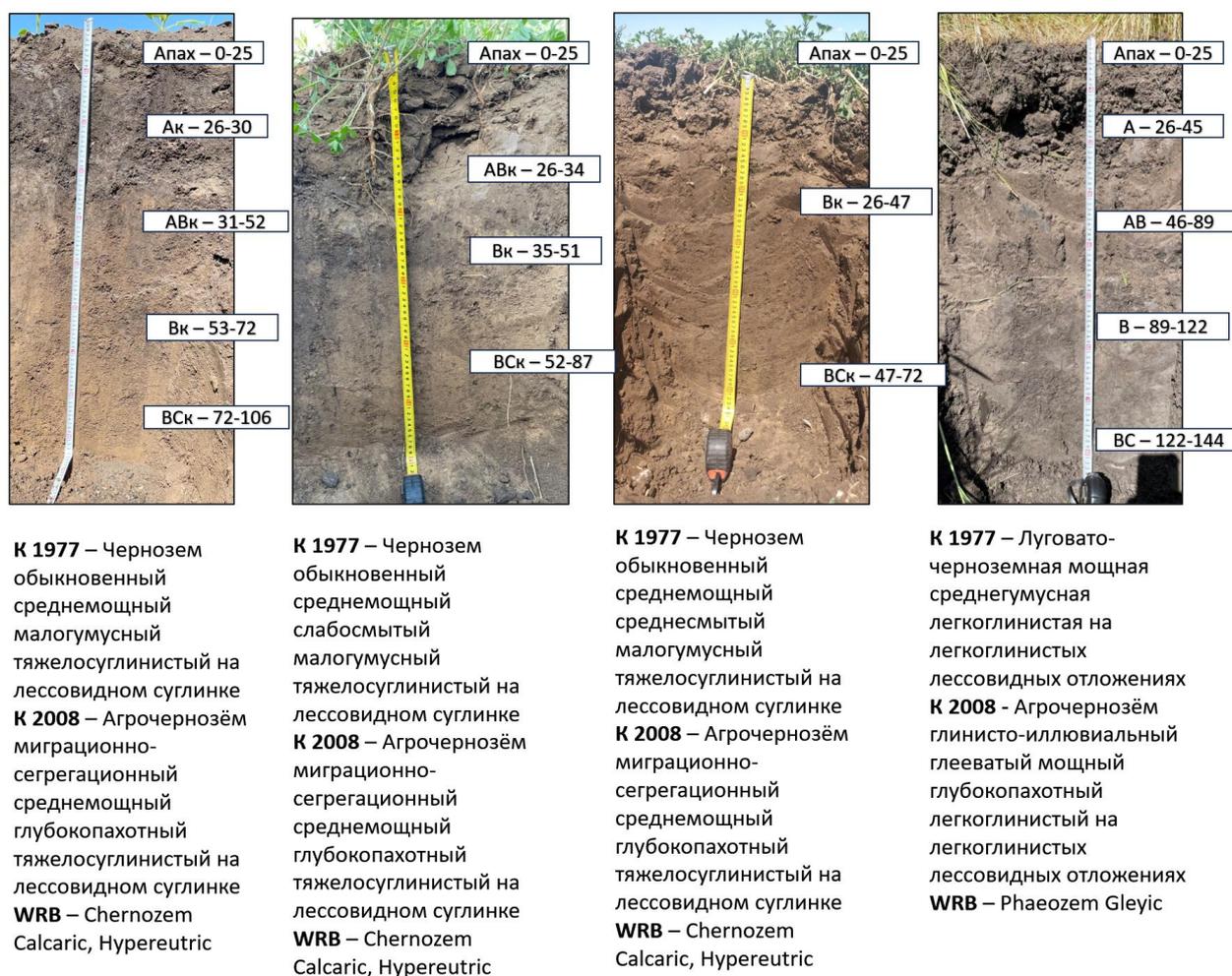
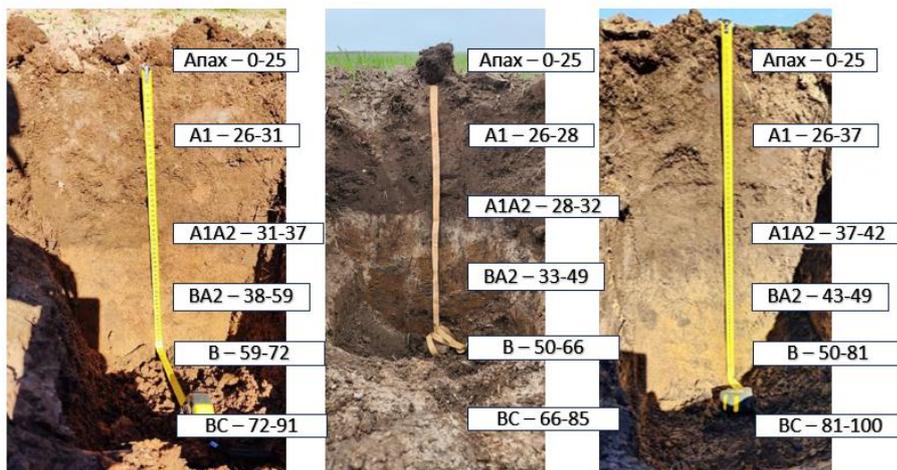


Рис. 8 Морфологическое строение типовых почвенных профилей Н1 II

На территории Терского района Республики Кабардино-Балкария площадь исследуемого участка составляла 113 га. Преобладают неконтрастные комбинации черноземов обыкновенных (фациальный подтип – очень теплые кратковременно промерзающие) среднемошных тяжелосуглинистых на

тяжелых лессовидных суглинках их слабосмытых и среднесмытых аналогов и луговато-черноземных почв среднемощных и мощных тяжелосуглинистых на тяжелых лессовидных суглинках.

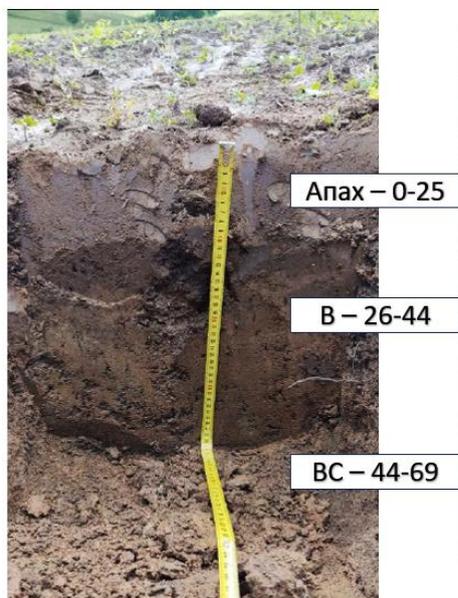
На территории Бабынинского района Калужской области исследуемая площадь составляла 3663 га. В юго-восточном массиве участки приурочены преимущественно к склонам с крутизной 2-4°. В массиве преобладают неконтрастные комбинации серых лесных и светло-серых лесных почв среднемощных среднесуглинистых на среднесуглинистых покровных отложениях, их слабо и среднесмытых аналогов и серых лесных поверхностно-и грунтово-глееватых почв. Серые лесные поверхностно-глееватые и грунтово-глеевые распространены преимущественно на шлейфах склонов и в замкнутых понижениях, которые в весенний период склонны к накоплению избыточного количества влаги. На склонах встречаются как слабосмытые, так и сильносмытые аналоги серых лесных почв, эрозионные участки преобладают в центральной части исследуемого массива. В северо-западном массиве с точки зрения геоморфологического строения преобладают склоны крутизной 2-5°, существенная часть участка представлена в виде неконтрастных комбинаций серых лесных почв различной степени смытости от слабосмытых до сильносмытых.



К 1977 – Серая лесная среднетощая среднетугумсная среднесуглинистая на покровных средне суглинистых отложениях
К 2008 – Агросерая среднетощая среднетугумсная среднесуглинистая на покровных среднесуглинистых отложениях
WRB –Luvisol Eutric

К 1977 – Светло серая лесная среднетощая среднетугумсная намытая среднесуглинистая на покровных средне суглинистых отложениях
К 2008 – Агросерая среднетощая среднетугумсная среднесуглинистая на покровных среднесуглинистых отложениях
WRB – Albic Luvisol Eutric

К 1977 – Серая лесная среднетощая среднетугумсная среднесуглинистая на покровных средне суглинистых отложениях
К 2008 – Агросерая среднетощая среднетугумсная среднесуглинистая на покровных среднесуглинистых отложениях
WRB –Luvisol Eutric



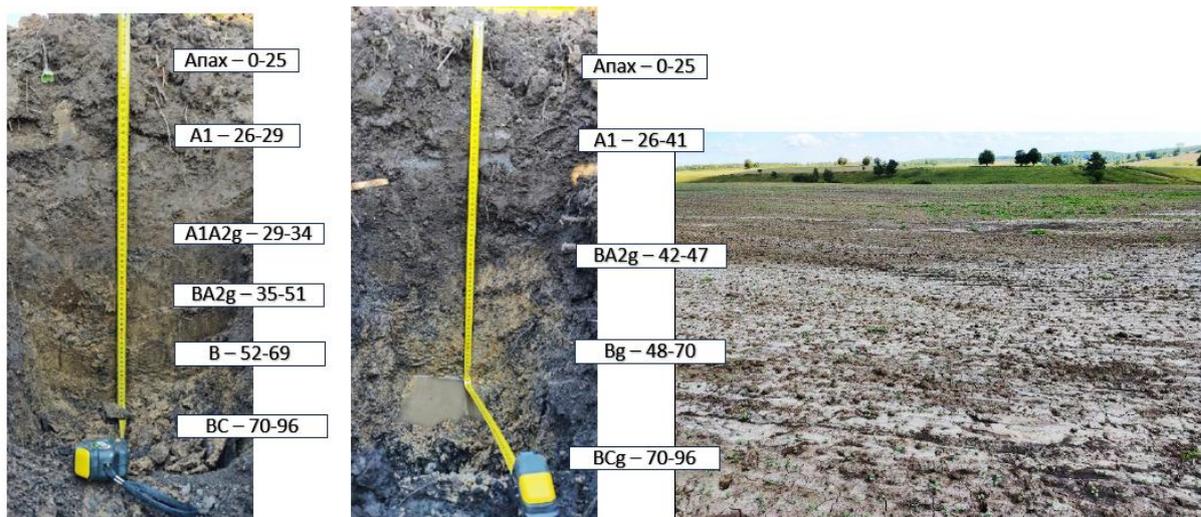
К 1977 – Серая лесная среднетощая среднетугумсная среднесуглинистая на покровных средне суглинистых отложениях
К 2008 – Агросерая среднетощая среднетугумсная среднесуглинистая на покровных среднесуглинистых отложениях
WRB –Luvisol Eutric Truncated



Обнажение горизонта BA2 и B на смытых участках при проведении отвальной вспашки с оборотом пласта характерное для группы среднетощих серых лесных почв с мощностью A1 < 20 см



Рис. 9 Морфологическое строение типовых почвенных профилей Л1 Ш



К 1977 - Серая лесная
поверхностно глееватая
среднемощная
среднегумусная
среднесуглинистая на
среднесуглинистых покровных
отложениях

К 2008 – Агросерая глееватая
среднемощная
среднепахотная
среднесуглинистая на
покровных среднесуглинистых
отложениях

WRB - Luvisol Gleyic, Eutric,
Loamic

К 1977 - Серая лесная
грунтово-глееватая мощная
среднегумусная
среднесуглинистая на
среднесуглинистых покровных
отложениях

К 2008 – Агротемногумусовая
глееватая среднепахотная
среднесуглинистая на
покровных среднесуглинистых
отложениях

WRB - Luvisol Gleyic, Eutric,
Loamic

Блюдцеобразное понижение
на вершине водораздела
аккумулирующее повышенное
количество влаги, перепад
высот до 50-70 см

Рис. 10 Морфологическое строение типовых почвенных профилей Л1 III

В Каменском районе Воронежской области площадь исследуемых участков составила 900 га. Преобладают неконтрастные комбинации черноземов выщелоченных и типичных среднемощных и мощных тяжелосуглинистых на тяжелых покровных суглинках, их слабосмытых и среднесмытых аналогов и луговато-черноземных почв среднемощных и мощных тяжелосуглинистых на тяжелых лессовидных суглинках. Эрозионные участки локализованы в южной части массива и приурочены к склонам крутизной 2-7°.

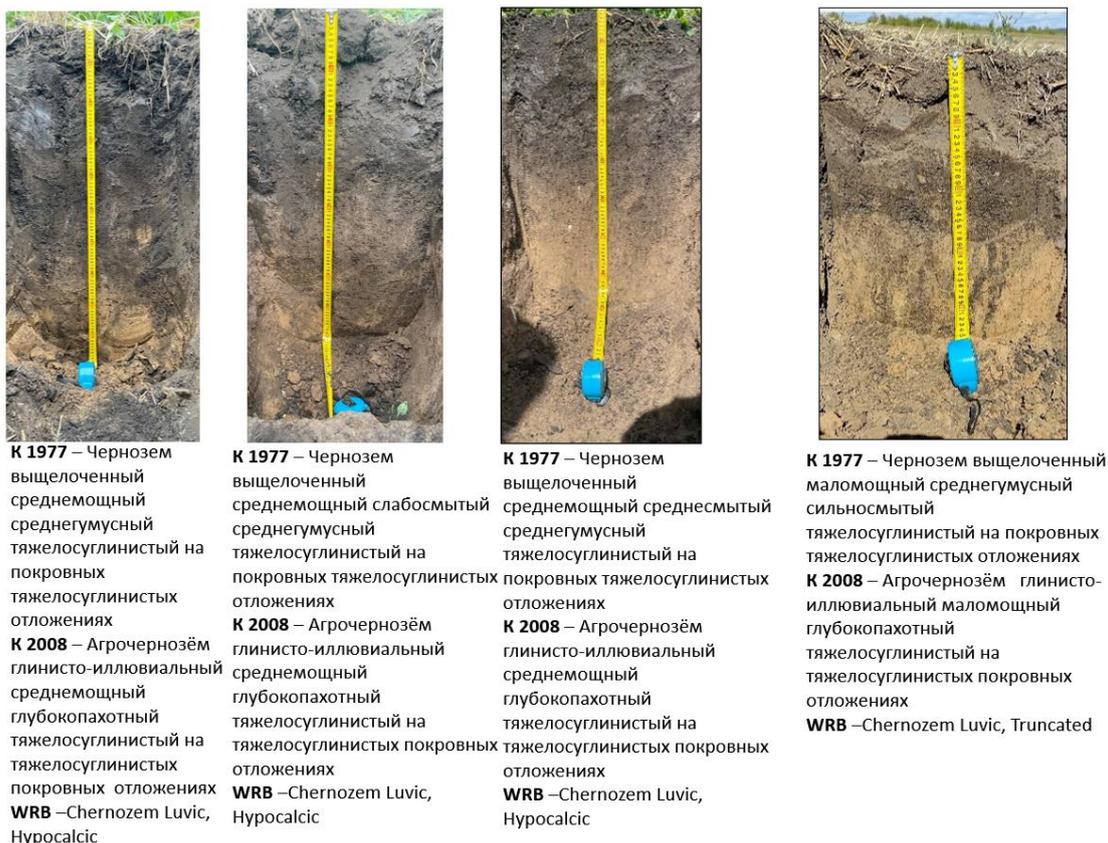


Рис. 11 Морфологическое строение типовых почвенных профилей М1 V

В соответствии с методикой агроэкологической оценки земель, предложенной в работе (Кирюшин, 2005), почвы были типизированы по агроэкологическим группам, типизация представлена на рисунке – 12



Рис. 12 Типизация почв по агроэкологическим группам с учетом почвенных кругов

Типизация почв произведена с учетом интенсивности проявления агроэкологических факторов. Выделены три основные агроэкологические группы: плакорные – представленные зональным типом почв, эрозийные – представленные смытыми аналогами зональных типов, полугидроморфные – представленные переувлажненными аналогами зональных почв (луговатых, глееватых). Дальнейшая группировка отобранных проб по подвыборкам также произведена с учетом типизации по агроэкологическим группам.

Образцы почв были отобраны в рамках проведения почвенно-ландшафтных обследований территории сельскохозяйственных предприятий включая: СП «Лидер» (Калужская область), ООО «ЦЧ АПК» (Воронежская область), ООО «Агрокомплекс новокубанский» и ИП «Чичова» (Краснодарский край), ЗАО «СКВО» (Ростовская область), КФХ «Бариев» (Республика Кабардино-Балкария)

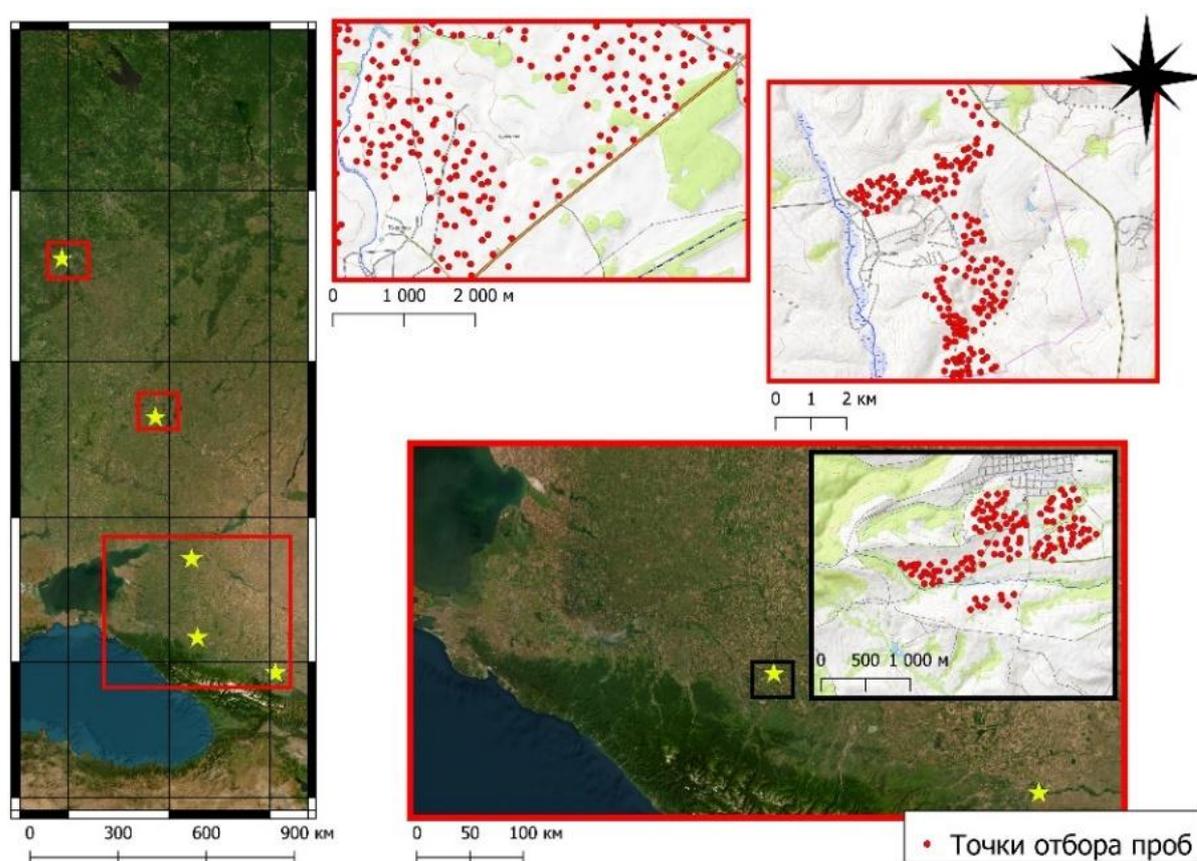


Рис. 13 Локализация исследуемых участков

Для обеспечения сопоставления агрогенно-преобразованных почв с условно-естественным состоянием, для каждого исследуемого участка были

заложены дополнительные почвенные разрезы на прилегающих территориях, не вовлечённых в сельскохозяйственное использование и сохранивших естественную (или квазиестественную) растительность. В дальнейшем такие участки рассматриваются как «фоновые», то есть условно принятые в качестве референтных по отношению к агроценозам.

В Калужской области (п. Тырново) почвы в условно-естественном состоянии сформированы под широколиственным лесом с преобладанием *Quercus robur* (дуб черешчатый), *Acer platanoides* (клён платановидный), *Betula pendula* (берёза повислая). В Краснодарском крае, Новокубанском районе, разрезы заложены в пределах лесополос по периметру агроландшафта, где доминируют: *Ulmus pumila* (вяз приземистый), *Acer negundo* (клён ясенелистный), *Populus nigra* (тополь чёрный). В Краснодарском крае, Мостовском районе (п. Беноково) фоновый участок приурочен к вытянутому водоразделу, помыкающему к агроландшафтам. Растительность соответствует лугово-степным сообществам предгорных равнин Западного Кавказа, где распространены *Stipa capillata* (ковыль волосатик), *Festuca valesiaca* Gaudin (овсяница валисская), *Elytrigia repens* (пырей ползучий), *Trifolium pratense* (клевер луговой). В Ростовской области, Зерноградском районе (п. Путь Правды) разрезы заложены на необрабатываемом участке, примыкающем к водораздельному склону северной экспозиции, где произрастает разнотравно-типчаково-ковыльная ассоциация с доминированием *Stipa lessingiana* (ковыль Лессинга), *Galium verum* (подмаренник настоящий), *Salvia pratensis* (шалфей луговой), *Artemisia lerchiana* (полынь Лерха). В Кабардино-Балкарии (п. Хамидие) фоновый участок расположен на вытянутом увале, переходящем в склон к реке Куруп. Растительность представлена ковыльно-злаковой ассоциацией предгорных равнин с преобладанием *Stipa caucasica* (ковыль кавказский), *Stipa pulcherrima* (ковыль красивейший), *Poa pratensis* (мятлик луговой). Общее число наблюдений по участкам составило 592 ед. (n=592).

2.3 Используемые термины и классификации

В соответствии с тем, что в области исследований ПОВ накоплен объемный массив различных подходов и методов оценки, существует большое количество терминов и определений, которые могут быть весьма похожи, но интерпретируют совершенно разные категории. (Холодов, 2023). К примеру, «легкоразлагаемое органическое вещество» по (Борисов, 2008) отчасти эквивалентно термину «легкая гранулоденситометрическая (аналогично денситометрическая, если не производилось выделения целевой фракции по размеру) фракция ОВ» используемым в работах (Young, 2005, Golchin, 1994) и как отмечено в ряде работ (Прохоров, 2023; Прохоров, 2024) не совсем корректно причислять данную фракцию к «легкоразлагаемому» ОВ, т.к. категория «потенциала минерализации» напрямую связана с качеством органического вещества, с содержанием в ней азота и соотношения C:N. Легкая фракция часто может быть им обеднена, и его содержание напрямую будет зависеть от качества поступающих растительных остатков, типов возделываемых культур.

Аналогично активное органическое вещество, фракция РОХС в зарубежной литературе «Active carbon» (Weil, 2003) или перманганатокисляемый углерод была выделена в работе (Culman, 2021) как чувствительный маркер качества почв, хотя в работе (Margenot, et al, 2023) предположили, что данная фракция не отражает «активность» системы ПОВ. При этом в монографии (Семенов, Когут, 2015) под «активным ОВ», в соответствии с пуловой моделью, предполагается континуум органических соединений с минимальным временем оборота в почве (1-2 года)

В рамках настоящего исследования в главе №5 были использованы следующие термины определения:

«Активное ОВ», «процессные пулы ОВ» применяются при анализе наиболее подвижных в том числе «легкоокисляемых» органических веществ фракции перманганатокисляемого углерода РОХС, определяемых в соответствии с протоколом (Culman, 2021) и его адаптированной версией

(Прохоров, 2024) и фракции органического вещества, не связанного прочно с минеральной массой почвы (По Борисову – ЛОВ, Артемьева – ЛФ_{св} < 1.6 г/см³, Cotrufo – POM, Jon Y. – f.POM), протокол выделений используемый в работе приведен в разделе 2.5, а также описан (Golchin, 1994). Для легкой денситометрической фракции используется сокращение LF < 1.6 г/см³.

Углерод процессных пулов или углерод легкой фракции C_{LF} определялся как содержание C_{total} на автоматическом газ-анализаторе VARIO-9000 после выделения фракций в плотной среде йодистого калия.

Термины «бихроматооксиляемая фракция ОВ», «окисляемый органический углерод» и сокращения «C_{орг}» применимы к определению оксидиметрической фракции углерода гумуса определяемого методом Тюрина в модификации Симакова (протокол представлен в разделе 2.5).

Углерод структурных пулов или *углерод тяжелой фракции* C_{HF} определялся как содержание C_{total} на автоматическом газ-анализаторе VARIO-9000 после отделения от массы почвы дискретного вещества легкой денситометрической фракции. Тяжелая фракция HF > 1.6 г/см³ выделялась как остаток после отделения LF < 1.6 г/см³.

Названия почв были присвоены в соответствии с классификацией почв СССР 1977 г. (КиД Почв СССР, 1977) классификацией почв России 2008 г. и международной классификацией WRB в редакции от 2022 года. При проведении анализа почвы разных провинций были объединены в агроэкологические группы в соответствии с методикой агроэкологической оценки земель, представленной в работе (Кирюшин, 2005). Агроэкологические группы почв (как указано в главе №2) представлены плакорной: черноземы обыкновенные, черноземы типичные, черноземы выщелоченные, серые лесные и светло серые лесные; эрозионной группой, представленной эрозионными аналогами зональных почв, полугидроморфной группой – луговато-черноземные почвы и серые лесные поверхностно глееватые и грунтово-глеевые (Кирюшин, 2005).

2.4 Характеристика полевых методов исследования

Полевые исследования и отбор почвенных проб производились в рамках проведения работ по почвенно-ландшафтному обследованию на территории сельскохозяйственных предприятий в течение четырех полевых сезонов 2021-2024 г.

В полевых условиях производились:

1) Заложение и морфологическое описание почвенных разрезов. Количество точек закладывалось в соответствии со сложностью и пестротой почвенного покрова. В полевых условиях определялось полное классификационное название, оценивалась степень смывости, наличие избыточного гидроморфизма. С помощью почвенного бура (фирмы Eijkelkamp) на гидроморфных участках определялся уровень грунтовых вод.

2) Определение плотности почвы проведено для ключевых участков при помощи цилиндра объемом 250 см³ в 3-кратной повторности (Вадюнина, Корчагина, 1986).

3) Отбор почвенных образцов для проведения лабораторных измерений проводился на всех изучаемых объектах. Образцы почв отбирали из верхнего 0-25 см слоя. Образцы отбирались в полиэтиленовые пакеты и затем высушивались при комнатной температуре. Воздушно-сухие образцы использовались для определения общих физико-химических свойств почв. Отбор проб производился в точках с привязкой по GPS для визуализации на карте, проба из слоя 0-25 см для выделенного элементарного участка.

4) Для оценки фоновых-референтных параметров относительно почв агроландшафтов пробы почв также отбирались с фоновых условно-референтных участков (подробное описание представлено в главе 2 п. 2.2).

2.5 Характеристика лабораторных методов исследования

В пробах почв определяли ряд ключевых показателей состояния органического вещества: содержание бихромат-окисляемой фракции путем мокрого озоления пробы в присутствии K₂Cr₂O₇: H₂SO₄ (1:1) в соответствии с методом Тюрина в модификации Симакова с нагреванием в сушильном шкафу

при температуре 150° и последующем фотометрическим определением концентрации вступившего в реакцию окислителя.

Выход легкой фракции $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$ определяли с использованием протокола (Golchin, 1994). Таким образом, почва, просеянная через сито, диаметром $< 2 \text{ мм}$ была разделена на лёгкую фракцию ($LF < 1.6 \text{ г/см}^3$) и тяжёлую фракцию ($HF > 1.6 \text{ г/см}^3$) только по плотности с использованием раствора йодистого калия при плотности 1.60 г/см^3 . Выбор порога плотности на уровне 1.60 г/см^3 основан на рекомендациях (Cerli, 2012), которые показали, что это наиболее подходящая плотность для разделения максимального содержания LF и минимизации загрязнения фракции LF минералами.

Раствор йодистого калия был скорректирован до плотности 1.60 г/см^3 . Высушенные и просеянные образцы почвы ($< 2 \text{ мм}$) помещали в центрифужные пробирки и заливали свежеприготовленным раствором (почва : раствор 1 : 5; 8 г почвы : 40 мл раствора) затем центрифугированы при 4500 оборотах/мин в течение 10 минут. Материал $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$ собирался путём аккуратного удаления плавающего материала и последующей фильтрации с использованием стекловолоконных фильтров. Материал LF промывали деионизированной водой до достижения уровня удельной электрической проводимости раствора $< 5 \text{ мкСм}$, чтобы удалить остаточный йодистый калий. Для отмывки фракции от раствора йодистого калия использовали вакуумную фильтрацию и последующую сушку при температуре 60°C . Оставшийся почвенный материал с плотностью $> 1.6 \text{ г/см}^3$ (HF) промывался деионизированной водой после центрифугирования до снижения уровня до достижения уровня удельной электрической проводимости раствора $< 5 \text{ мкСм}$. Образцы почвы были фракционированы в трёхкратных экземплярах, а веса фиксировались для определения восстановления процедуры фракционирования.

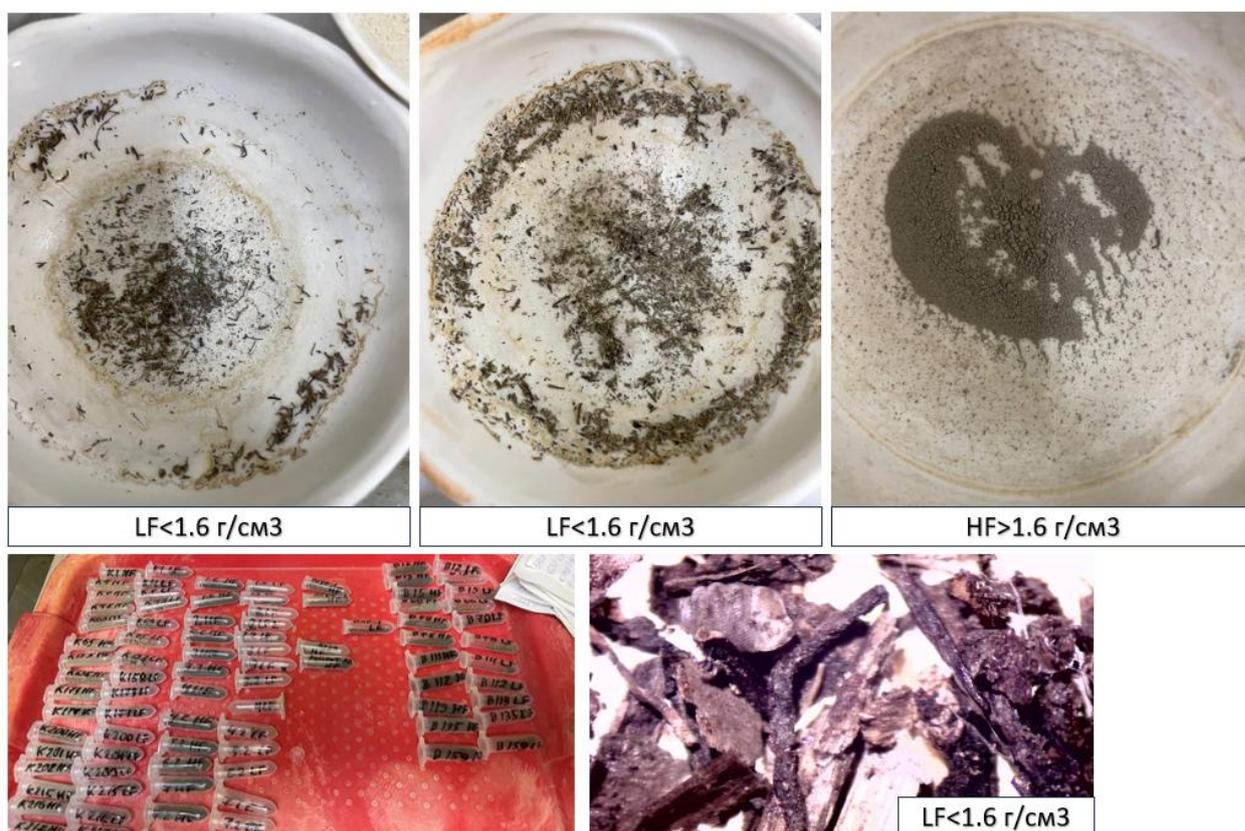


Рис. 14 Выделенные денситометрические фракции

Схема является упрощением метода (Golchin, 1994), в котором отсутствует этап выделения для окклюзионной фракции oLF (поскольку эта фракция часто очень мала по массе). Схема предназначена для отделения физически незащищённых органических частиц (лёгкая фракция, LF) от других органических веществ почвы, которые могут быть связаны с почвенными агрегатами или минералами (тяжёлая фракция, HF). Однако сам раствор оказывает диспергирующее воздействие и может способствовать разрушению почвенных агрегатов и высвобождению органического вещества в них (в зависимости от энергии, необходимой для их разрушения, что варьируется в разных почвах). Основное преимущество метода – простота и скорость проведения. К недостаткам следует отнести то, что тяжёлая фракция не разделяется дальше и, следовательно, представляет собой гетерогенный пул ПОВ. В рамках работы содержание углерода и азота (C_{LF} N_{LF}) и их соотношение во фракции $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$, выделенной из почв разных провинций, проводили с использованием автоматического анализатора Vario-9000. Содержание азота

(N_{HF}) и общего углерода (C_{HF}) в плотном остатке аналогично оценивали методом сухого сжигания на автоматическом анализаторе в пробах почвы после выделения фракции $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$.

Содержание углерода в $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$ также учитывали в мг/кг. Была использована следующая формула:

$$C_{LF(\text{мг/кг})} = 100 \times LF \times C_{LF}, \quad (1)$$

где:

LF — содержание лёгкой фракции в почве, % от массы почвы

C_{LF} , % — содержание углерода в лёгкой фракции, % от массы LF

100 – Коэффициент пересчета в мг/кг

Аналогично рассчитывали содержание азота в $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$

$$N_{LF(\text{мг/кг})} = 100 \times LF \times N_{LF}, \quad (2)$$

LF — содержание лёгкой фракции в почве, % от массы почвы

N_{LF} , % — содержание азота в лёгкой фракции, % от массы LF

На основании известного протокола (Weil, 2003) анализа для определения фракции «активного углерода» или Permanganate oxidizable carbon (ПОХС) Испытательным центром почвенно-экологических исследований РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева был разработан протокол, описанный в (Прохоров, 2024). Суть метода заключается в использовании MnO_4^- , как мощного окислителя в нейтральной, слабокислой и слабощелочной среде, за счет большой разницы потенциалов между ионами Mn^{2+} и MnO_4^- . Реагируя с почвенным углеродом, раствор, содержащий $KMnO_4$, постепенно обесцвечивается и темно-фиолетовый оттенок переходит в слаборозовый, а затем раствор становится прозрачным. Приготовление раствора окислителя произведено согласно методике, предложенной в работе (Culman, 2012), 147 г $CaCl_2$ растворяют в 900 мл дистиллированной воды. Далее навеску 31,60 г $KMnO_4$ растворяют в 900 мл приготовленного раствора. Уровень pH раствора необходимо довести до величины 7,0 ед. pH при использовании растворов 0,1 н. растворов NaOH и HCl приготовленных из стандарт-титров. Градуировочный график строят по четырем стандартным точкам при концентрации $KMnO_4$: 0,005; 0,01; 0,015; и

0,02 М. Из стандартных растворов готовят градуировочные рабочие растворы. К 0,5 мл стандартного раствора добавляют 49,5 мл бидистиллированной воды. При градуировке и определении следует установить длину волны на спектрофотометре на отметке 550 нм.

Для проведения анализа в центрифужные пробирки объемом 50 мл берут навеску 2,50 г воздушно сухой почвы, добавляют 18 мл дистиллированной воды, затем 2,0 мл раствора KMnO_4 . Далее, плотно закрыв крышку, в течение 2 мин необходимо интенсивно перемешивать полученную суспензию. По истечении 2 мин пробирки встряхивают для исключения оседания почвы на крышке и в верхней части, а далее поставить содержимое на отстаивание в темное место на 10 мин. Временной промежуток должен быть стандартизирован и идентичен для всех проб. В рамках данного метода время экспозиции является важным фактором, определяющим качество аналитических данных, поэтому следует работать с обязательной фиксацией времени и ограничиваться количеством образцов в одной партии в диапазоне от 1 до 7 шт., так как реакция окисления будет протекать при контакте почвы с KMnO_4 до момента отбора 0,5 мл на определение концентрации. По истечении 10 минут следует отобрать 0,5 мл надосадочного раствора в колбу на 50 мл и добавить 49,5 мл дистиллированной воды. Дальнейшие определения оптической плотности (D) на спектрофотометре необходимо проводить при длине волны равной 550 нм.

Количество окисленного углерода будет зависеть от количества восстановленного перманганата и, следовательно, чем меньше интенсивность окраски раствора, тем большее количество фракции РОХС содержится в пробе.

Для расчета необходимо использовать уравнение вида (Weil, 2003):

$$\text{РОХС (мг/кг)} = [0.02 - (a+b*D)] *(9000)*(0.02L/Wt) \quad (3)$$

Где:

0.02 – концентрация рабочего р-ра перманганата моль/л

a – пересечение стандартной кривой

b – наклон стандартной кривой

D – оптическая плотность

9000 – количество миллиграммов углерода, окисляемого 1 моль MnO_4 при переходе Mn^{+7} в Mn^{+4}

0.02 L – объем прореагировавшего исходного раствора

Wt – навеска почвы в кг

Среди основных агрохимических показателей почв определяли: pH_{KCl} и pH_{H_2O} при соотношении почва: раствор 1:2,5 и 1:5 соответственно. На карбонатных почвах с целью минимизации суспензионного эффекта пробы при определении pH_{H_2O} отстаивали в течение 1 ч. Обеспеченность почв подвижными формами фосфора и калия определяли в соответствии с методами Кирсанова для серых лесных почв, Чирикова для некарбонатных черноземов и Мачигина для карбонатных черноземов, гранулометрический состав определяли методом Качинского.

2.6 Характеристика статистических методов анализа и используемого ПО

Для анализа полученных данных использованы следующие статистические методы: описательная статистика; сравнение средних по параметрическому критерию Тьюки (при условии однородности дисперсий), оценка нормальности распределения с использованием критериев Андерсона—Дарлинга и Шапиро—Уилка; корреляционный анализ методом Пирсона; регрессионный анализ, метод главных компонент, алгоритм случайного леса для поиска коэффициентов регрессии, нелинейная логистическая регрессия. Выбранный уровень значимости для проверки статистических гипотез $\alpha=0,05$. Для статистической обработки данных использовалось ПО RStudio v 4.24. Пространственный анализ и визуализация данных представлена в виде картографического материала, разработанного с использованием ПО QGIS v 3.16/22 и SAGA GIS. Климатические данные, цифровые модели местности и рельефа, снимки Sentinel-2 были получены с использованием веб платформы Google earth engine.

На основании данных цифровой модели местности (ЦММ) с разрешением 30 м SRTM-global был проведен морфометрический анализ

исследуемых площадок. Для оценки климатических параметров использовали набор данных: ERA5 land и TerraClimate за период 1973-2024 г. Данные цифровой модели местности были преобразованы в ЦМР с использованием алгоритма, предложенного в работе (Vosselman, 2000) На основании ЦМР проведен морфометрический анализ и привязка точек и полигонов по картограммам крутизны склонов. При анализе также использовали данные о высотных отметках территории. Климатические данные по средним температурам ($^{\circ}\text{C}$), количеству осадков (мм) и количеству солнечной радиации ($\text{Вт}/\text{м}^2$) были получены из открытых наборов (TerraClimate, Ryu Youngryel, 2015). Их корректировка была произведена с учетом морфометрических показателей исследуемых участков. Орографическая корректировка производилась с использованием алгоритма случайного леса при поиске региональных коэффициентов регрессии для каждого из исследуемых участков.

При оценке меры сопряженности почвенных свойств к снижению содержания $C_{\text{орг}}$ использовался подход, предложенный в работе (Kuzyakov, 2020), в ряду зональных почв свойственных каждому рассматриваемому участку для слоя 0-25 см оценивались отношения линейных трендов изменчивости почвенных параметров к уменьшению содержания $C_{\text{орг}}$. В основе оценки лежит допущение о том, что если свойство меняется пропорционально уменьшению $C_{\text{орг}}$ (линия тренда 1:1), то механизм его трансформации напрямую сопряжен с уровнем содержания в почве $C_{\text{орг}}$. Если изменения происходят быстрее, чем снижается уровень $C_{\text{орг}}$ (левая нижняя часть графика рисунок – 15), то механизмы трансформации напрямую связаны с уровнем содержания $C_{\text{орг}}$, если медленнее (правая верхняя часть графика рисунок – 15), то характерно наличие иного механизма его изменения, не связанного с содержанием органического вещества. Если приять во внимание допущение о том, что изменение содержания $C_{\text{орг}}$ в почве выступает как один из показателей деградиационного изменения, то по своей сущности подход отражает некоторую степень сопряженности изменения разных показателей почвы по отношению к

направлению изменения содержания $C_{орг}$ в том же горизонте почвы в пределах группы объектов.

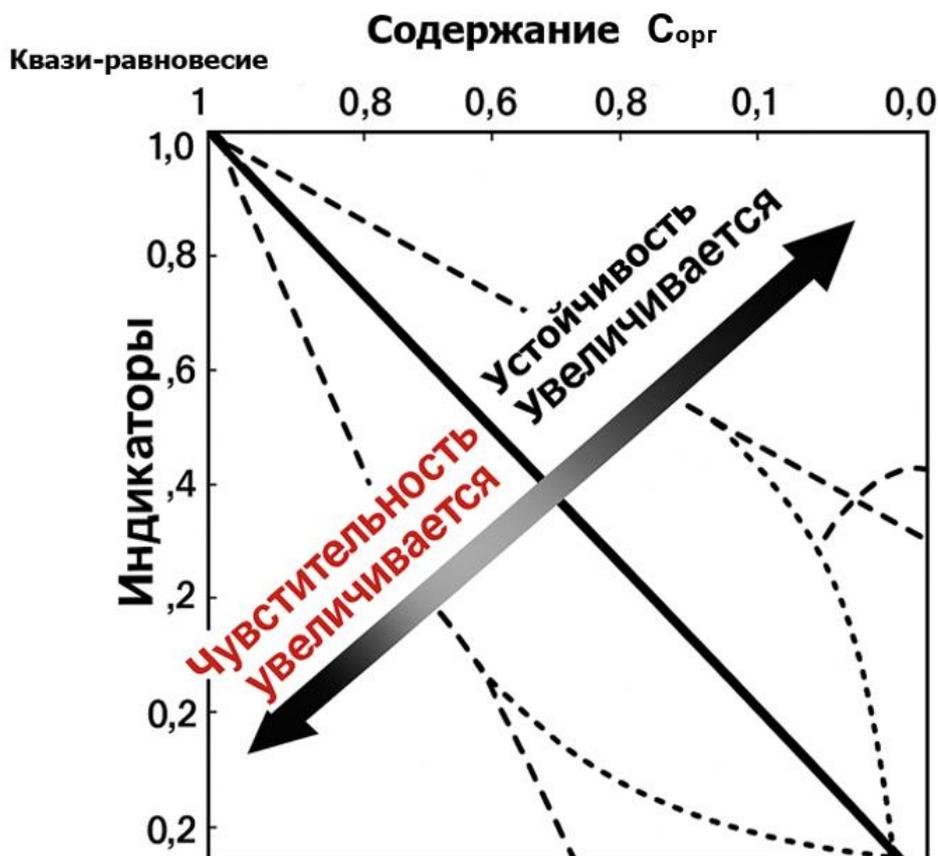


Рис. 15 Оценка степени сопряженности к снижению $C_{орг}$ (адаптировано Guillaume, et al.,2016)

2.7 Структура анализируемых данных

По результатам проведения лабораторных анализов и расчётов с использованием платформы Google earth engine и ПО SAGA GIS была получена соответствующая база данных в формате .excel и .csv. Для последующего анализа и проведения статистической обработки была использована программная среда RStudio v. 4.24 и соответствующие библиотеки. Пространственный анализ данных проведен с использованием Google earth engine и QGIS v 3.16. Структура анализируемых данных на представлена на рисунке – 16.

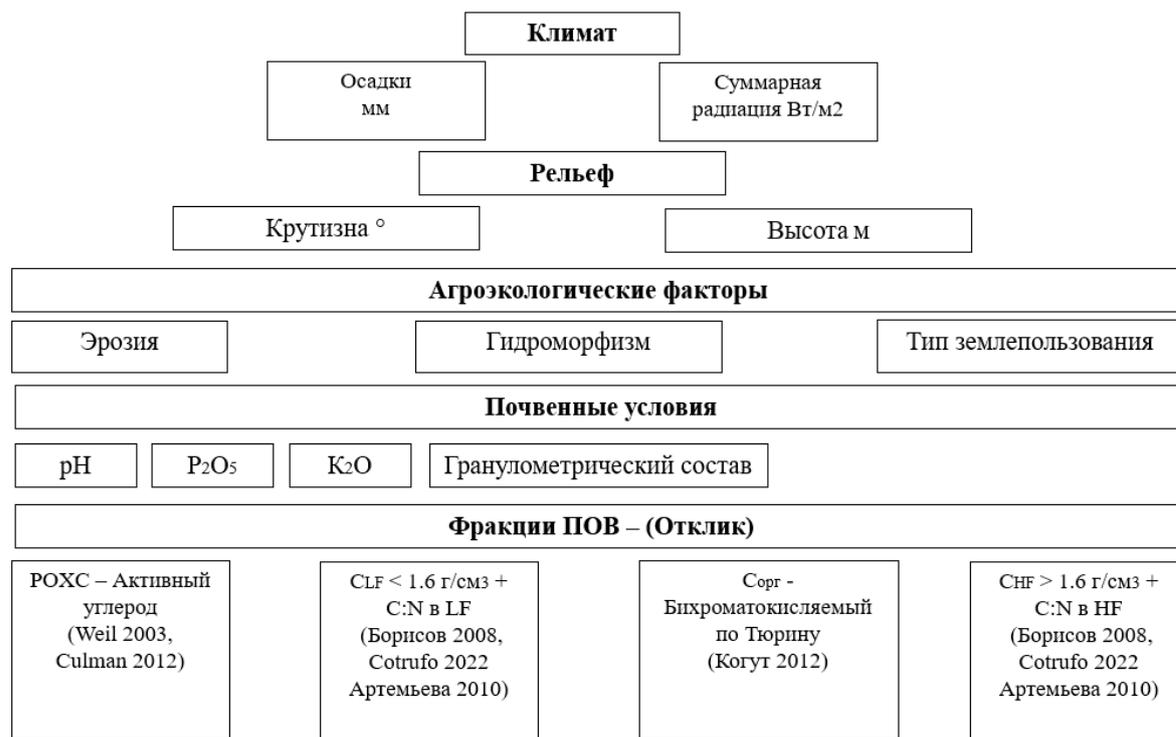


Рис. 16 Структура анализируемых данных

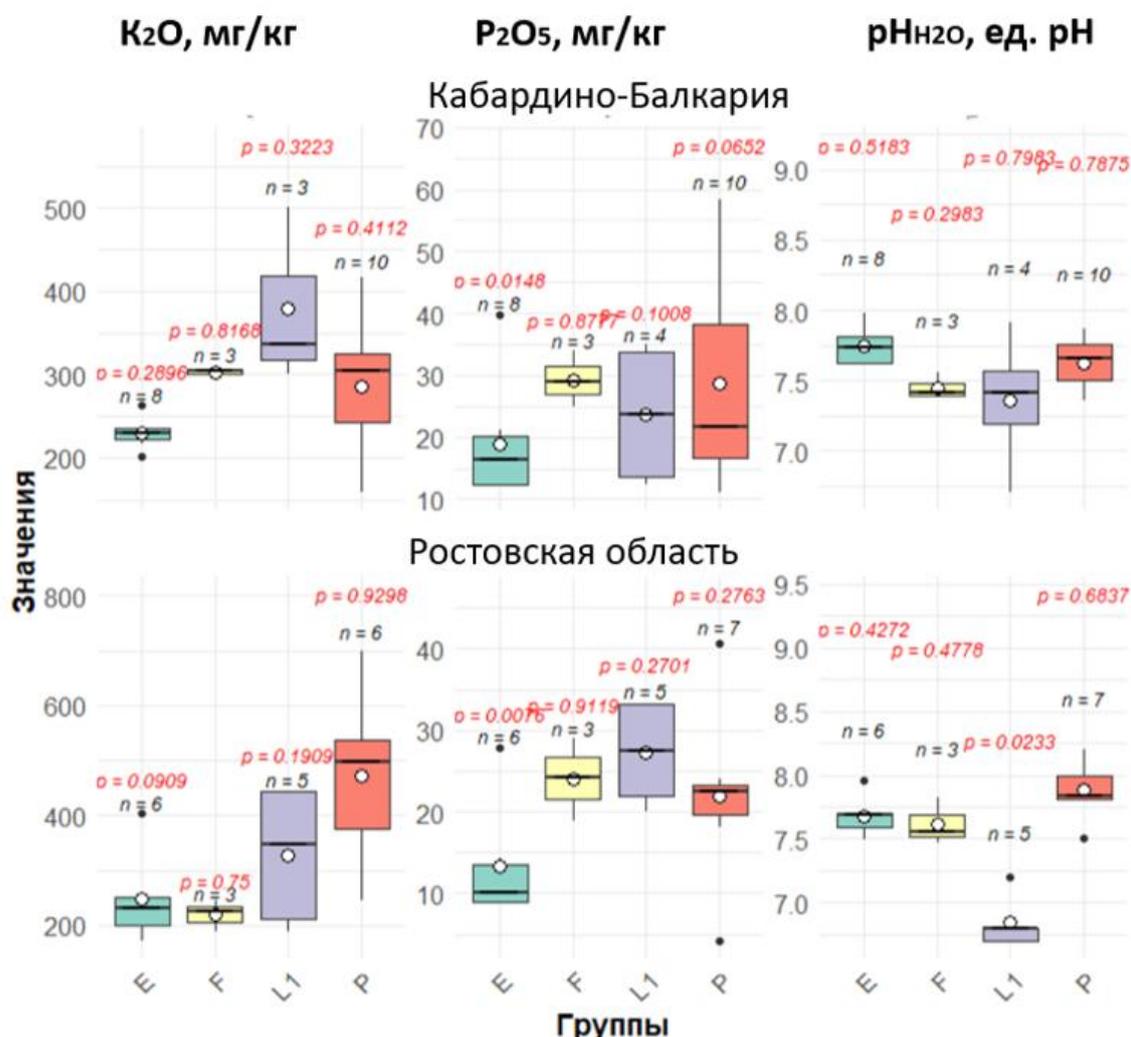
При этом как отдельные факторы, влияющие на фракции лабильного ПОВ, рассматриваются: климатические параметры, морфометрические параметры, агроэкологические параметры, почвенные параметры. Данные были классифицированы по принадлежности к агроэкологическим группам почв (Кирюшин, 2005). На этапе первичного анализа произведена описательная статистика полученной базы данных, произведена оценка типа распределения данных. Проведена оценка возможностей использования регрессионного анализа на полученных выборках данных.

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

3.1 Особенности накопления органического вещества в агроландшафтах предкавказской провинции

3.1.1 Агрохимические свойства почв

С учетом агроэкологических факторов почвы на исследуемых участках были сгруппированы в подгруппы. На рисунке 17 представлена вариация агрохимических показателей для пахотных и гумусовых горизонтов (0-25 см) в подвыборках на исследуемых участках.



* P – Плакорные, E1 – слабозерозивные, L1 – Слабополугидроморфные, F – фоновые референтные участки

Рис. 17 Диаграммы размаха по агрохимическим параметрам исследуемых почв

Всего для территории Предкавказской провинции выборка составила 133 ед. наблюдений, из которых: 24 приурочены к территории Терского района

Республики Кабардино-Балкария 21 к территории Зеленоградского района Ростовской области – 88 к территории Краснодарского края.

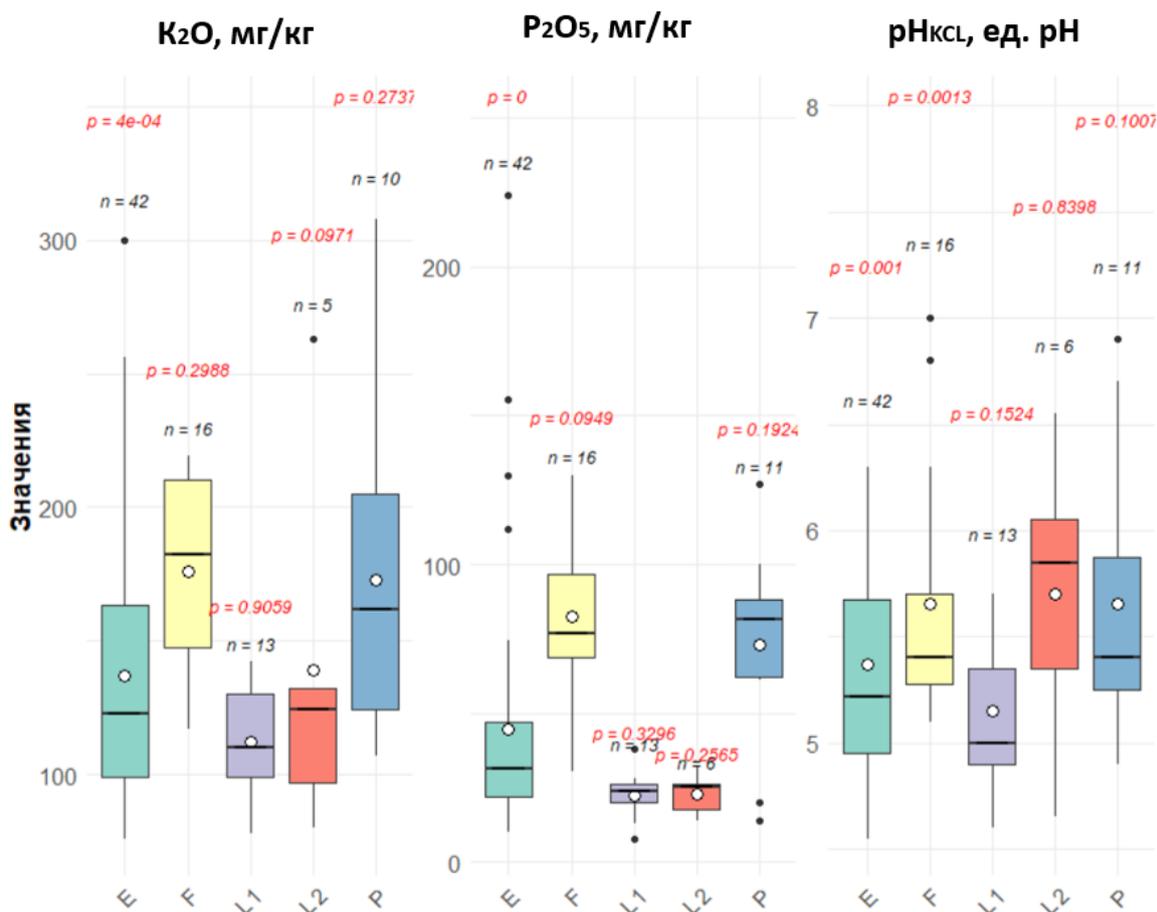
Плакорная агроэкологическая группа для участка в Ростовской области (Р) представлена типом Черноземов обыкновенных, в Краснодарском крае – черноземами типичными и выщелоченными, в Республике Кабардино-Балкария, черноземами обыкновенными (фациальные подтипы очень теплые кратковременно промерзающие), слабополугидроморфная (L1) на всех участках представлена луговато-черноземными почвами. Эрозионная (Е) – слабосмытыми локально среднесмытыми аналогами зональных почв, формирующихся на склонах крутизной от 2 до 8°.

На рисунке – 17 представлена визуализация распределения, подвижных форм фосфора и калия, определяемых в вытяжке углекислого аммония (1%) и кислотности почвы (pH_{H_2O}) для разных агроэкологических групп. Для каждой подвыборки из общей структуры данных был проведен тест Андерсона-Дарлинга для проверки нормальности распределения с заданными $\alpha=0.05$.

Содержание подвижных форм K_2O варьирует в диапазоне от 159 до 986 мг/кг. Во всех подвыборках распределение данных соответствует нормальному ($p < 0.05$). Содержание подвижных форм P_2O_5 варьирует в пределах от 4,2 до 58,6 мг/кг. Для эрозионной группы (Е) гипотеза о нормальности распределения была отвергнута по двум участкам, по всей видимости эрозионные процессы как существенно влияют на подвижность форм фосфора за счет более высокого уровня залегания карбонатов.

Уровень pH_{H_2O} варьирует в пределах от 6,70 до 8,20. Для всех групп, кроме выборки луговато-черноземных почв в Ростовской области, гипотеза о нормальности распределения данных была подтверждена. Высокая пространственная неоднородность отмечается по каждому из параметров, однако стоит отметить, что показатель pH_{H_2O} является более чувствительным к проявлению агроэкологических факторов, в частности величина pH_{H_2O} всегда ниже на участках с повышенным гидроморфизмом и в большей степени отражает генетические особенности почв и условий их формирования.

Содержание K_2O и P_2O_5 в фоновых референтных участках с естественной растительностью соответствует величинам 309 мг/кг и 29,4 мг/кг для исследуемого участка в Республике Кабардино-Балкария и 220 мг/кг, и 24 мг/кг для участка в Ростовской области. Содержание подвижного P_2O_5 в фоновых участках сопоставимо со средним содержанием на пашне в группах Р и L1, однако, существенно выше среднего (в 2-3 раза) относительно содержания P_2O_5 , характерного для подгруппы Е.



* Р – Плакорные, Е – слабоэрозионные, L1 – Слабопеллугидроморфные, L2 – Среднепеллугидроморфные, F – фоновые референтные участки

Рис. 18 Диаграммы размаха по агрохимическим параметрам исследуемых почв

Аналогичные данные по вариации агрохимических параметров в пахотных и гумусовых горизонтах черноземов Краснодарского края представлены на рисунке 18. Установлено, что среднее содержание подвижных форм P_2O_5 , определяемое в уксуснокислой вытяжке (0,5 н.) было максимальным

в фоновых референтных почвах. При этом содержание подвижных форм в плакорной группе относительно фона отличалось незначительно (10-15%), в то время как для эрозионных и переувлажненных участков содержание подвижного фосфора снижалось более чем в 3 раза. Средний уровень кислотности в подгруппах отличался менее выражено. Общая вариация по данному параметру лежала в пределах 4,55-7,00 ед. рН при среднем уровне 5,44 ед. Более кислый рН был характерен для подгрупп L2 (луговато-черноземные) и ряда наблюдений в подгруппе E – (Черноземы, выщелоченные слабосмытые), участков, локализованных на территории Мостовского района. Содержание подвижного калия фактически соответствует вариации между группами характерной для динамики P_2O_5 . Между фоновыми участками и плакорной группой отмечаются незначительные различия по вариации K_2O при среднем его содержании на уровне 180 мг/кг. При этом на переувлажнённых группах L1 и L2, а также на эрозионной группе среднее содержание K_2O было существенно ниже и соответствовало значениям 115-130 мг/кг.

3.1.2 Содержание лабильных и стабильных компонентов ПОВ

Оксидиметрические фракции. Результаты определений $C_{орг}$ и РОХС для почв Предкавказской провинции, типизированных по агроэкологическим группам (Кирюшин, 2005), представлены в виде коробчатых диаграмм на рисунке 19. Содержание фракции РОХС на участках в Ростовской области варьировало в диапазоне 349-848 мг/кг для агроландшафтов и 842-1006 мг/кг для участков под естественной степной растительностью. Максимальное содержание углерода данной фракции, в среднем 925 мг/кг, отмечалось в фоновых референтных почвах, а также в пробах гумусовых горизонтов агроэкологической группы L1 в луговато-черноземных почвах (в среднем 724 мг/кг). Минимальным содержанием РОХС характеризовались черноземы обыкновенные плакорной агроэкологической группы, в среднем 476 мг/кг. При этом для эрозионной группы, представленной в основном слабосмытыми аналогами черноземов, отмечена большая вариация содержания РОХС и более высокие значения среднего содержания - 580 мг/кг. Повышенное увлажнение в

подгруппе L1, по всей видимости, способствует большему накоплению углерода РОХС в условиях недостатка влаги (Прохоров, 2024). Минимальное содержание РОХС характерно для пахотных горизонтов черноземов плакорной группы. При этом для эрозионных участков отмечается некоторое повышение уровня содержания РОХС, однако, за счет ограниченного числа наблюдений сложно с достоверностью судить о значимости таких различий.

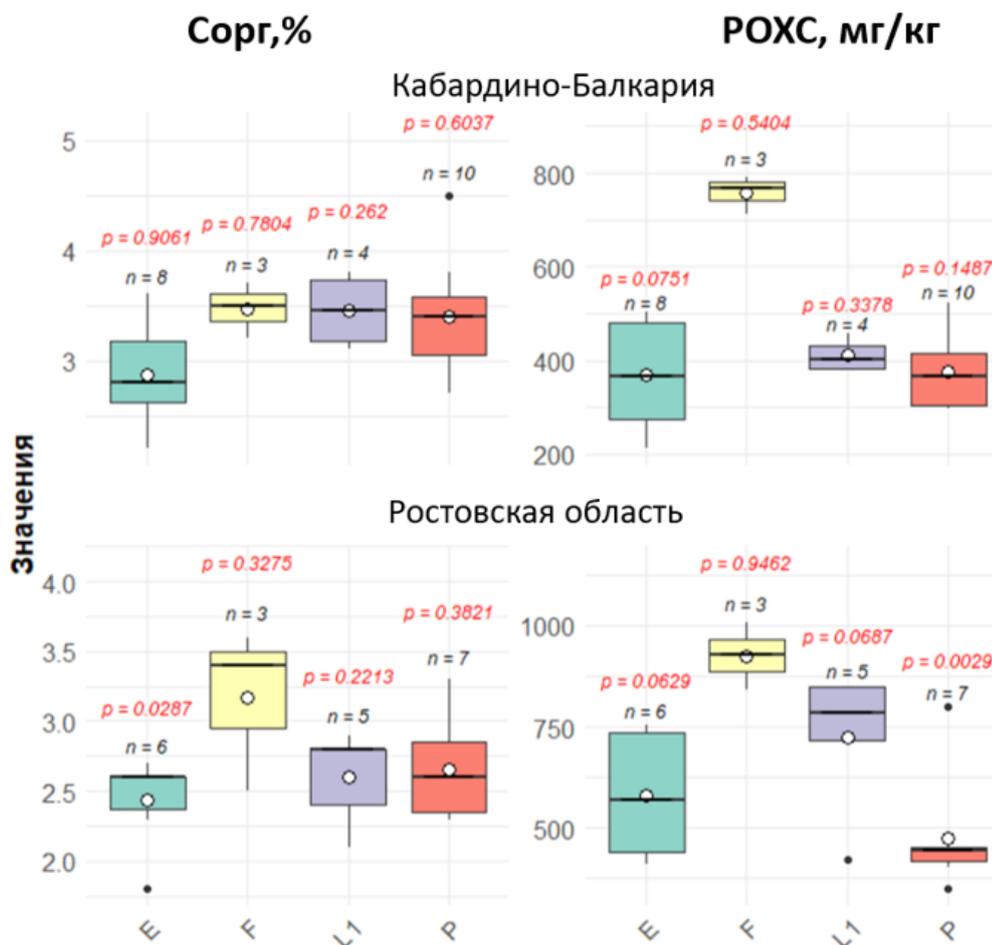


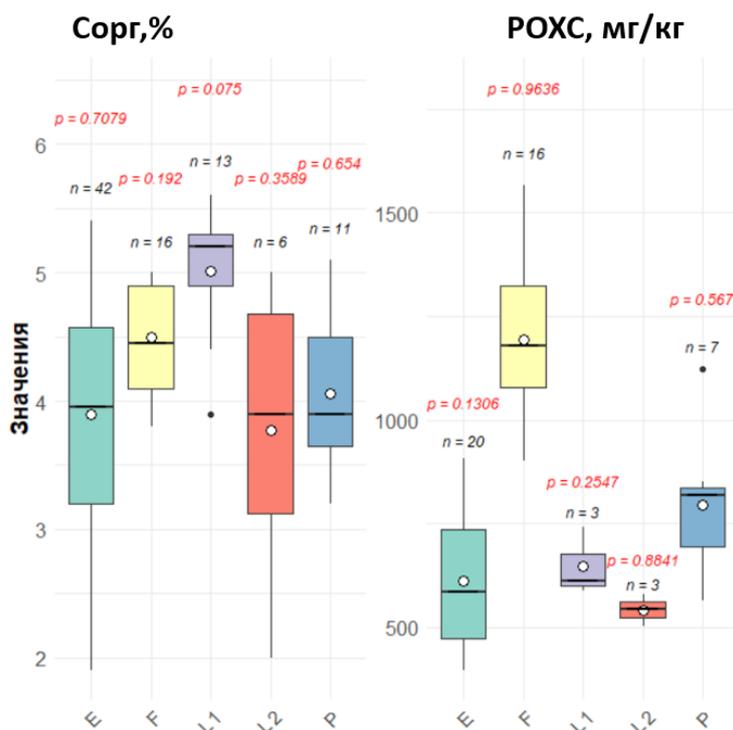
Рис. 19 Диаграммы размаха по содержанию $C_{орг}$ и РОХС

* P – Плакорные, E – слабоэрозионные, L1-Слабополугидроморфные, F – фоновые референтные участки

Среднее содержание углерода фракции РОХС (мг/кг) снижается в ряду: Фоновые референтные – Слабополугидроморфные – Слабоэрозионные – Плакорные.

На участках, локализованных в Терском районе Кабардино-Балкарии, почвенный покров которых также представлен преимущественно черноземами обыкновенными и их смытыми аналогами распределение $C_{орг}$ и РОХС

несколько отличается в подгруппах от последнего, характерного для участков Ростовской области. Содержание $C_{орг}$ в фоновых референтных почвах, плакорной и слабополугидроморфной группы почв агроландшафтов не характеризуется наличием статистически значимых различий и варьирует в пределах 3,4-3,5%. Несколько ниже содержание $C_{орг}$ в пахотных горизонтах эрозионной группы на слабосмытых черноземах, где среднее значение соответствует величине 2,9%. Для фракции РОХС общая тенденция распределения по агроэкологическим группам была близка к распределению на участках в Ростовской области и максимум РОХС отмечается в подгруппе необрабатываемых черноземов при среднем содержании 757 мг/кг. Существенно меньшее содержание было отмечено на луговато-черноземных почвах (в среднем 411 мг/кг), плакорных и эрозионных почвах агроландшафтов – 374 и 370 мг/кг соответственно.



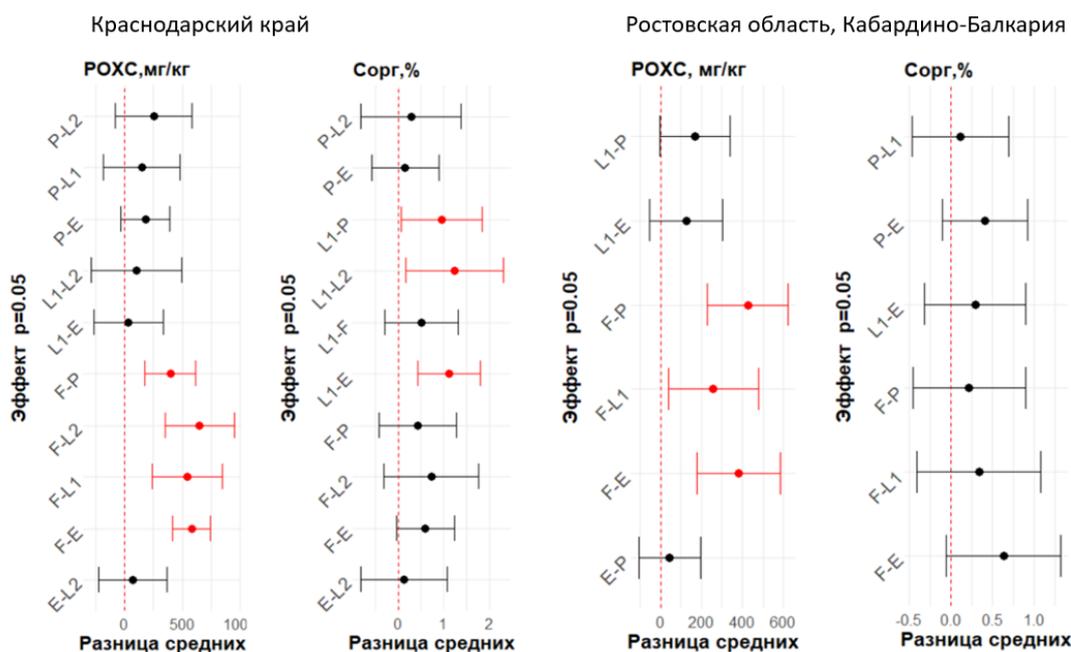
* P – Плакорные, E – слабоэрозионные, L1-Слабополугидроморфные, L2 – Среднеполугидроморфные, F – фоновые референтные участки

Рис. 20 Диаграммы размаха по содержанию $C_{орг}$ и РОХС.

Для почв Краснодарского края отмечалось иное распределение содержания фракций РОХС и $C_{орг}$ в подвыборках, однако РОХС аналогично соответствовал максимуму в необрабатываемых почвах при среднем значении

1192 мг/кг и вариации в пределах 901-1560 мг/кг. Несколько более высокими значениями РОХС характеризовалась плакорная группа, почвы которой представлены типичными и выщелоченными черноземами. Среднее значение РОХС для плакорной группы соответствовало величине 796 мг/кг, значения варьировали в пределах 564-1124 мг/кг. Для эрозионной группы, переувлажненных групп L1 и L2 содержание РОХС было минимальным, в группе L2 содержание вариация значений составила 502-578 мг/кг.

Углерод бихромат-окисляемой фракции $C_{орг}$ в большей степени накапливается на участках слабополугидроморфной группы в пахотных горизонтах луговато-черноземных почв, среднее содержание $C_{орг}$ в которых соответствует 5,0% при вариации значений в пределах 3,9-5,6%. Содержание $C_{орг}$ уменьшалось в ряду: Слабополугидроморфные – Фоновые референтные – Плакорные – Слабоэрозионные – Среднеполугидроморфные.



* P – Плакорные, E – слабоэрозионные, L1-Слабополугидроморфные, L2 – Среднеполугидроморфные, F – фоновые референтные участки

Рис. 21 Оценка достоверности различий средних с использованием критерия Тьюки

Анализируя разницу средних значений по содержанию РОХС и $C_{орг}$ при заданном уровне $\alpha=0.05$ следует выделить, что РОХС в большей степени чувствителен к типу землепользования и фактически все агроэкологические

группы почв пашни характеризовались достоверной разницей средних относительно референтных участков. За счет высокой пространственной вариации РОХС данная фракция менее чувствительна к агроэкологическим факторам таким как уровень увлажнения или проявление процессов эрозии. Содержание $C_{\text{орг}}$ напротив в большей степени отражает чувствительность повышенному увлажнению и эрозии. Для черноземов Майкопского почвенного округа (Н1 IV), где содержание $C_{\text{орг}}$ в целом характеризуется большими значениями относительно степных подтипов черноземов Предкавказской провинции, углерод $C_{\text{орг}}$ более чувствителен к экзогенным факторам. На участках, где почвы концентрируют меньшее количество углерода в степных ландшафтах достоверных различий средних при заданном уровне $\alpha=0.05$ по $C_{\text{орг}}$ между агроэкологическими группами почв не отмечается. Аналогично не отмечается достоверных различий средних при заданном уровне $\alpha=0.05$ по содержанию РОХС между агроэкологическими группами на обрабатываемых участках.

Денситометрические фракции

В результате проведения денситометрического фракционирования выделены две фракции $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$ и $HF > 1.6 \text{ г/см}^3$. На рисунке 22 представлена вариация значений по содержанию $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$ на исследуемых участках.

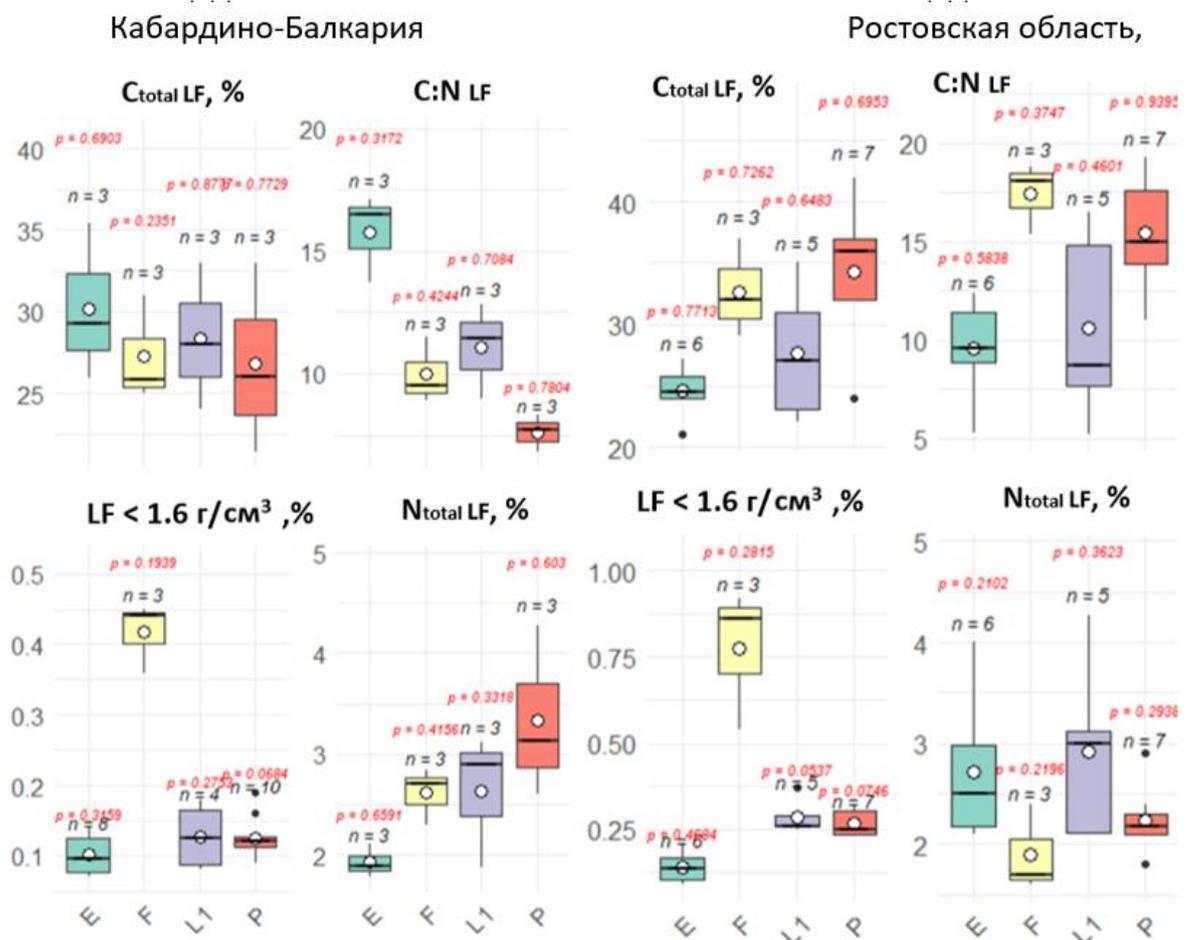


Рис. 22 Диаграммы размаха по характеристикам фракции $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$

* P – Плакорные, E – эрозийные, L1-Слабополугидроморфные, F – фоновые референтные участки

Для оценки типа распределения данных использовался критерий Шапиро-Уилка с учетом того, что тест Андерсона хуже работает на выборках с малым числом наблюдений. Установлено, что по содержанию C_{LF} фракции, выделенные из почв разных агроэкологических групп, несколько отличаются. С учетом распределения данных для почв участка в Республике Кабардино-Балкария максимальное содержание C_{LF} отмечалось в пробах эрозийной группы на слабосмытых обыкновенных черноземах в среднем 30,2%, для фоновых референтных черноземов и черноземов плакорной группы агроландшафтов содержание C_{LF} варьировало в пределах 21,4-33% при среднем значении 27,3% и 26,8% соответственно.

Для исследуемых участков Ростовской области максимальное содержание C_{LF} наблюдалось в пробах обыкновенных черноземов плакорной группы (34,3%), на эрозийных участках, напротив, величина C_{LF} была минимальной и

соответствовала значению 24,5%. Максимальное накопление N_{LF} в почвах участка, локализованного на территории Республики Кабардино-Балкария было характерно для чернозёмов плакорной группы при уровне содержания 3,3%. Минимальным содержанием отличались черноземы эрозионной группы, где величина N_{LF} в среднем соответствовала значению 1,9%. Для подгруппы L1 и F содержание N_{LF} варьировало в пределах 1,87%-3,12% при средних значениях в подгруппах 2,62% и 2,61% соответственно. Соотношение C:N в целевой фракции существенно отличилось между агроэкологическими группами.

Для участка в Терском районе Республики Кабардино-Балкарии соотношение $C:N_{LF}$ варьирует в пределах 6,8-17,1, при этом соотношение сужается в ряду: эрозионные – фоновые референтные – слабополугидроморфные – плакорные. Наибольший потенциал к минерализации $LF < 1.6$ г/см³ характерен для чернозёмов плакорной группы (Республика Кабардино-Балкария), где отмечаются наиболее узкие диапазоны соотношений $C:N_{LF}$, в среднем соответствующие 6,8. На референтных участках с естественной степной растительностью (F) соотношение $C:N_{LF}$ варьировало в пределах от 8,9 до 11,2, что также характеризует высокий потенциал минерализации ПОВ фоновых участков. Наиболее устойчивое к разложению ПОВ представлено во фракции $LF < 1.6$ г/см³ выделенной из эрозионных аналогов обыкновенных чернозёмов, где величина $C:N_{LF}$ варьировала в пределах от 13,7 до 17,1

Для участка, локализованного в Зерноградском районе Ростовской области, соотношение $C:N_{LF}$ по агроэкологическим группам несколько отличалось. Наиболее узкое отношение $C:N_{LF}$ характерно для эрозионной группы при среднем соотношении соответствующем 9,6 и вариации в пределах 5,3 – 12,4. Фоновые референтные участки характеризовались более широким диапазоном $C:N_{LF}$, относительно пашни, в среднем 17,4, при вариации 15,4–18,8. Полугидроморфные и плакорные группы (L1;P) не характеризовались существенными различиями, но для группы L1 была характерна наибольшая

вариация внутри подвыборки и диапазон соотношений C:N_{LF} для данной подгруппы лежал в пределах 5,2–16,5.

Общий выход фракции LF<1.6 г/см³ в % от массы почвы характеризовался более однородным распределением дисперсии между участками в Республике Кабардино-Балкария и Ростовской области. Величина LF<1.6 г/см³ в фоновых участках (F) соответствовала 0,42% и 0,77% соответственно, то для участков плакорной группы (P) выход LF<1.6 г/см³ сокращался в среднем до 0,12% и 0,26%, для слабополугидроморфных до 0,13% и 0,28%, для эрозионных (E) до 0,10% и 0,14%. На рисунке 23 представлена характеристика фракции HF>1.6 г/см³ исследуемых площадок.

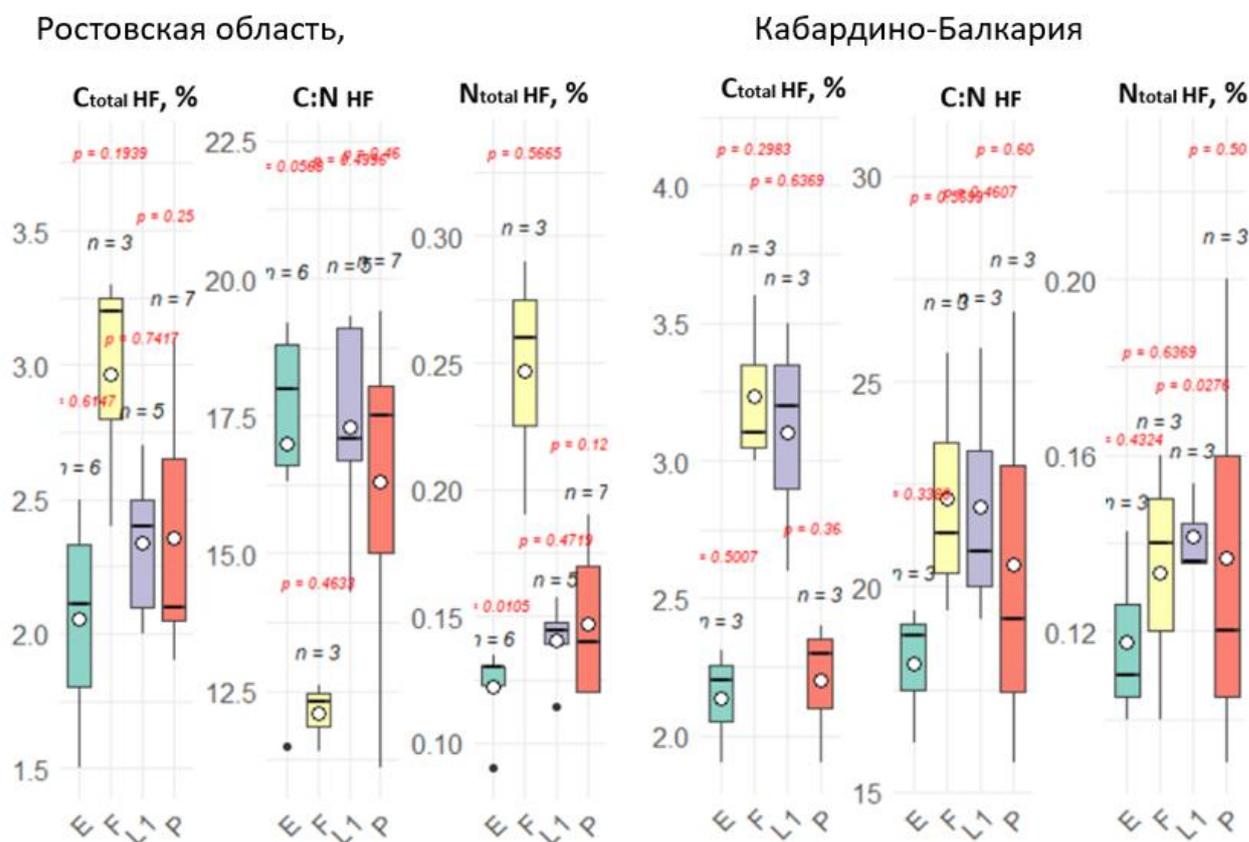


Рис. 23 Диаграммы размаха по характеристикам фракции HF>1.6 г/см³

* P – Плакорные, E – эрозионные, L1-Слабополугидроморфные, F – фоновые референтные участки

Для исследуемых почв Ростовской области максимальное содержание C_{HF} характерно для необрабатываемых почв, в среднем 2,96%, что на 20-30% выше относительно участков пашни, где среднее содержание C_{HF} для плакорных, переувлажненных и эрозионных групп соответствует значениям

2,35% 2,34% и 2,0% соответственно. Для исследуемых участков в Республике Кабардино-Балкария уровень содержания C_{HF} фоновых необрабатываемых участков эквивалентен обеспеченности C_{HF} полугидроморфной группы агроландшафтов при среднем уровне C_{HF} в последних соответствующем 3,23% и 3,10% соответственно. Минимальное содержание C_{HF} наблюдается в эрозионной группе. Выход $LF < 1.6$ г/см³ аналогично был минимальным на эрозионной группе.

Для почв Ростовской области отмечается более узкое соотношение $C:N_{HF}$ в фоновых референтных участках при средней величине последнего 12,1, в то время как для участков пашни в подгруппах P-L1-E средние отношения $C:N_{HF}$ соответствует величинам – 16,3 – 17,3 – 16,9 соответственно. Для исследуемых почв участков Республики Кабардино-Балкария отмечается несколько иное распределение данных, где для подвыборок F-L1-P отношения $C:N_{HF}$ существенно не отличаются и в среднем соответствуют величинам 22,1 – 21,9 – 20,5, в то время как для подгруппы E выражено смещение в сторону более узкого соотношения $C:N_{HF}$ в пределах вариации 16,2-19,4 и среднем значении 18,1. Для исследуемых почв Ростовской области максимальное содержание N_{HF} отмечается в фоновых черноземах, и содержание между участками фон/пашня отличается в среднем в 2 раза при N_{HF} во фракции $HF > 1.6$ г/см³ варьирующем в пределах 0,19-0,29% для подгруппы F и 0,13-0,19% для подгрупп E L1 P – агроландшафтов. Участок в Кабардино-Балкарии в свою очередь характеризуется более низким уровнем содержания N_{HF} во фракции $HF > 1.6$ г/см³ при среднем значении 0,13% и вариации в пределах 0,10-0,16%. Для пашни содержание N_{HF} варьирует в пределах 0,09-0,20% в среднем соответствуя 0,13% при объединении всех подгрупп, не отмечается различий между содержанием N_{HF} во фракции $HF > 1.6$ г/см³ между участками пашни и фоновыми почвами.

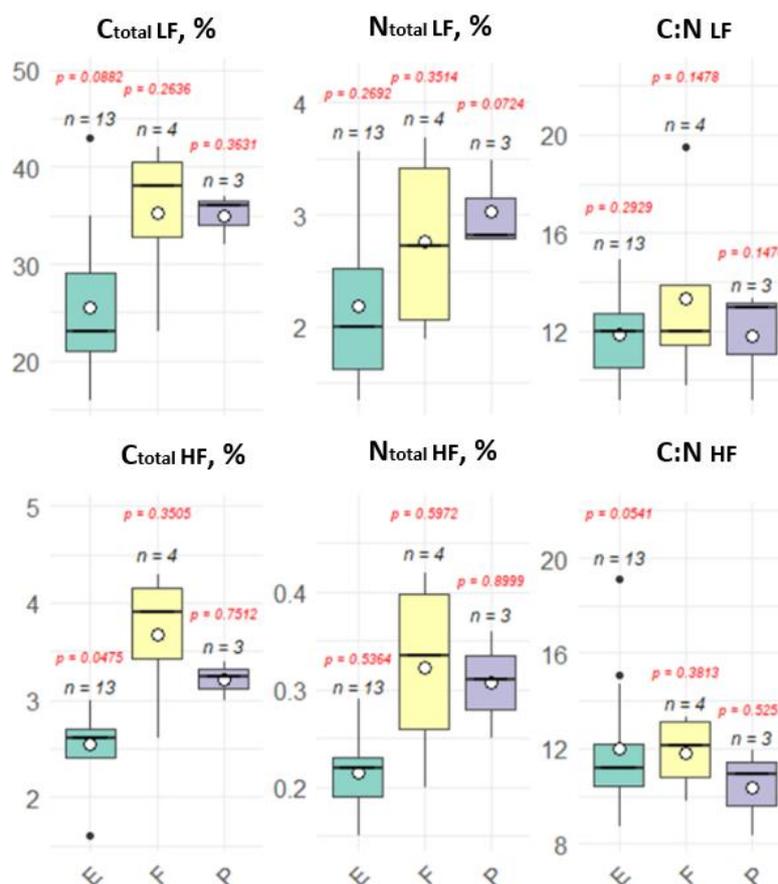


Рис. 24 Характеристика денситометрических фракций, выделенных из почв Краснодарского края

* P – Плакорные, E – эрозионные, F – фоновые референтные участки

На рисунке – 24 представлена характеристика фракций $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$ и $HF > 1.6 \text{ г/см}^3$ выделенных из почв Краснодарского края. Характерным отличием черноземов, формирующихся в более гумидных условиях климата, является бóльшая однородность дисперсии почвенных свойств внутри подвыборок. Отмечается аналогичная тенденция по распределению параметров содержания C_{LF} , N_{LF} и соотношения $C:N_{LF}$ между агроэкологическими группами как для пула фракции $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$, так и для пула фракции $HF > 1.6 \text{ г/см}^3$. Максимальное содержание C_{LF} наблюдается в слое 0-25 см гумусовых горизонтах почв фоновых референтных участков. В среднем содержание C_{LF} для подвыборки «F» соответствовало величине 35,2% при вариации от 23% до 42%. Для плакорной агроэкологической группы среднее содержание C_{LF} составило 35% при более узкой вариации значений 32-37%. Для эрозионной группы (E) как для фракции $HF > 1.6 \text{ г/см}^3$, так и для $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$ характерно меньшее содержание углерода.

В $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$ величина содержания углерода варьирует в пределах 16-43% при среднем содержании на уровне 25%. Доля C_{HF} варьирует в диапазоне от 1,6% до 3,0% при среднем содержании на уровне 2,5%. Отмечается существенное снижение доли C_{LF} относительно фоновых и плакорных участков (более чем на 50%). Для выборки фоновых участков характерна бóльшая вариация значений в пределах 1,89-3,69% при среднем содержании N_{LF} в пределах 2,69%. Относительно плакорной агроэкологической группы не отмечается существенного уменьшения содержания N_{LF} , однако для эрозионной группы, несмотря на широкий размах данных, среднее содержание N_{LF} соответствует величине 2,18%, что фактически на 25-30% ниже относительно фоновых референтных почв и почв плакорной группы. Аналогично можно предположить, что на эрозионных участках на фоне уменьшения содержания C_{LF} происходит закономерное уменьшение содержания азота за счет первичного смещения соотношения $C:N_{LF}$ (при уменьшении доли углерода C_{LF}) и постепенной минерализации азота для до перехода в квази-равновесное $C:N_{LF}$ отношение.

Для фракции $HF > 1.6 \text{ г/см}^3$ характерна идентичная дифференциация свойств почв по агроэкологическим группам, однако, если содержание C_{LF} в фоновых почвах и почвах плакорной группы агроландшафтов было сопоставимо, то содержание C_{HF} несколько выше на фоновых участках, при среднем содержании углерода 3,7% и его вариации в пределах 2,6-4,3%. Для плакорной группы агроландшафтов среднее содержание C_{HF} соответствовало величине 3,21% при более узкой вариации значений в пределах 3,0-3,4%. Для эрозионной группы аналогично отмечается более низкое среднее содержание C_{HF} на уровне 2,54% при широкой вариации значений в пределах 1,6-3,0%. Содержание N_{HF} варьировал в пределах 0,15-0,42%. Максимальное накопление азота в тяжелой денситометрической фракции было характерно для фоновых почв и почв плакорной агроэкологической группы при среднем содержании N_{HF} 0,32% и 0,31% соответственно. Для почв эрозионной группы отмечалось закономерное уменьшение содержания N_{HF} в среднем до уровня 0,21% при вариации значений в пределах от 0,15% до 0,29%. С учетом того, что как для

фракции $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$, так и для фракции $HF > 1.6 \text{ г/см}^3$ отмечается однородная дисперсия данных в подвыборках (по агроэкологическим группам) отношения $C:N$ для функциональных фракций лежат в близких диапазонах внутри подвыборок. Для фоновых почв соотношения $C:N_{LF}$ соответствует диапазону 9,8-19,5 при среднем значении 13,2. Для $HF > 1.6 \text{ г/см}^3$ принимает значения 9,8-13,3 при средней величине соотношения равной 11,8. Для плакорной группы агроландшафтов соотношения $C:N_{LF}$ и $C:N_{HF}$ варьируют в пределах 9,2-13,3 и 8,3-11,9. Для эрозионной группы отношение $C:N_{LF}$ составило в среднем 11,9 при вариации значений в пределах 9,2-14,9 и 12,0 для $C:N_{HF}$ при вариации в пределах 8,7-19,1. С учетом однородности качественного состава фракций ПОВ можно предположить, что в условиях более гумидной части Предкавказской провинции включение процессного органического вещества фракции $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$ в структурные пулы происходит быстрее и баланс в соотношении углерода процессных и структурных пулов обуславливается быстрой скоростью оборота OB , чего в свою очередь не отмечается в более аридных ландшафтах, где отношения $C:N$ несколько смещены и для фракции $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$ характерны более узкие соотношения относительно стабилизированного углерода фракции $HF > 1.6 \text{ г/см}^3$. В таблице 1 представлены усредненные данные, полученные из верхних гумусовых горизонтов нативных почв и почв агроландшафтов для черноземов типичных и черноземов обыкновенных.

Таблица 1. Отношения $C:N$ в целевых фракциях на исследуемых участках

| Почва | $C:N_{LF}$ | ДИ при $\alpha = 0.05$ | $C:N_{HF}$ | ДИ при $\alpha = 0.05$ | $\Delta C:N$ LF-HF | n |
|---------------------------------------|------------|------------------------|------------|------------------------|-----------------------|----|
| Чернозем типичный-F | 13,2 | 12,4-14,1 | 11,8 | 9,9-13,7 | 1,4 | 3 |
| Чернозем обыкн. -F (Ростовская) | 17,4 | 15,4-19,5 | 12,1 | 11,4-12,8 | 5,3 | 3 |
| Чернозем обыкн. -F (Каб.-Балкария) | 10,0 | 8,4-11,6 | 22,1 | 18,5-25,8 | -12,1 | 3 |
| Чернозем типичный-P | 11,8 | 9,2-14,4 | 10,4 | 8,3-12,5 | 1,4 | 3 |
| Чернозем обыкн. – P (Ростовская) | 15,5 | 13,3-17,6 | 16,3 | 14,2-18,4 | -0,8 | 7 |
| Чернозем обыкн. – P (Каб. - Балкария) | 7,6 | 6,7-8,5 | 20,5 | 14,2-26,9 | -12,9 | 3 |
| Чернозем типичный-E | 11,6 | 10,9-12,9 | 12,1 | 8,7-15,4 | -0,5 | 13 |
| Чернозем обыкн.–E (Ростовская) | 9,6 | 7,6-11,6 | 17,0 | 14,7-19,3 | -7,4 | 6 |
| Чернозем обыкн. - E (Каб. - Балкария) | 15,8 | 13,7-17,8 | 18,1 | 16,2-20,4 | -2,3 | 3 |

В таблице таже представлены данные рассчитанных доверительных интервалов по вариации соотношения C:N в анализируемых пробах. Доверительные интервалы построены при заданном уровне $\alpha = 0.05$. Расчет доверительных интервалов производили в соответствии с формулой:

$$(\text{ДИ}) = X \pm Z (S \div \sqrt{n}) \quad (4)$$

Где;

X – среднее значение отношений C:N для выборки

Z – значение коэффициента Стьюдента (1,96)

S – величина среднеквадратического отклонения

n – число наблюдений

Анализируя данные, представленные в таблице 1, следует отметить, что для участков характерно неоднородное смещение отношений C:N в зависимости от проявления разных агроэкологических факторов. Для участков в Краснодарском крае отношение C:N является устойчивым маркером и не чувствительно к типу землепользования и проявлению эрозионных процессов. При этом отношения C:N на данных участках во фракциях LF<1.6 г/см³ и HF>1.6 г/см³ попадают в идентичные диапазоны охвата не выходя за пределы ДИ для средних при уровне $\alpha = 0.05$, что в потенциале может говорить о сходном качественном составе ОБ процессного и структурного пула характерного для почв округа Н1 IV и более быстром обмене ПОВ между функциональными пулами. Для обыкновенных черноземов округа Н1 II характерна большая чувствительность отношения C:N к агроэкологическим факторам. В фоновых референтных участках отношения C:N были более узкими во фракции HF>1.6 г/см³ относительно легкой фракции, причем для почв Предкавказской провинции данная закономерность отмечалась только для фоновых обыкновенных черноземов данного округа. В среднем отношения C:N_{LF} в для верхней части гумусового горизонта в фоновых почвах советовали 17,4 в то время, как для фракции HF>1.6 г/см³ отношение смещалось к 12,4 за счет существенного уменьшения валового содержания углерода. Для плакорной агроэкологической группы в агроландшафтах отношения C:N для фракций

$LF < 1.6 \text{ г/см}^3$ и $HF > 1.6 \text{ г/см}^3$ существенно меняются и последние по аналогии с почвами округа Н1 IV не имеют существенных различий. Можно предположить, что при формировании агроландшафтов повышается скорость оборота ПОВ за счет механического перемешивания верхнего горизонта. На эрозионных участках происходит существенное смещение отношения $C:N_{LF}$ в меньшую сторону, что в большей степени связано с уменьшением содержания C_{LF} эрозионной группы. Если для плакорных почв агроландшафтов содержание C_{LF} и N_{LF} в среднем соответствуют значениям 34% и 2,2%, то для эрозионной содержание C_{LF} снижается до 24,5%, а содержание N_{LF} , напротив, несколько возрастает, в среднем до 2,7%, чего не отмечается в гумидных ландшафтах округа Н1 IV, где при более высоком уровне содержания как C_{LF} так и N_{LF} отмечается более однородное уменьшение последних при проявлении процессов эрозии. Можно предположить, что более высокие уровни обеспеченности ПОВ в среднем способствуют большей его устойчивости к процессам минерализации при проявлении эрозионных процессов в агроландшафтах. Для черноземов Республики Кабардино-Балкария в естественном сложении на референтных участках характерно более узкое соотношение $C:N_{LF}$. При среднем отношении $C:N$ равным 10, для фракции $HF > 1.6 \text{ г/см}^3$ происходит расширение диапазона отношений до 22. Аналогичная тенденция характерна для плакорной агроэкологической группы почв агроландшафтов, однако, на эрозионных участках отношения $C:N_{LF}$ и $C:N_{HF}$ более однородны.

Помимо качественных параметров ОВ важным параметром также является выход денситометрических фракций на участках разного типа землепользования и почвах разных агроэкологических групп. Данные по выходу фракций с участков представлены на рисунке – 25

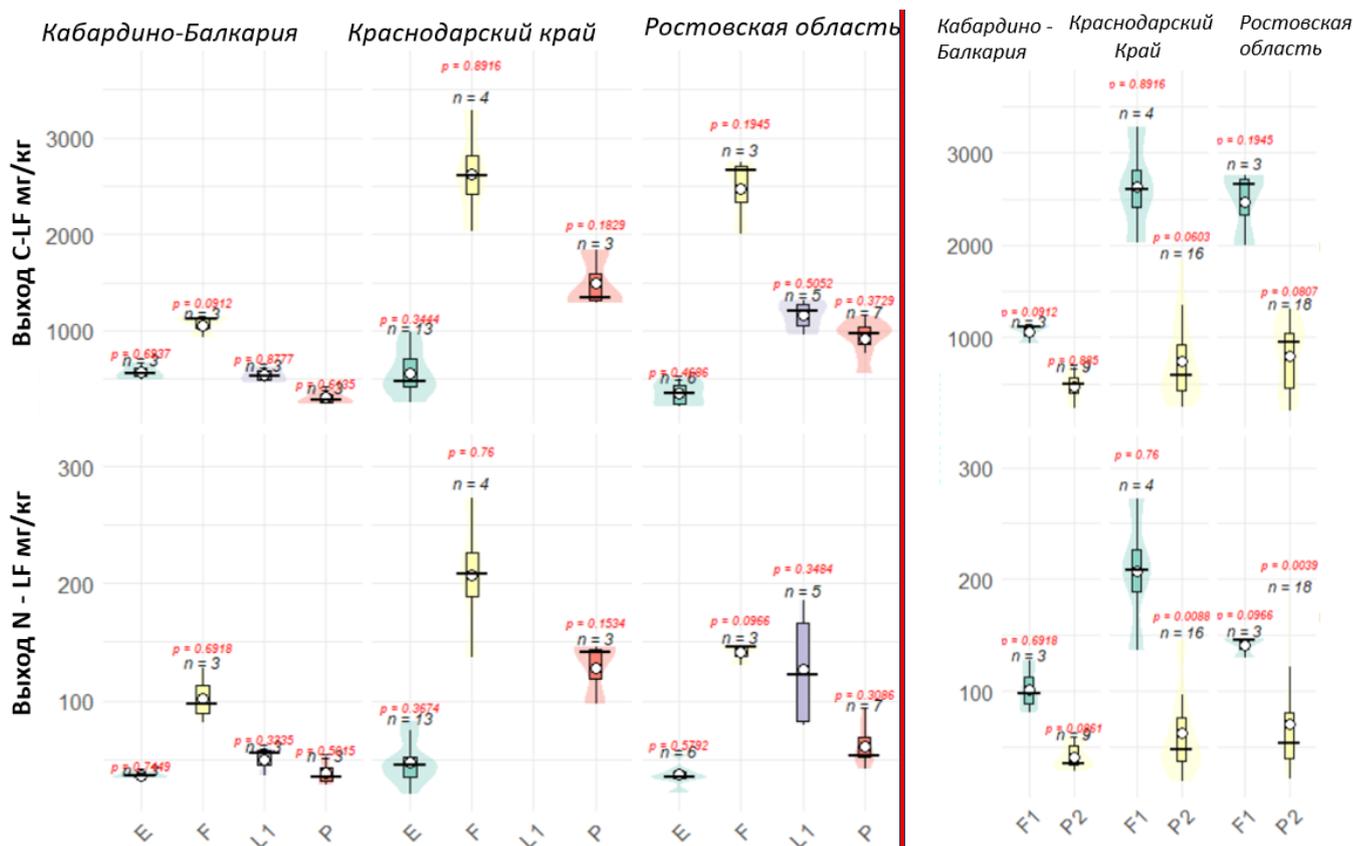


Рис. 25 Диаграммы размаха по выходу фракции LF<1.6 г/см³

* Р – Плакорные, Е – эрозийные, L1-Слабополугидроморфные, F – Фоновые референтные; F1 – Фоновые референтные участки, P2 – Агроландшафт

В левой части рисунка представлены данные с учетом их распределения по агроэкологическим группам почв, в правой части с учетом типа землепользования (пашня/необрабатываемые фоновые участки). Выход LF<1.6 г/см³ учитывали в мг/кг с учетом содержания углерода и азота во фракции и доли фракции в % от массы почв. Анализируя данные следует отметить, что для каждого участка характерно уменьшение выхода углерода и азота в агроландшафтах. При этом ΔC и ΔN выше на участках, где изначально содержание фракции LF<1.6 г/см³ был выше. Для почв исследуемых участков Ростовской области и Краснодарского края средний выход углерода C_{LF} в нативном состоянии соответствуют 2450-2600 мг/кг, в то время как для участков в Республике Кабардино-Балкария величина в среднем соответствует 1187 мг/кг. В агроландшафтах на исследуемых участках выход C_{LF} для всех участков варьирует в пределах 500-700 мг/кг, однако, если для Кабардино-Балкарии уменьшение пула углерода C_{LF} составило порядка 2-2,1 раз от фонового

содержания, то для исследуемых площадей в Ростовской области и Краснодарском крае выход C_{LF} уменьшился более чем в 3,5-4,8 раз. Квазиравновесное состояние углерода C_{LF} (мг/кг) для почв агроландшафтов Предкавказской провинции вне зависимости от привязки к округу лежало в пределах 500-700 мг/кг почвы. В свою очередь для черноземов Республики Кабардино-Балкария за счет несколько меньших фоновых уровней запаса C_{LF} при переходе до состояния равновесия минерализуется и высвобождается меньшее количество углерода. Выход N_{LF} на участках пашни варьирует в пределах от 36 до 134 мг/кг при среднем содержании N_{LF} 46-70 мг/кг. Высокая дисперсия данных для пашни хорошо объясняется при категоризации данных по агроэкологическим группам. Для почв Краснодарского края средний выход C_{LF} и N_{LF} для плакорной группы (черноземы типичные и черноземы выщелоченные) соответствует величине 1512 и 127 мг/кг, для эрозионной группы 546 и 49 мг/кг. Для участка в Республике Кабардино-Балкария данные по распределению C_{LF} и N_{LF} по агроэкологическим группам более однородны. Средний выход как углерода, так и азота на эрозионных участках не характеризовался статистически значимыми различиями между исследуемыми участками.

На основании массива данных при условии центрирования выборок с при исключении значений, выходящих за пределы $\bar{x} \pm 3\sigma$, был проведен корреляционный с использованием метода Пирсона, и получена матрица линейных зависимостей (рисунок - 26)

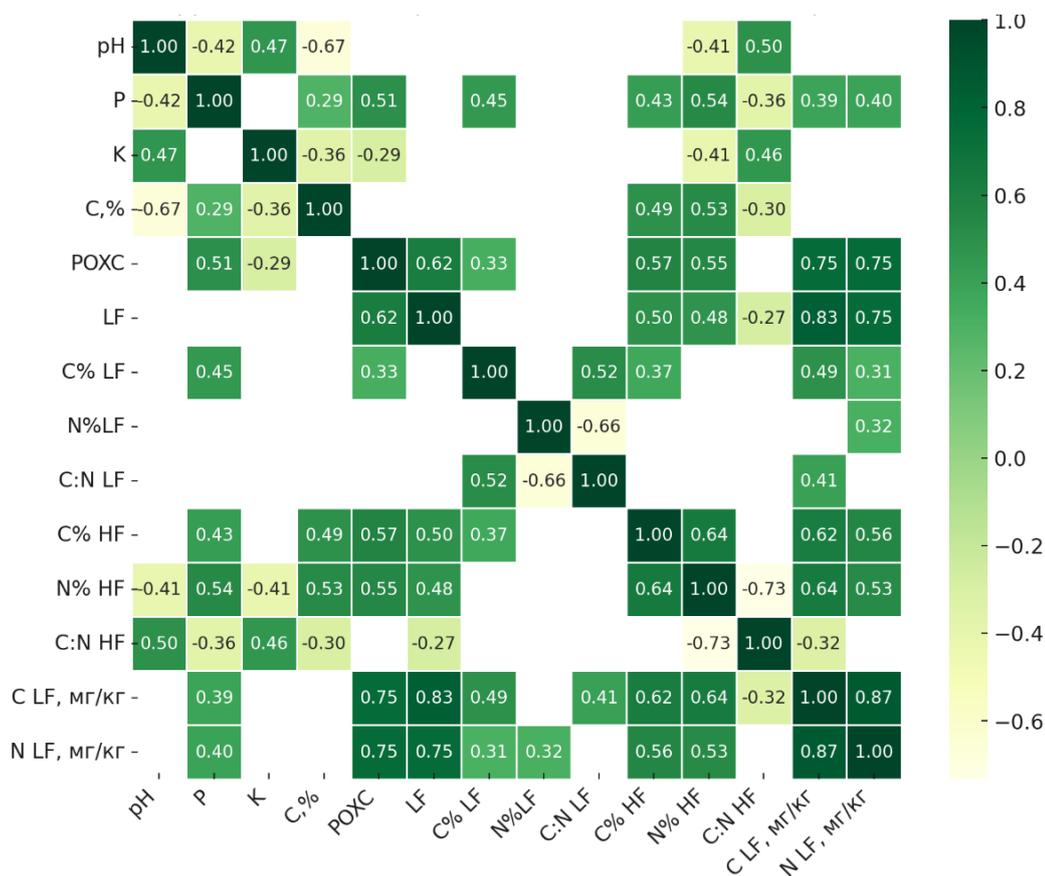
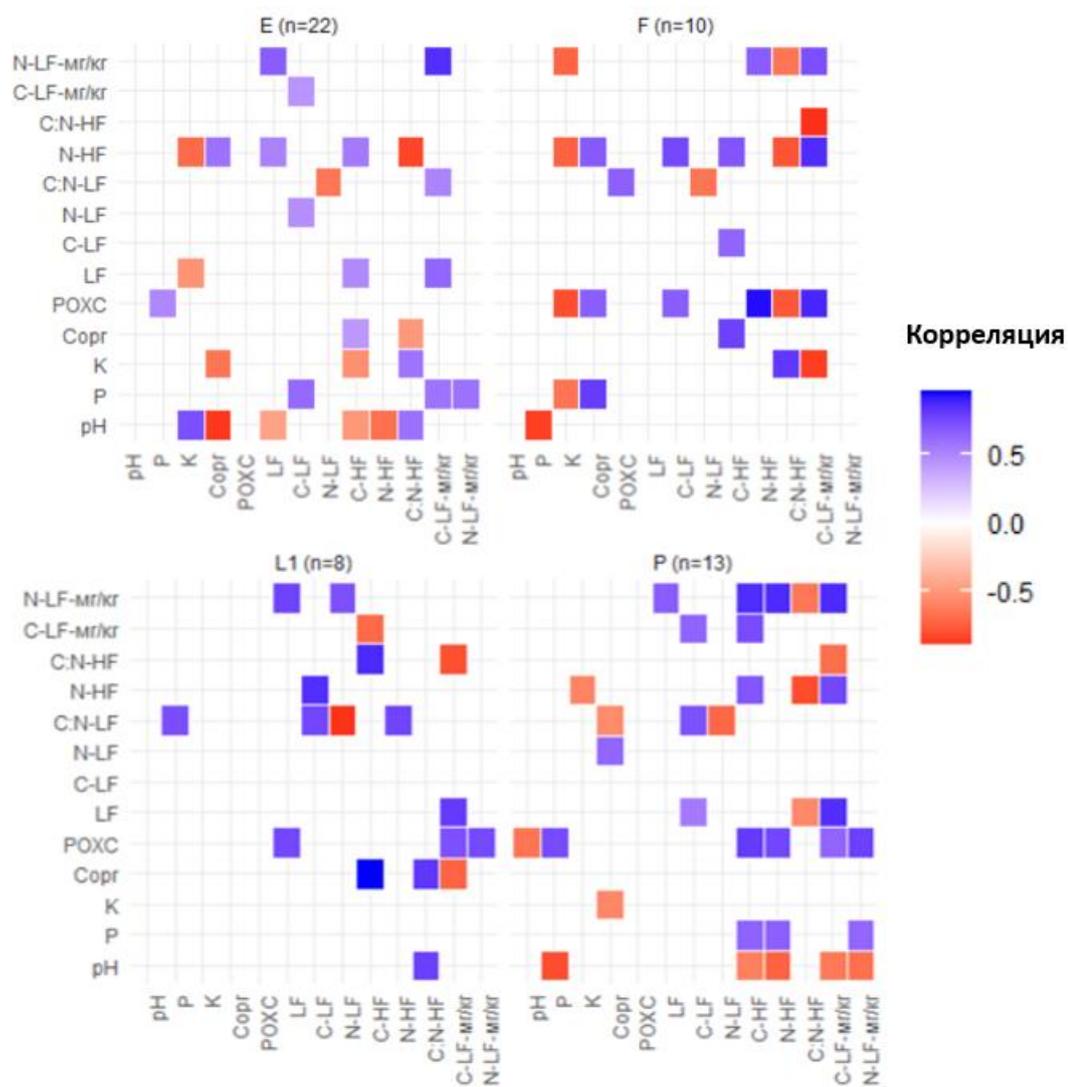


Рис. 26 Значения коэффициентов линейной корреляции Пирсона

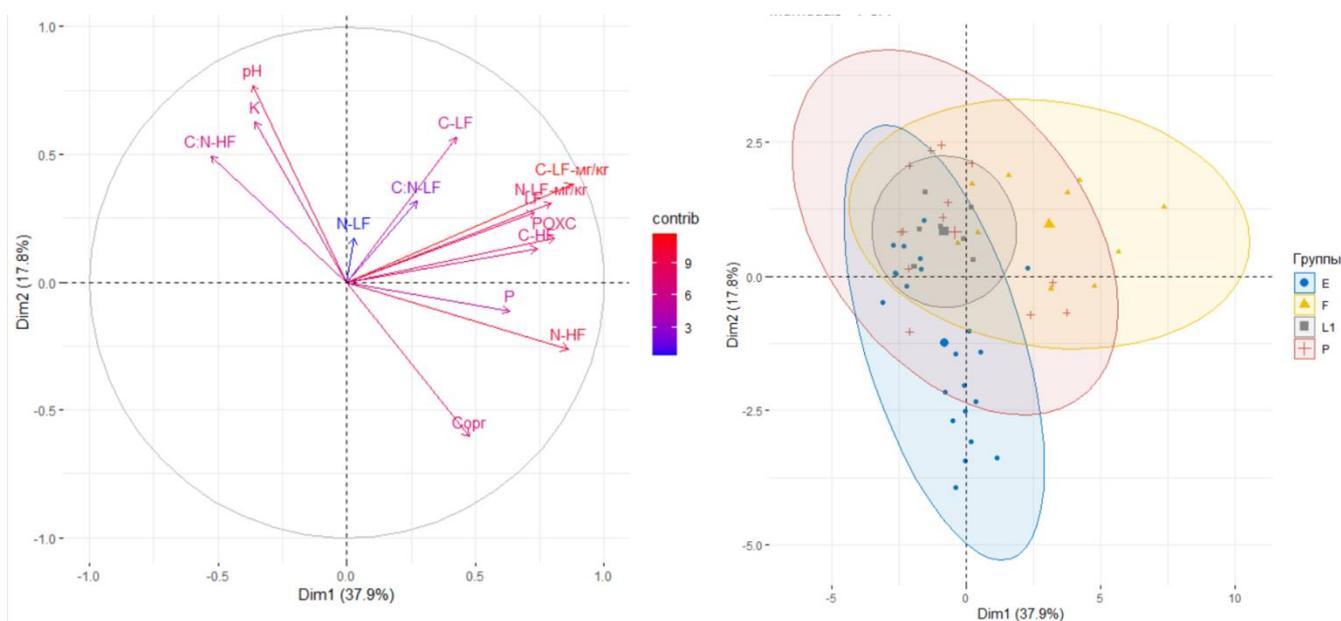
Важно отметить, что на рисунке - 25 представлена матрица без учета пространственной неоднородности агроэкологических факторов, и пространственной приуроченности к участкам. Оценивая связи между уровнем рН и содержанием $S_{орг}$ с учетом числа наблюдений $n=53$ и уровнем значимости $\alpha=0.05$ отмечается достоверная обратная связь при $R=-0.67$. Однако данная линейная зависимость в большей степени обусловлена провинциальными отличиями среднего уровня содержания $S_{орг}$ между участками, и одномерная линейная модель не работает внутри площадок. Структура связей данных внутри агроэкологических групп также неоднородна, если визуализировать данные, сгруппированные по группам (рисунок 27), то характер пространственной локализации связей и их значимость будет меняться.



* P – Плакорные, E – эрозийные, L1-Слабополугидроморфные, F – Фоновые референтные;

Рис. 27 Матрица для данных сгруппированных по агроэкологическим группам

Сила и направление связей существенно отличается в зависимости от агроэкологических условий. Если для подгруппы L1 между углеродом фракции C_{HF} и уровнем рН отмечается достоверная прямая связь при $R > 0.65$, то для подгруппы P между аналогичными переменными просматривается обратная взаимосвязь при $R = -0,37$, что в целом сопоставимо с выборкой E, для фоновых референтных участков (F) взаимосвязей между данными параметрами не отмечается.



* P – Плакорные, E – Эрозионные, L1-Слабополугидроморфные, F – Фоновые референтные;

Рис. 28 Визуализация данных в векторах главных компонент

На рисунке 28 представлены графики визуализирующие данные в векторах главных компонент. Переменные, вносящие наибольший вклад в первую главную компоненту (доля охвата дисперсии 37,9%): C_{HF} , N_{HF} , C_{LF} , N_{LF} , POXC и уровень pH. Эти переменные, расположенные преимущественно вдоль первой главной компоненты, являются основными переменными, дифференцирующими наблюдения. Вторая главная компонента охватывает 17,8% дисперсии: здесь влияние переменных менее выражено, однако можно заметить, что, переменная $C_{орг}$ отличается по типу интерпретируемых данных, что выражается в направлении связи вдоль вектора второй компоненты.

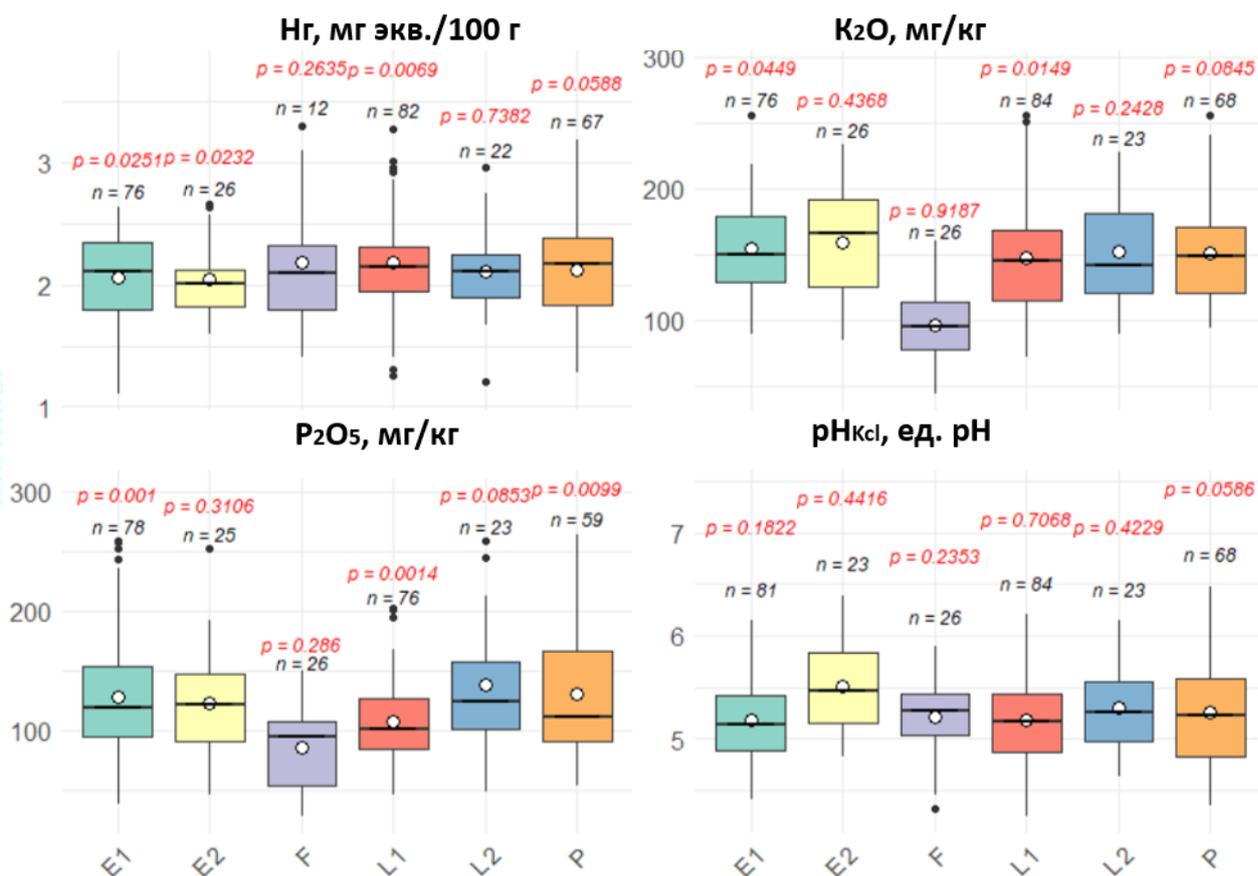
Группы частично разделены, но для них характерны зоны пересечения. Области доверительных интервалов (E, F, L1, P) пересекаются, но можно отметить тенденции к кластеризации: Группа E (синяя область) расположена в нижней части графика, что говорит о ее отличии по внутреннему разбросу данных. Группа F (желтая область) занимает верхнюю часть пространства, указывая на ее специфические характеристики. Группы L1 и P (красная и оранжевая области) расположены ближе друг к другу, в центральной части, что может свидетельствовать об их схожести по основным признакам.

Так как переменные (левая часть рис. 28) и индивидуальные точки (правая часть рис. 28) представлены в одном пространстве главных компонент, можно судить о том, какие параметры могут быть связаны с различиями между группами. Облако точек для подгруппы Е смещено в нижнюю часть области пространства векторов, то аналогичное смещение характерно для переменной $C_{орг}$ и эрозионные участки в большей степени отличаются от подгрупп L1 P и F за счет меньшего содержания углерода фракции $C_{орг}$. Аналогично, если группа F расположена ближе к области с локализацией переменных C_{LF} N_{LF} и РОХС, можно сделать вывод, что именно эти показатели являются наиболее сильными классификаторами для этой группы. Анализ главных компонент показал, что переменные, связанные с содержанием углерода и азота C_{LF} , N_{LF} , C_{HF} , N_{HF} , РОХС оказывают наибольшее влияние на распределение дисперсии образцов. В то же время группы наблюдений частично разделяются, но имеют определенные зоны пересечения, что говорит о наличии похожих свойств у некоторых групп.

3.2 Особенности накопления органического вещества в агроландшафтах среднерусской широколиственно-лесной провинции

3.2.1 Агрохимические свойства почв

Всего для исследуемой территории, выборка составила 288 наблюдений. На рисунке – 29 представлена вариация агрохимических показателей почв сгруппированных по выделенным агроэкологическим группам почв.



* Р – Плакорные, E1 – Слабоэрозионные, E2 – Среднеэрозионные, L1-Слабополугидроморфные, L2 - Среднеполугидроморфные, F – Фоновые референтные участки

Рис. 29 Диаграммы размаха по агрохимическим параметрам исследуемых почв

Плакорная агроэкологическая группа (Р) представлена типом серых лесных и светло-серых лесных, слабополугидроморфная (L1) – серыми лесными поверхностно-глееватыми на волнистых вершинах водоразделов, с небольшим уклоном до 1°. Группа L2 – представлена серыми лесными грунтово-глеевыми и профильно-глеевыми, локализованными, как правило, в крупных замкнутых понижениях, участках с неглубоким залеганием грунтовых вод. Эрозионные группы E1 и E2 представлены группами слабосмытых (E1) и средне и сильносмытых аналогов (E2) серых лесных и светло-серых лесных почв, локализованных на склонах крутизной от 2 до 8°.

Гидролитическая кислотность варьирует в пределах от 1,2 до 3,2 мг-экв./100 г. Проверка нормальности выявила значительное отклонение распределения от нормального для групп E2 и L1 и Р ($p < 0.05$), тогда как для

групп L2 и E1 нормальность распределения данных подтвердилась ($p > 0.05$). Содержание подвижных форм K_2O варьирует в диапазоне от 89 до 286 мг/кг. В подвыборках E1 и L1 по данному параметру распределение данных отличается от нормального ($p < 0.05$). Содержание подвижных форм P_2O_5 варьирует в пределах от 44 до 279 мг/кг. Только для групп L2 и E2 гипотеза о нормальности распределения была подтверждена. Уровень кислотности pH_{kcl} варьирует в пределах от 4,01 до 6,86 единиц. Высокая пространственная неоднородность отмечается по каждому параметру, однако, следует отметить, что показатель pH_{kcl} является более чувствительным к проявлению агроэкологических факторов и в большей степени отражает генетические особенности почв и условия их формирования. Учитывая тот факт, что в представленной выборке анализируются почвы агроландшафтов, высокая пространственная неоднородность по параметрам обеспеченности K_2O и P_2O_5 может быть связана с дополнительным внесением удобрений и данные показатели в меньшей степени отражают свойства почв при проявлении агроэкологических факторов, а указывают на неоднородность за счет дополнительного поступления этих элементов.

3.2.2 Содержание лабильных и стабильных компонентов ПОВ

Оксидиметрические фракции. Результаты определений $C_{орг}$ и РОХС для участков, типизированных по агроэкологическим группам (Кирюшин, 2005), представлены в виде коробчатых диаграмм на рисунке - 29. Содержание фракции РОХС варьировало в диапазоне 97-754 мг/кг для агроландшафтов и 144-822 мг/кг для референтных участков с лесной растительностью, при этом максимальные значения содержания углерода данной фракции, в среднем 463 мг/кг, отмечались в пробах гумусовых горизонтов агроэкологической группы L2, испытывающих повышенное увлажнение. Минимальным содержанием углерода фракции РОХС характеризовались пахотные горизонты среднеэрозионных агроэкологических групп (Кирюшин, 2005), в среднем 372 мг/кг, соответственно. Оценивая вариацию содержания углерода фракции РОХС, стоит отметить, что для участков пашни характерна низкая

чувствительность данного параметра к агроэкологическим условиям. Все средние значения в подвыборках лежат в пределах 10-12% вариации признака 372-448 мг/кг. Среднее содержание углерода фракции РОХС (мг/кг) снижается в ряду: Среднеполугидроморфные – Фоновые референтные – Плакорные – Слабоэрозионные – Среднеэрозионные – Слабополугидроморфные.

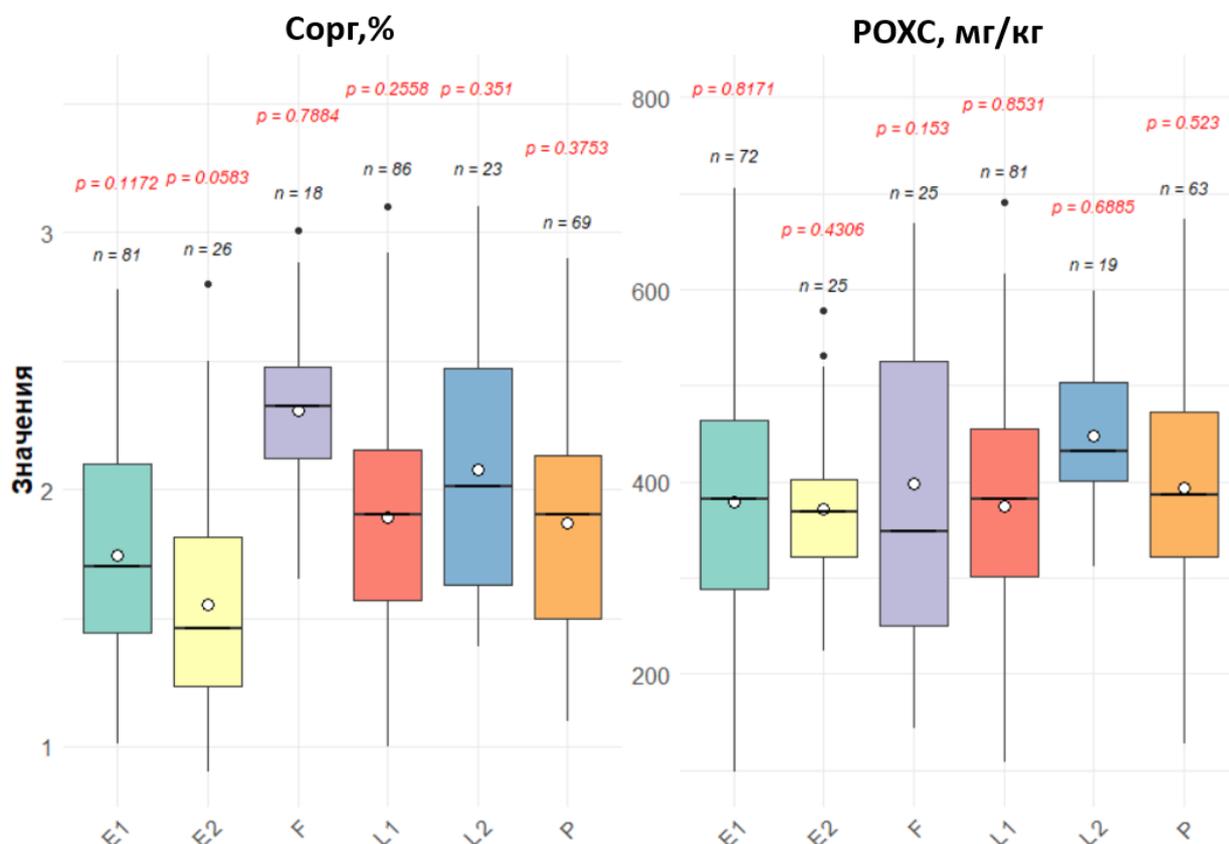


Рис. 30 Диаграммы размаха по содержанию $C_{орг}$ и РОХС

* P – Плакорные, E1 – Слабоэрозионные, E2 – Среднеэрозионные, L1-Слабополугидроморфные, L2 – Среднеполугидроморфные., F – фоновые референтные участки

Для $C_{орг}$, определяемого методом бихроматного окисления, характерно несколько иное распределение значений между агроэкологическими группами относительно углерода фракции РОХС. При среднем содержании $C_{орг}$ по всем наблюдениям на уровне 1,91% максимальное содержание углерода данной фракции отмечается в фоновых референтных участках под естественной лесной растительностью. Среднее содержание $C_{орг}$ в фоновых участках соответствует величине 2,31%, для плакорной группы обрабатываемых участков (средняя величина $C_{орг}$ снижается до уровня 1,87%. Для всех участков характерна высокая вариация внутри наблюдаемых значений, связанная с

пространственной неоднородностью. На фоновых участках минимум $C_{орг}$ соответствует величине 1,65%, максимум 3,01%. Для плакорной группы агроландшафтов значения $C_{орг}$ варьируют в пределах от 1,1% до 2,9%. На слабоэрозионных и среднеэрозионных участках $C_{орг}$ снижается в среднем до уровня 1,74% и 1,55% соответственно. На слабополугидроморфной группе как вариация значений, так и среднее содержание практически соответствует последним в плакорных участках пашни. На среднеполугидроморфных участках отмечается некоторое повышение уровня содержания $C_{орг}$ относительно плакорной группы до 2,01%, при этом минимум и максимум уже соответствуют величинам 1,39% и 3,1% соответственно. На рисунке – 31 представлены попарные сравнения средних значений РОХС и $C_{орг}$ в подвыборках на почвах разных агроэкологических групп.

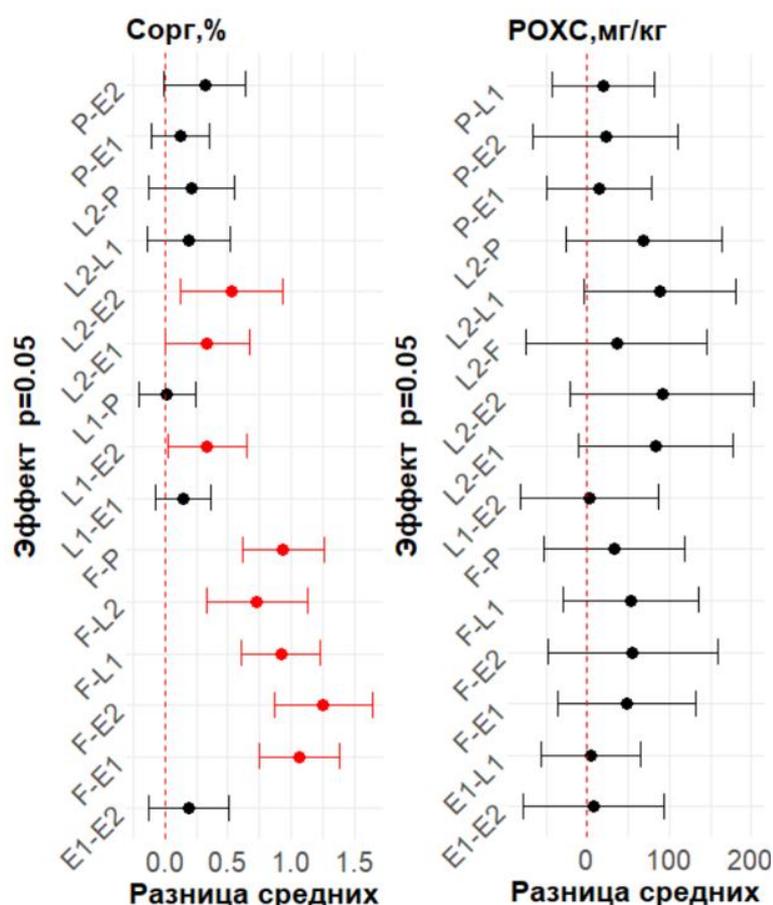


Рис. 31 Оценка различий средних значений по критерию Тьюки

* P – Плакорные, E1 – Слабоэрозионные, E2 – Среднеэрозионные, L1-Слабополугидроморфные (, L2 – Среднеполугидроморфные., F – Фоновые референтные участки

Установлено, что при величине $\alpha = 0,05$ среднее содержание углерода РОХС (мг/кг), во всех подвыборках значимо не отличается. При этом по величине содержания $C_{\text{орг}}$ данные свидетельствуют о наличии достоверных различий средних в группах (на рисунке 30 – доверительные интервалы выделены красным цветом) между: Среднеполугидроморфными (L2) – Среднеэрозионными (E2), где разница по содержанию $C_{\text{орг}}$ составляет 0,5%; Среднеполугидроморфными (L2) – Слабоэрозионными (E2), где разница по содержанию $C_{\text{орг}}$ составляет 0,3%, однако нижняя граница доверительного интервала лежит близко к области отсутствия эффекта; Слабополугидроморфными (L1) – Среднеэрозионными (E2), где разница по содержанию $C_{\text{орг}}$ составляет 0,3% и нижняя граница доверительного интервала аналогично лежит близко к области отсутствия эффекта. Достоверные статистические различия также отмечаются между фоновыми участками и всеми агроэкологическими группами агроландшафтов при средних различиях относительно фона для плакорных (P) на уровне 0,9%, для слабоэрозионных (E1) на уровне 1,0%, для среднеэрозионных (E2) на уровне 1,2%, для слабополугидроморфных (L1) на уровне 0,9%, среднеполугидроморфных (L2) на уровне 0,7%.

Денситометрические фракции

В результате проведения денситометрического фракционирования выделены две фракции $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$ и $HF > 1.6 \text{ г/см}^3$. На рисунке - 32 представлены данные об измеренных параметрах во фракции $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$

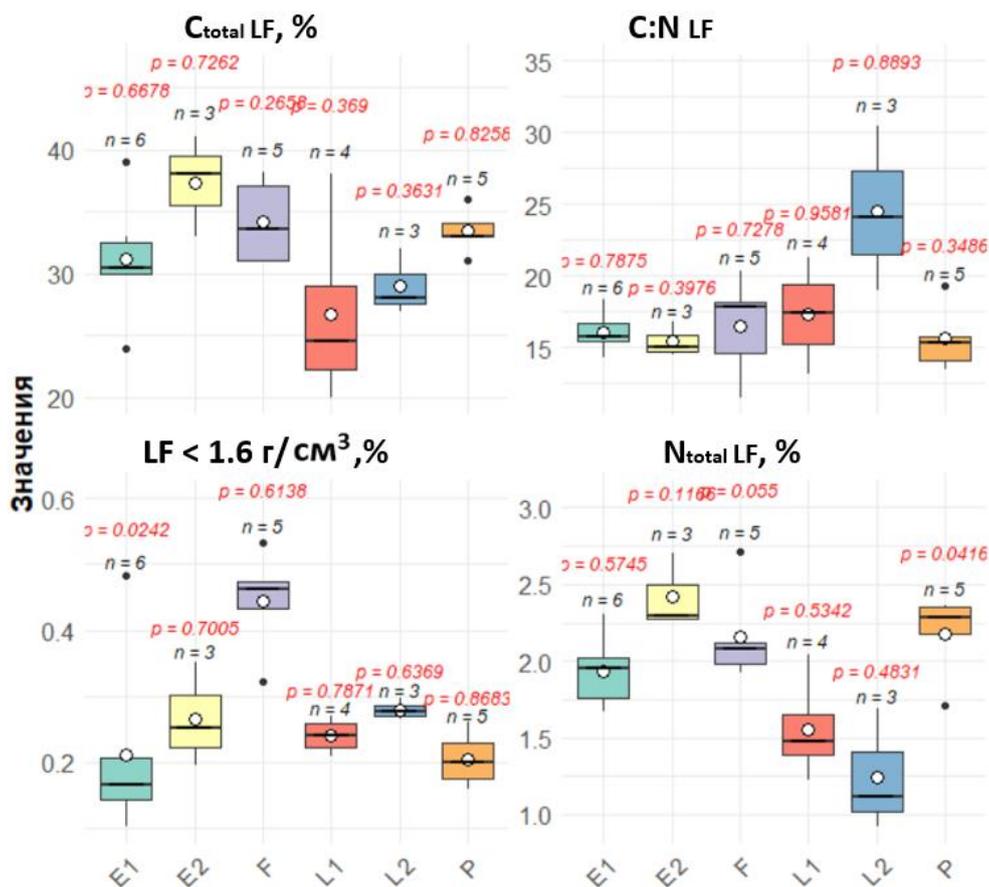


Рис. 32 Диаграммы размаха по характеристикам фракции $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$

* P – Плакорные, E1 – Слабоэрозионные, E2 – Среднеэрозионные, L1– Слабополугидроморфные, L2 – Среднеполугидроморфные, F – Фоновые референтные участки

Для оценки типа распределения данных использовался критерий Шапиро-Уилка. Максимальным содержанием C_{LF} характеризуются фракции, выделенные из почв среднеэрозионной агроэкологической группы, где при величине C_{LF} в среднем на уровне 37,3% данный параметр варьирует в пределах от 33% до 41%. Минимальное содержание C_{LF} и самая высокая вариация характерна для проб $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$ выделенных из группы слабополугидроморфных (L1) при среднем значении C_{LF} на уровне 26,8% и вариации в пределах от 20% до 38%. Максимальные значения N_{LF} характерны для фракций, выделенных из проб среднеэрозионной агроэкологической группы (E2), где среднее значение соответствует величине 2,42% при вариации N_{LF} от 2,26% до 2,70%. Минимальные значения по содержанию N_{LF} характерно для среднеполугидроморфной агроэкологической группы (L2) при среднем

значении N_{LF} на уровне 1,24% и вариации параметра в пределах 0,92% 1,69%. При оценке соотношения $C:N_{LF}$ особенно выделяется более широкое отношение характерное для проб среднеполугидроморфной агроэкологической группы (L2) где величина $C:N_{LF}$ в среднем соответствует значению 24,5 и варьирует в пределах от 18,9 до 30,4. Оценивая накопление ПОВ, на среднеполугидроморфной группе (L2) отмечается максимальное содержание $C_{орг}$ в пахотных горизонтах, и более широкое соотношение $C:N_{LF}$, по всей видимости, избыток влаги может способствовать повышению уровня содержания ПОВ за счет замедления процессов минерализации большего насыщения структурного пула. Соотношения $C:N_{LF}$ в остальных подвыборках характеризуются большей однородностью и значения варьируют в пределах от 11 до 20, что характеризует фракцию $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$ остальных групп как пул потенциально быстро-минерализуемого углерода. Выход $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$ в % от массы почвы был относительно однородным для почв агроландшафтов. Доля $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$ в % от массы почвы на обрабатываемых участках варьировала в диапазоне от 0,10% до 0,35%, достигая минимальных значений в подгруппе E1 и максимальных в подгруппе E2. Средний выход фракции $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$ с фоновых участков составил 0,44%, что в 2 раза выше, относительно участков пашни. С учетом содержания углерода и азота во фракции $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$ рассчитано содержание последних с учетом выхода фракции в % от массы почвы. На рисунке 33 представлены диаграммы размаха, характеризующие запас углерода и азота во фракции $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$.

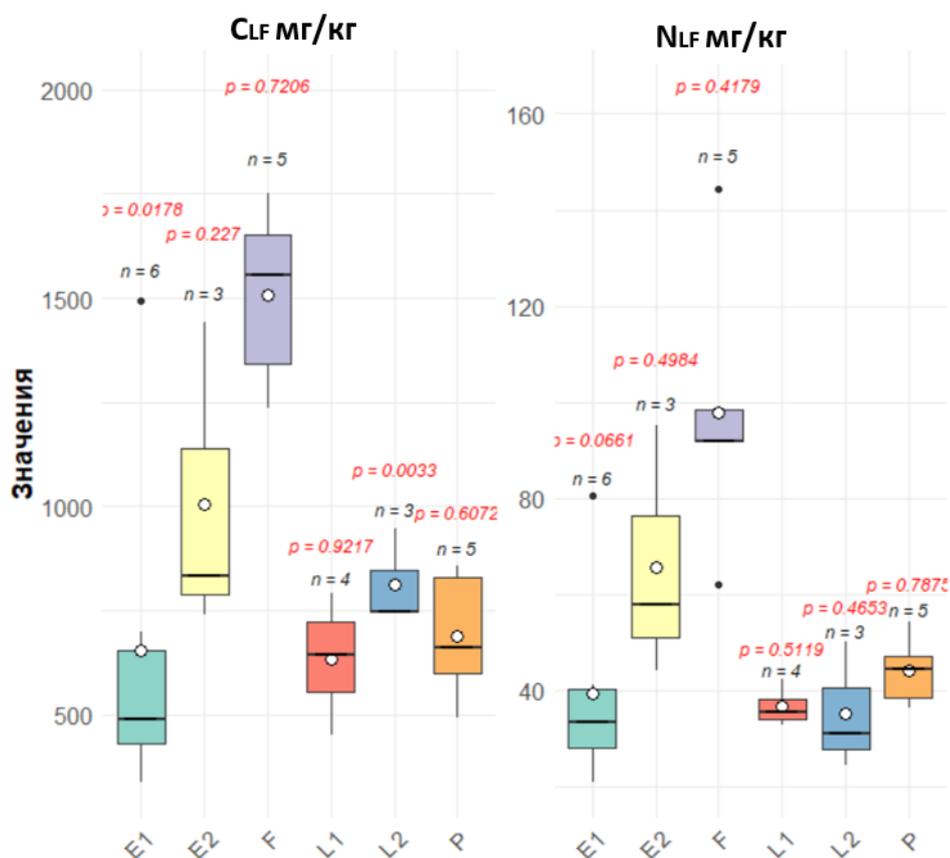


Рис. 33 Содержание углерода и азота во фракции $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$

* P – Плакорные, E1 – Слабоэрозионные, E2 – Среднеэрозионные, L1– Слабополугидроморфные, L2 – Среднеполугидроморфные, F – Фоновые референтные участки

Установлено, что содержание углерода и азота фракции $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$ было несколько выше на фоновых участках, при этом для участков пашни максимальное содержание характерно для среднеэрозионной группы (E2). Среднее содержание углерода $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$ для пашни 500-700 мг/кг, для азота 40-60 мг/кг, исключая группу среднеэрозионных, где содержание C_{LF} и N_{LF} несколько выше и соответствует величине 1012 мг/кг и 66 мг/кг соответственно. Для фоновых участков за счет большего выхода фракции $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$ среднее содержание C_{LF} и N_{LF} соответствует 1509 мг/кг и 98 мг/кг соответственно.

Содержание углерода и азота в $HF > 1,6 \text{ г/см}^3$ характеризуется несколько иным распределением относительно агроэкологических групп почв.

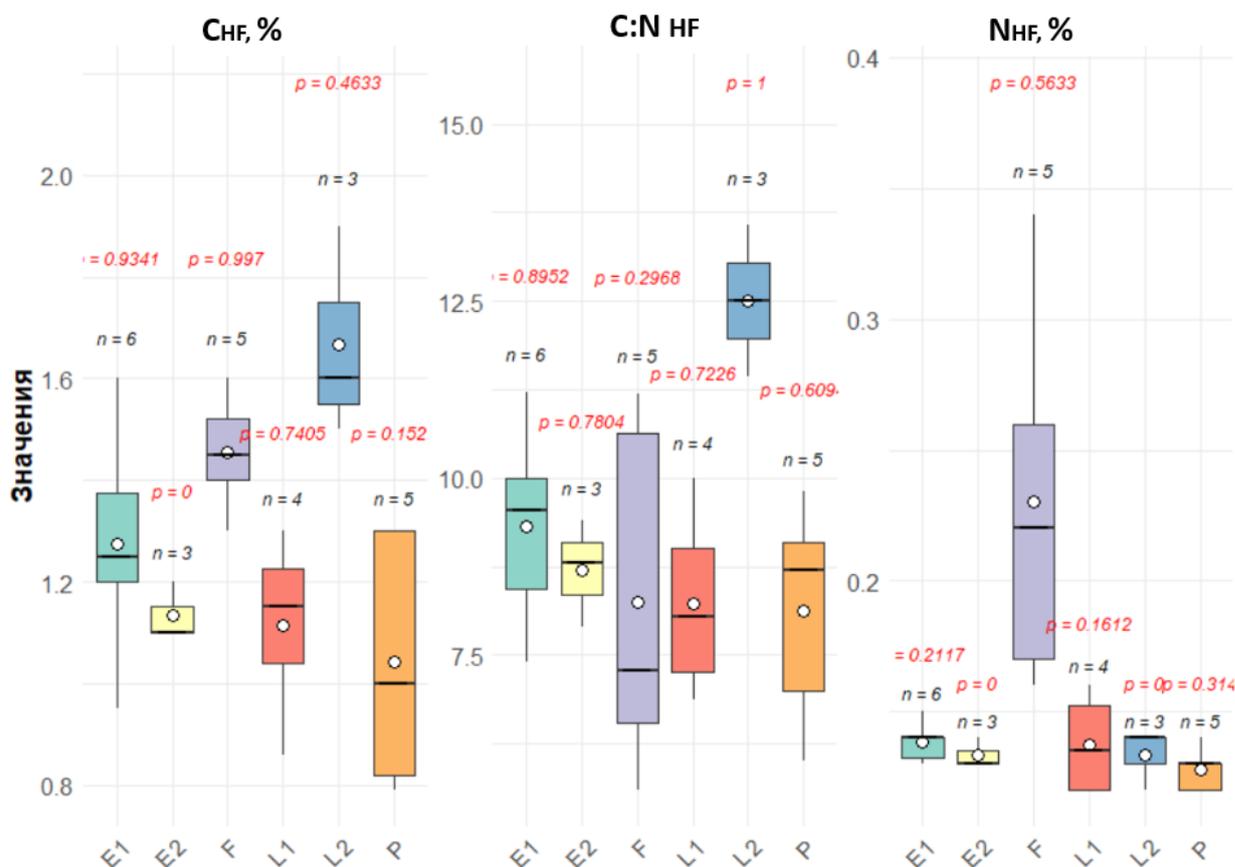


Рис. 34 Диаграммы размаха по характеристикам фракции HF > 1,6 г/см³

* P – Плакорные, E1 – Слабоэрозионные, E2 – Среднеэрозионные, L1 – Слабополугидроморфные, L2 – Среднеполугидроморфные, F – Фоновые референтные участки

На рисунке – 34 представлены данные распределения содержания азота и углерода во фракции HF > 1,6 г/см³. Установлено, что максимальное содержание углерода отмечалось на пробах среднеполугидроморфной агроэкологической группы при среднем значении C_{NF} соответствующем уровню 1,60%. Содержание N_{NF} для подгруппы L2 в свою очередь было сопоставимо со средним содержанием N_{NF} других агроэкологических групп. При этом на фоновых участках отмечалось большее накопление азота во фракции HF > 1,6 г/см³, среднее содержание которого в последней соответствовало величине 0,23% при вариации значений в пределах от 0,16% до 0,34%. Наиболее показательный маркер и наиболее чувствительный к агроэкологическим условиям параметр – показатель соотношения C:N_{NF}. На примере данной выборки наиболее широкое отношение C:N_{NF} (в среднем 12,5) отмечалось в пробах среднеполугидроморфной группы, в то время как для почв

формирующихся в большей степени в автоморфных условиях (P, E1, E2, F) среднее соотношение $C:N_{HF}$ принадлежит области в пределах 7,0-8,0. Аналогичная тенденция характерна и для фракции $LF < 1,6 \text{ г/см}^3$. При оценке соотношения $C:N_{LF}$ особенно выделяется более широкое отношение характерное для $LF < 1,6 \text{ г/см}^3$ выделенной из проб среднеполугидроморфной агроэкологической группы (L2), где величина $C:N_{LF}$ в среднем соответствует значению 24,5 и варьирует в пределах от 18,9 до 30,4 (Для автоморфных условий соотношение $C:N_{LF}$ в среднем соответствовало величине 15 при вариации от 11 до 20). Для данной выборки в большей степени характерно накопление углерода и азота во фракции $HF > 1,6 \text{ г/см}^3$. В почвах под естественной растительностью (F) содержание C_{HF} было выше последнего относительно обрабатываемых участков, при этом и содержание C_{LF} также было максимальным. Повышенный гидроморфизм вносит существенный вклад в стабилизацию ПОВ. Соотношение $C:N_{HF}$ почв, формирующихся в автоморфных условиях, в среднем, соответствует величине 8-8,5, что характеризует данный пул как быстроминерализуемый. На рисунке 35 представлена корреляционная матрица построенная с использованием метода Пирсона для анализируемой структуры данных с визуализацией только достоверных связей для $\alpha=0.05$.

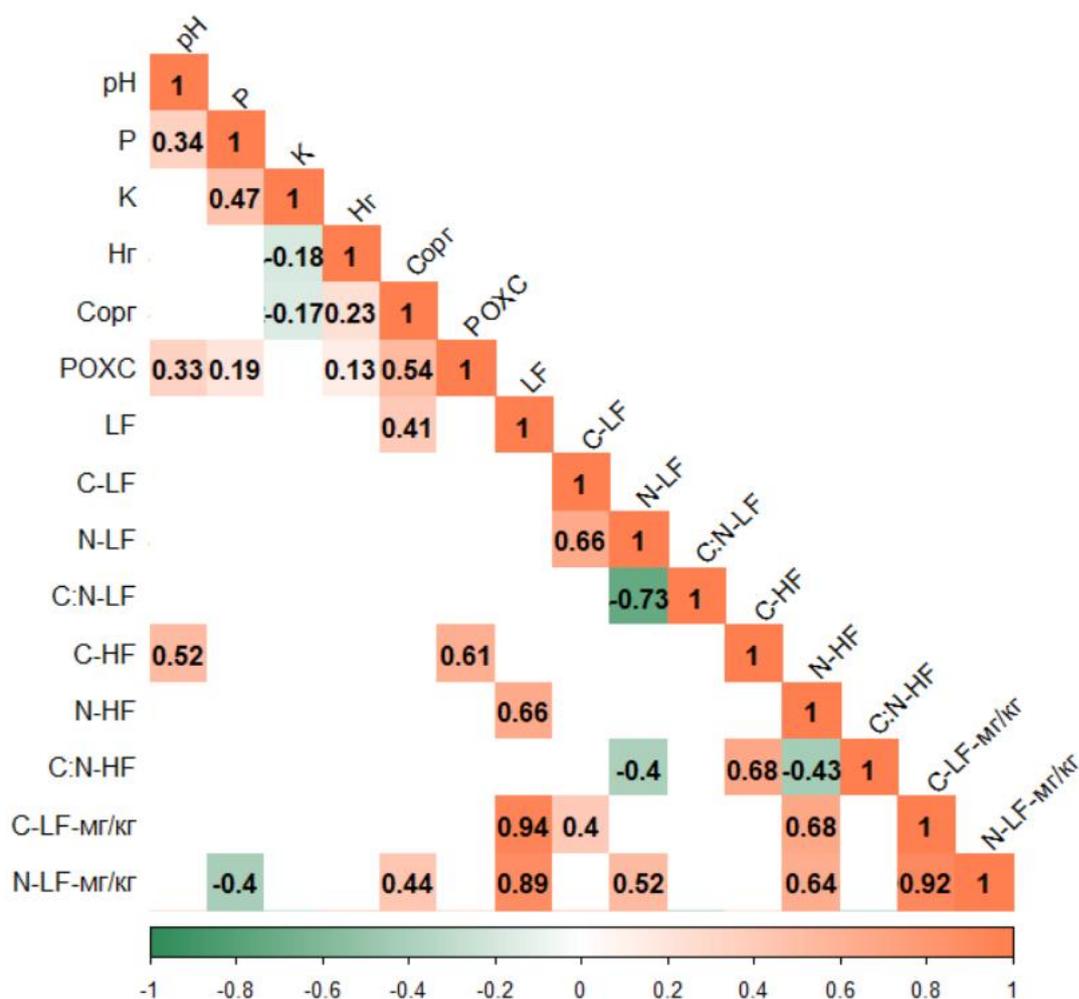


Рис. 35 Матрица линейных зависимостей для исследуемых параметров

Анализируя связи между переменными, стоит отметить, что наиболее тесные взаимодействия отмечается между рядом фракций ПОВ, что в большинстве случаев объясняется автокорреляционной зависимостью. Выход фракции LF < 1,6 г/см³ тесно связан с содержанием азота во фракции HF > 1,6 г/см³ при R = 0,66. Доля LF < 1,6 г/см³ не оказывает статистически значимое влияние на содержание углерода во фракции остатка HF > 1,6 г/см³, при этом отмечается статистически значимая связь между оксидиметрически определяемым C_{орг} и выходом фракции LF < 1,6 г/см³ при R = 0,41. Более высокое содержание углерода во фракции LF < 1,6 г/см³, как правило, отмечается совместно с более высоким % содержанием N_{LF}. Уровень pH в рамках анализируемых данных связан с содержанием углерода HF > 1,6 г/см³ при R = 0,52. Прямые зависимости также отмечают между уровнем pH и содержанием

подвижного фосфора и углерода РОХС. Важно отметить, что между бихромат-окисляемым углеродом C_{org} и фракцией РОХС также отмечается статистически значимая линейная зависимость.

Для наглядной визуализации, а также оценки вклада переменных в дисперсию был применен метод главных компонент.

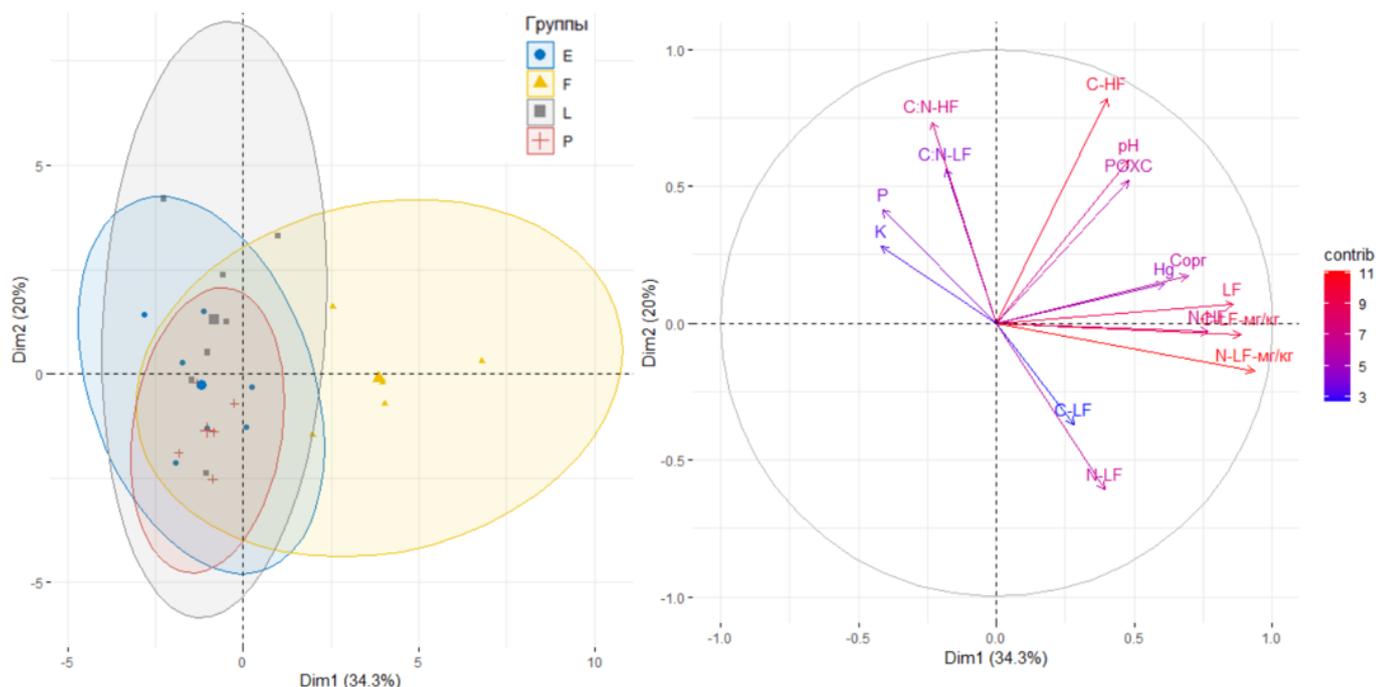


Рис. 36 Визуализация данных в векторах главных компонент.

На рисунке 36 представлена визуализация данных в векторах главных компонент. Левая часть графика – проекция наблюдений на пространство главных компонент: наблюдения, сгруппированные по категориальному признаку (E – эрозионная, F – фоновые-референтные, L – полугидроморфные, P – плакорные), каждая из которых представлена отдельным цветом и формой маркера. Первая главная компонента объясняет 34.3% общей дисперсии, вторая – 20% вариации данных. Наблюдается частичное перекрытие групп, однако группа F (фоновые участки) и E (эрозионные участки) склонны к пространственному разделению вдоль оси первой компоненты, что может свидетельствовать о значимых отличиях в свойствах.

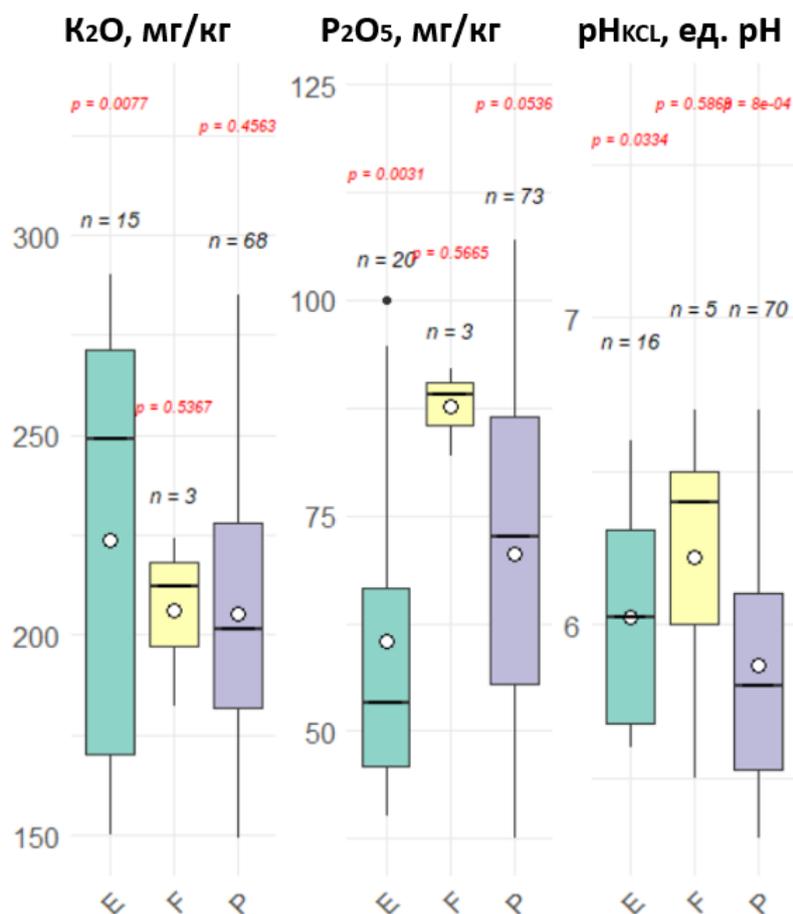
Характеризуя вклад исходных переменных в формирование главных компонент, стоит отметить, что переменные, C_{HF} , $C:N_{HF}$, N_{LF} , мг/кг, LF, C_{LF} и N_{LF} вносят наибольший вклад в первую компоненту, что отражено формированием

кластера вдоль оси в правой части векторов главных компонент. Противоположное направление векторов переменных, таких как C_{LF} и $C:N_{LF}$, указывает на обратную взаимосвязь между ними в пространстве главных компонент. Важно отметить, что при визуализации точек в векторах четко выделяются 2 кластера данных.

3.3 Особенности накопления органического вещества в агроландшафтах среднерусской-лесостепной провинции

3.3.1 Агрохимические свойства почв

Для исследуемой территории выборка составила 128 наблюдений. При типизации почв агроландшафтов выделены участки плакорной и эрозионной групп. Также представлены данные по необрабатываемым черноземам плакорной агроэкологической группы.



* P – Плакорные, E – Эрозионные, F – Фоновые референтные участки

Рис. 37 Диаграммы размаха по агрохимическим параметрам исследуемых

ПОЧВ

На рисунке 37 представлена визуализация распределения подвижных форм калия и фосфора, определяемых в уксуснокислой вытяжке 0,5 н. и кислотности почвы pH_{KCl} . Содержание подвижных форм K_2O варьирует в диапазоне от 117 до 995 мг/кг. В подвыборке Е по данному параметру распределение данных отличается от нормального ($p < 0.05$). Содержание подвижных форм P_2O_5 варьирует в пределах от 19 до 180 мг/кг. Уровень кислотности почвы pH_{KCl} варьирует в пределах от 4,7 до 7,3 ед. Содержание K_2O и P_2O_5 на фоновых участках с естественной лесной растительностью составляет 107 и 207 мг/кг, что соответствует медиальному уровню обеспеченности относительно агроландшафтов.

3.3.2 Содержание лабильных и стабильных компонентов ПОВ

Оксидиметрические фракции

Установлено, что средняя величина $C_{орг}$ для почв агроландшафтов соответствует величине 6,10 %, при вариации в пределах от 3,2 до 7,7 %. Содержание $C_{орг}$ в значительной степени связано с положением почв в рельефе. На склонах с уклоном более чем 2-3°, в особенности южной экспозиции, отмечалось снижение среднего содержания $C_{орг}$ до 4,64%. Уменьшение содержания $C_{орг}$ на склонах южной экспозиции в большей степени вызвано проявлением эрозионных процессов. Среднее содержание углерода фракции РОХС соответствует значению 824 мг/кг при вариации в пределах от 554 до 1256 мг/кг. Установлено, что между агроэкологическими группами отмечаются достоверные различия в содержании $C_{орг}$ и РОХС. На рисунке 38 представлены данные по среднему содержанию $C_{орг}$ и РОХС и оценка достоверности различий средних в подгруппах с учетом критерия Тьюки.

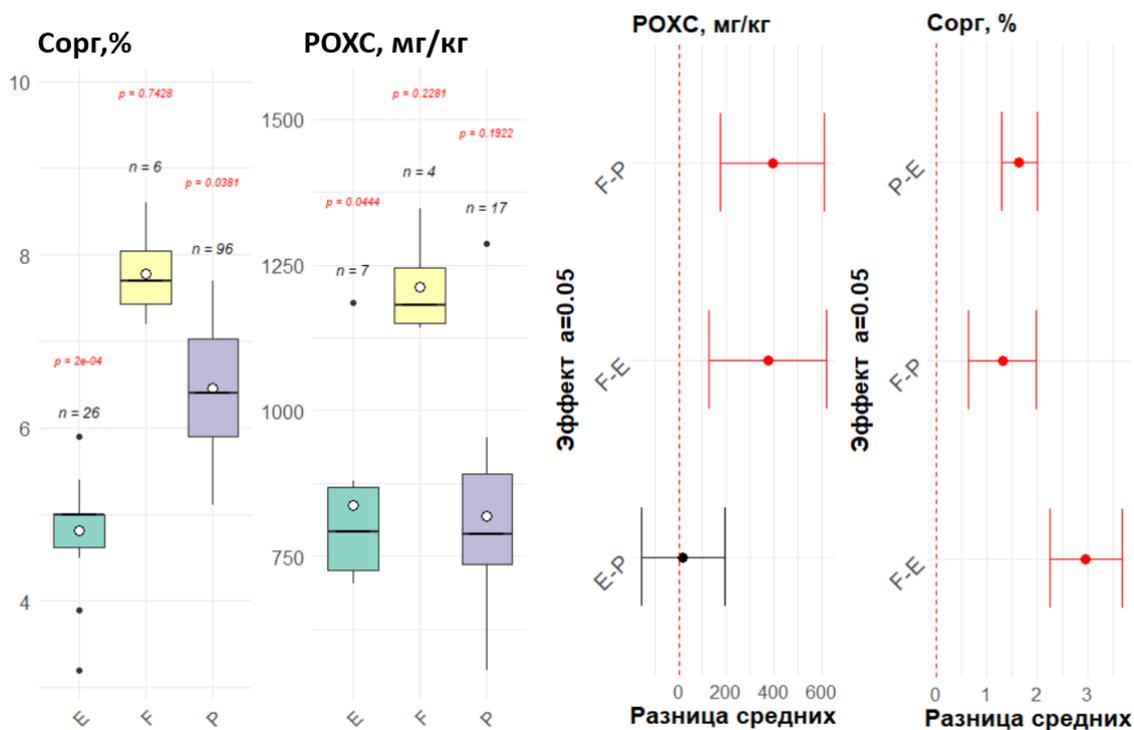


Рис. 38 Характеристика различий содержания $C_{орг}$ и РОХС

* Р – Плакорные, Е – Эрозионные, F – Фоновые референтные участки

Установлено, что при величине $\alpha = 0,05$ среднее содержание углерода РОХС мг/кг, отличается между группами F-P и F-E аналогично демонстрируя большую чувствительность РОХС к типу землепользования и меньшую к агроэкологическим факторам. При этом по величине содержания $C_{орг}$ данные свидетельствуют о наличии значимых различий средних между всеми подгруппам (P,E,F)

Денситометрические фракции

На рисунке 39 представлена вариация значений по качественному составу $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$ и $HF > 1.6 \text{ г/см}^3$ на исследуемых участках.

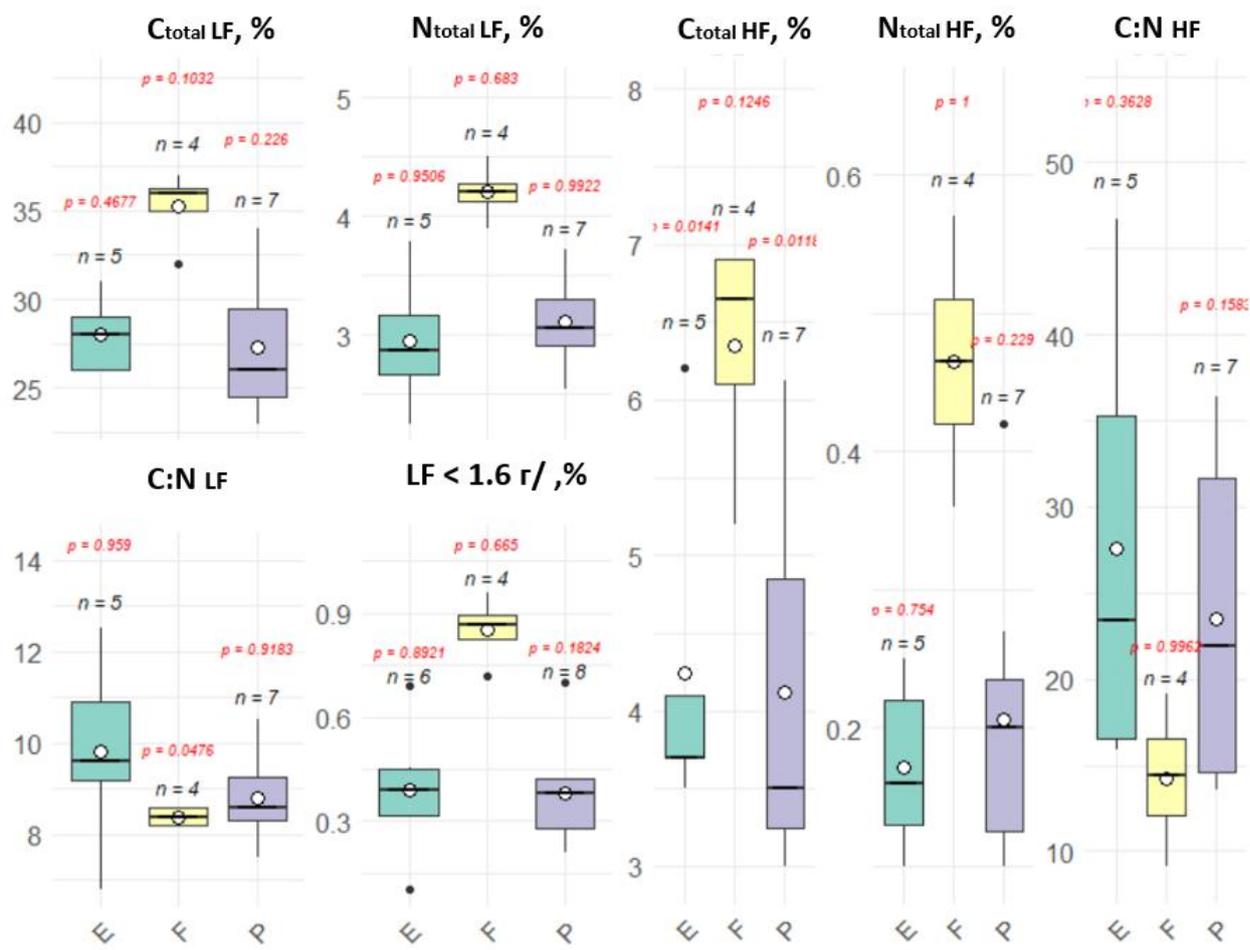


Рис. 39 Диаграммы размаха по характеристикам фракций

* P – Плакорные, E – эрозийные, F – Фоновые референтные участки

Для оценки типа распределения данных использовался критерий Шапиро-Уилка. С учетом распределения данных, максимальное содержание C_{LF} отмечалось в пробах фоновых участков (F), в среднем, 35,2%, для плакорной группы агроландшафтов содержание C_{LF} варьировало в пределах 23-34% при среднем значении 27,3% соответственно. На эрозийных участках величина C_{LF} была сопоставима с уровнем C_{LF} плакорной группы и соответствовала значению 28%. Содержание N_{LF} несколько отличалось по агроэкологическим группам, в частности максимальное накопление N_{LF} было характерно для чернозёмов типичных в условно референтных участках при содержании на уровне 4,2%. Минимальным содержанием отличались черноземы эрозийной группы, где величина N_{LF} в среднем соответствовала значению 2,94%. Отношение $C:N_{LF}$ по агроэкологическим группам отличалось незначительно. В частности, более близкие средние отношения плакорной группы агроландшафтов и фоновых

участков (P, F) при средних отношениях 9 и 8 были несколько ниже относительно эрозионной группы (E), где отношение $C:N_{LF}$ в среднем составило 10 при более широкой вариации. Общий выход фракции $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$ в % от массы почвы характеризовался более однородным распределением дисперсии между группами почв. Величина $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$ на фоновых участках (F), в среднем, соответствовала 0,85%, для участков плакорной группы (P) выход $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$ снижался в среднем до 0,38% для эрозионных (E), в среднем, до 0,37% при незначительной разнице относительно плакорных участков.

Установлено, что максимальное содержание C_{HF} отмечалось в пробах фоновых-референтных участков, при среднем значении C_{HF} соответствующем уровню 6,35% и вариации в пределах 5,2-6,9%. Содержание N_{HF} для плакорной группы агроландшафтов в свою очередь было сопоставимо со средним содержанием N_{HF} эрозионной группы. На фоновых участках отмечалось большее накопление азота во фракции $HF > 1.6 \text{ г/см}^3$, среднее содержание которого в последней соответствовало величине 0,46% при диапазоне значений в пределах от 0,36% до 0,57%. Отношение $C:N_{HF}$ для фоновых почв в среднем соответствовало 14,2, при вариации значений в пределах 9,1-19,1. Для почв среднее соотношение $C:N_{HF}$ лежало в пределах 13,6-36,4 для плакорной группы и 12,0-46,7 для эрозионной группы. Важно отметить, что для данной выборки отношения $C:N_{HF}$, характеризующие потенциал минерализации для $HF > 1.6 \text{ г/см}^3$, лежат в более широких диапазонах значений относительно отношений $C:N_{LF}$. На примере данной выборки в почвах референтных участков (F) содержание C_{HF} было выше последнего относительно почв агроландшафтов. В необрабатываемых черноземах (F) отмечается максимальное содержание C_{HF} и повышенное содержание C_{LF} , из чего можно предположить, что в данных условиях почва, находясь в квазиравновесном состоянии, в полной степени насыщена углеродом минерал-ассоциативной фракции, за счет чего дискретное органическое вещество накапливается в большем объеме.

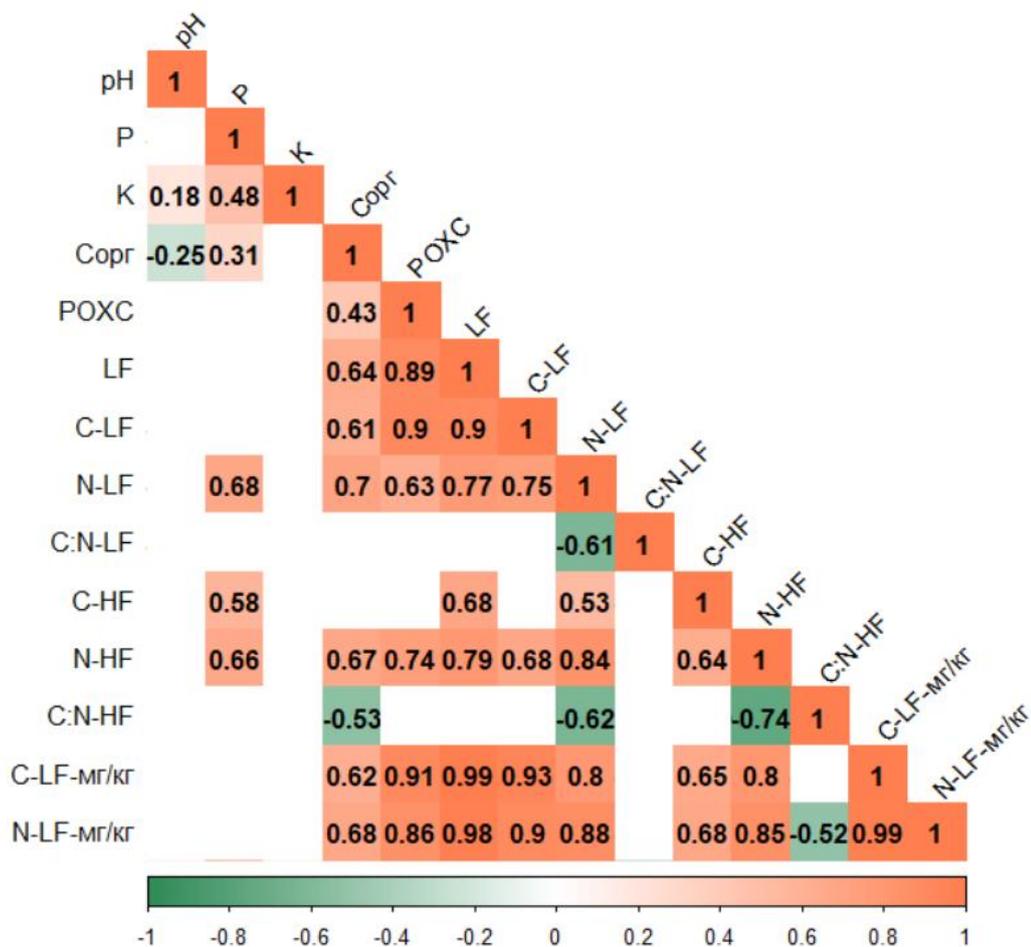


Рис.40 Матрица значимых линейных зависимостей

На рисунке 40 представлена корреляционная матрица (метод Пирсона), при этом отражены параметры R, достоверные для значений при уровне значимости $\alpha=0.05$. Показатели, характеризующие качество ПОВ, формируют кластер, где явно выражена автокорреляция. Отмечается достоверная линейная зависимость уменьшения содержания $C_{орг}$ при повышении уровня кислотности pH_{H_2O} . Данная закономерность хорошо описывается с особенностями природно-территориальных комплексов, где на участках пашни, приуроченных к склонам $2-3^\circ$, отмечаются выраженные эрозионные процессы, некоторое сокращение содержания $C_{орг}$ в среднем на 15-25%, и более высокая линия вскипания от 10% HCl , то есть более высокое залегание карбонатов, на фоне чего повышается величина pH в верхнем горизонте. Содержание $C_{орг}$ в одномерной линейной модели показывает зависимости с уровнем обеспеченности почв $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$ и содержанием $POXC$ при величинах R-Пирсона равных 0,64 и 0,43

соответственно. Содержание углерода фракции POXC в большей степени чувствительно к содержанию LF<1.6 г/см³, а также связано с параметрами качества LF<1.6 г/см³, C_{LF} и N_{LF}. Соотношение C:N_{LF} не отличается наличием достоверных зависимостей в анализируемой структуре данных.

3.4. Особенности накопления почвенного органического вещества в зависимости от климатических и геоморфологических условий

Для учета перераспределения влаги в ландшафте была использована цифровая модель рельефа, полученная путем обработки и фильтрации данных SRTM на территории исследуемых участков. С помощью алгоритма Random Forest были получены коэффициенты регрессии k_1 и k_2 по каждому участку для переменных: абсолютные отметки высот, крутизна склона для корректировки количества осадков (мм) и суммарной солнечной радиации (net Radiation w/m²) (TerraClimat; Ryu, 2018) и их перераспределения по элементам рельефа. Модель Random Forest была обучена на выборке из 1500 случайных наблюдений, по каждому из исследуемых участков при этом была произведена предварительная генерализация данных SRTM и TerraClimat (Ryu, 2018), для их приведения к единому масштабу. Далее коэффициенты при условии их значимости p-value <0.01 были использованы для перераспределения влаги с учетом крутизны и высотных отметок.

TerraClimate — глобальный климатический набор данных, предоставляющий в том числе осадки (мм) и уровень поступления солнечной радиации (Вт/м²), с пространственным разрешением ~ 4 км (1/24 градуса). (Abatzoglou et al., 2018). Основан на слиянии климатических моделей и наземных наблюдений. TerraClimate частично учитывает рельеф, модель построена на базе данных наземных метеостанций. Коррекция по рельефу для данных TerraClimate есть, но это не детальный орографический пересчёт, а в большей степени региональная коррекция, зависящая от плотности станций и модели WorldClim. Коррекция по уклону, экспозиции, потокам — не включена.

С этой позиции было принято решение о корректировке значений осадков с учетом высотным отметок и крутизны.

В рамках исследования была реализована автоматизированная процедура пространственного анализа с использованием платформы Google Earth Engine (GEE), направленная на моделирование пространственного распределения годового количества атмосферных осадков и поступления солнечной радиации по данным набора TerraClimate. В качестве предикторов были использованы высотные отметки, крутизна склона. Исходные растровые слои были приведены к единому пространственному разрешению 500 м посредством функции `reproject()`.

Для построения регрессионной модели случайного леса (Random Forest) была сформирована выборка из 10 000 случайных точек, равномерно распределённых по маске интереса на сопряженных участках в радиусе 100 км. Значения предикторов в каждой точке извлекались методом `.sampleRegions()`, после чего данные были случайным образом разделены на обучающую (80%) и тестовую (20%) выборки. На основе обучающей выборки была обучена модель случайного леса с регрессионным выходом 200 деревьев. Точность модели оценивалась на тестовой выборке по метрикам MAE (средняя абсолютная ошибка), RMSE (среднеквадратичная ошибка) и R^2 (коэффициент детерминации), рассчитанным на основе разности предсказанных и наблюдаемых значений осадков.

Дополнительно была проведена множественная линейная регрессия с включением свободного члена и двух независимых переменных: высоты (м), уклона (°). Вычисленные коэффициенты регрессии интерпретировались как относительный вклад каждого из предикторов в формирование распределения осадков.

Регрессионные коэффициенты, отражающие вклад высоты и уклона в формирование пространственной вариабельности осадков, обозначались как k_B ; k_K

$$P_{\text{кор}} = P_{\text{модель}} + (k_B * \text{Высота}) + (k_K * \text{Крутизна}) \quad (5)$$

где $P_{кор}$ — скорректированное значение осадков и ФАР,

$P_{модель}$ — свободный член

Высота — абсолютная высота точки, м - k_B ; - Коэффициент на высоту

Крутизна — значение крутизны склона, ° - k_k — Коэффициент на крутизну

Подобный подход позволяет повысить детализацию распределения осадков и уровня поступления ФАР за счёт применения региональных регрессионных зависимостей к ЦМР с более высокой пространственной разрешающей способностью. Применение коэффициентов, полученных из модели, построенной на данных с разрешением 500 м, к слоям с более высокой детализацией, допустимо при условии согласования единиц измерения параметров: абсолютные высоты выражаются в метрах, а значения уклона — в градусах, соответствующих значениям, получаемым через функцию `ee.Terrain.slope()` в GEE.

Для уточнения пространственного распределения осадков и уровня поступления ФАР с учётом мелкомасштабных орографических факторов была реализована процедура орографической корректировки, основанная на коэффициентах, полученных в результате множественной линейной регрессии, выполненной в среде Google Earth Engine. В качестве предикторов выступали абсолютная высота местности и крутизна склона, а целевой переменной годовая сумма осадков (по данным TerraClimate, и Ryu, 2018) агрегированным за 2010–2023 гг.).

Таблица 2. Поправочные коэффициенты на норму осадков и обеспеченность ФАР полученным в результате моделирования д

| Провинция | Кв-осадки | Кк-осадки | Кв-ФАР | Кк-ФАР |
|--------------------------------------|-----------|-----------|--------|--------|
| Предкавказская | 0,31 | -15,2 | 0,068 | -59 |
| Среднерусская лесостепная | 0,12 | 1,93 | -0,42 | 105 |
| Среднерусская широколиственно-лесная | 0,27 | -1,86 | 0,24 | -18 |

*Кв – коэффициент на высоту, Кк – коэффициент на крутизну склона

В регионах с более сглаженным рельефом (Калужская и Воронежская область) роль других факторов возрастает, что снижает универсальность

орографической коррекции. При этом за счет низкой дисперсии данных по высотам и крутизне в условиях спокойного рельефа орографическая корректировка фактически совпадает с модельными данными и смещения в большую/меньшую сторону относительно модельных значений – незначительны.

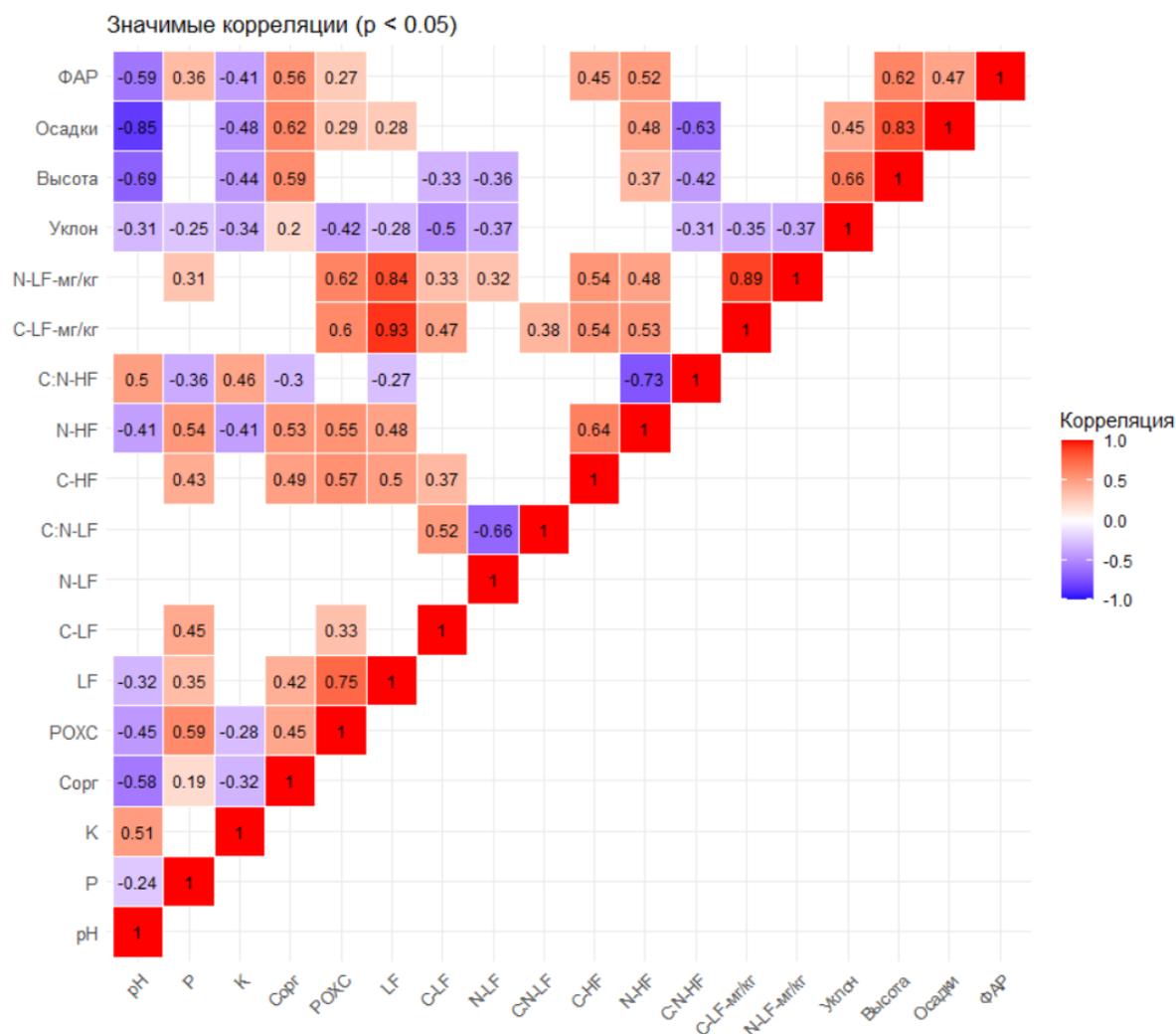


Рис. 41 Матрица линейных зависимостей для почв Предкавказской провинции

На рисунке 41 представлена матрица значимых парных зависимостей при $p < 0,05$ между климатическими и почвенными характеристиками. Уровень рН демонстрирует сильную отрицательную взаимосвязь с количеством осадков ($R = -0,85$), высотой местности ($R = -0,59$) и уровнем ФАР ($R = -0,59$), что в целом, в совокупности определяет глубину залегания карбонатов, и как следствие уровень рН почв. Вместе с тем ФАР положительно связан с рядом почвенных

свойств, таких как содержание $C_{\text{орг}}$ при $R = 0,56$, а также с содержанием углерода и азота во фракции $HF > 1,6 \text{ г/см}^3$ при $R = 0,45$ и $0,52$ соответственно. Параметры рельефа оказывают значительное влияние на большинство показателей качества ПОВ. Так, высота и уклон отрицательно связаны с содержанием углерода и азота, особенно в тяжёлых (HF) и лёгких (LF) фракциях, что, вероятно, отражает снижение продуктивности и накопления органического вещества на более эродированных участках. Уклон особенно сильно связан с выходом фракции $LF < 1,6 \text{ г/см}^3$ ($R = -0,50$), что может указывать на ее сокращение при усилении интенсивности стока и водной эрозии.

3.5 Трансформация химических свойств почв в агроландшафтах

Для оценки трансформации химических свойств почв в агроландшафтах при смене режима землепользования был использован подход, предложенный в работе (Кузуаков, 2020), где содержание органического вещества в почве рассматривается как один из показателей деградиационного изменения. Размах данных по каждому из параметров был нормализован и приведен к диапазону значений 0-1. Нормирование осуществлялось в соответствии с формулой:

$$x' = (x - x_{\min}) / (x_f - x_{\min}) \quad (6)$$

x - исходное значение признака;

x_{\min} - минимальное значение признака в выборке;

x_f – среднее значение признака по выборке в необрабатываемом участке;

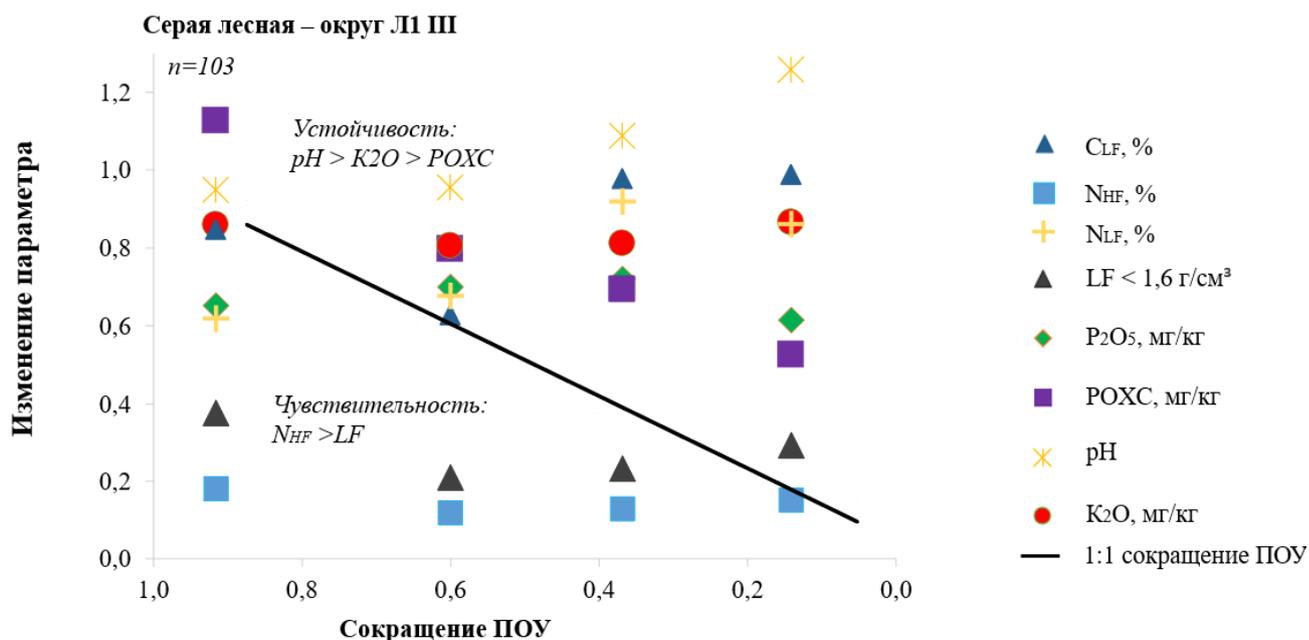


Рис. 42 Экспериментальная оценка степени сопряженности химических свойств почв в агроландшафте относительно снижения содержания $C_{орг}$

На рисунке 42 представлена визуализация изменчивости свойств почв относительно тренда линейного снижения содержания $C_{орг}$. Наиболее устойчивые параметры относительно снижения $C_{орг}$ характеризовались трендами, лежащими выше линии 1:1. Скорости изменения pH, подвижных форм P_2O_5 и K_2O , а также содержания углерода фракции POXC, были существенно ниже относительно скорости уменьшения содержания $C_{орг}$, на что также указывает локализация квартилей распределения этих параметров относительно тренда 1:1. При этом наиболее высокая степень сопряженности изменения разных показателей почвы по отношению к направлению изменения содержания $C_{орг}$ в слое 0-25 см была характерна для фракции $LF < 1,6$ г/см³ и показателю N_{HF} . Относительно фоновых референтных участков эти свойства в агроландшафтах подвержены наиболее выраженной трансформации. Для параметров C_{LF} и N_{LF} характерно некоторое смещение и перегиб линейного тренда при уменьшении содержания $C_{орг}$ более чем на 75% от значений характерных фоновых-референтных участкам. По мере снижения содержания углерода $C_{орг}$ отмечается некоторое повышение содержания C_{LF} . Несмотря на тот факт, что в ряду повышения степени смытости на эродированных участках при уменьшении как выхода денситометрической

фракции $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$ в целом, так и общего уменьшения содержания $C_{\text{орг}}$, фракция $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$ накапливает большее количество углерода и азота. В работе (Cotrufo, 2019) авторы отмечают, что органическое вещество лесных экосистем характеризуется более широким отношением C:N и устойчивостью фракции $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$. При смене растительной формации на агроландшафт с преобладанием корневого опада и частично надземной массы злаковых и бобовых культур (с учетом преобладания в севооборотах яровой пшеницы, ячменя и гороха) в $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$ отношение C:N становится более узким, что повышает качество данной фракции и потенциал ее минерализации. Тем не менее, запас углерода и азота, несмотря на большее их содержание в $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$ на участках агроландшафтах, существенно ниже.

Данные по анализируемым параметрам для участка на территории Воронежской области представлены на рисунке 43.

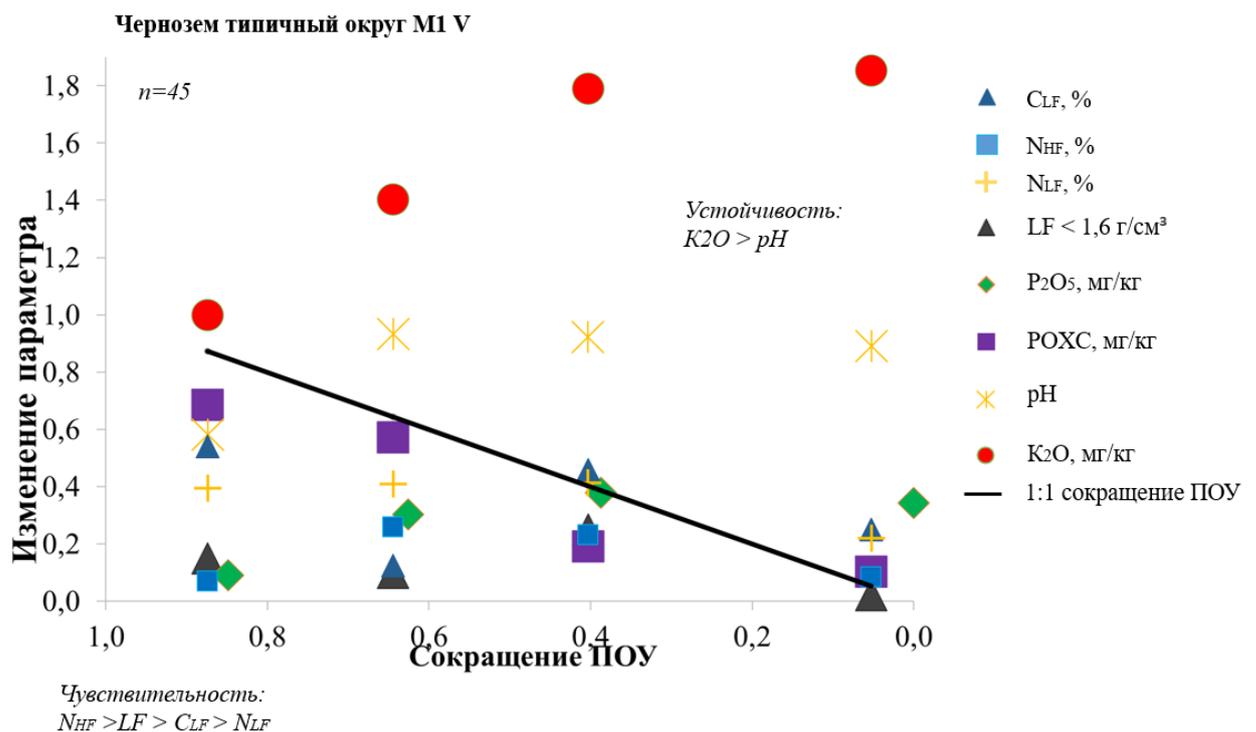


Рис.43 Экспериментальная оценка степени сопряженности химических свойств почв в агроландшафте относительно снижения содержания $C_{\text{орг}}$

Стоит отметить, что аналогично серым лесным почвам Калужской области выхода фракции $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$ и содержание $N_{\text{НФ}}$ обладают более высокой степенью

сопряженности относительно снижения содержания $C_{орг}$. При этом, на данном участке в большей степени сопряженность выражена для N_{LF} и уровня обеспеченности подвижным P_2O_5 . Тренд снижения РОХС практически эквивалентен линейному тренду 1:1 снижения содержания $C_{орг}$. Уровень рН и содержание подвижных форм K_2O выступают как более устойчивые параметры, в особенности выделяется низкая степень сопряженности K_2O , содержание которого при уменьшении уровня обеспеченности $C_{орг}$ только возрастало.

Для участков, локализованных в Предкавказской провинции классификация параметров по степени их сопряженности относительно снижения $C_{орг}$ несколько отличалась.

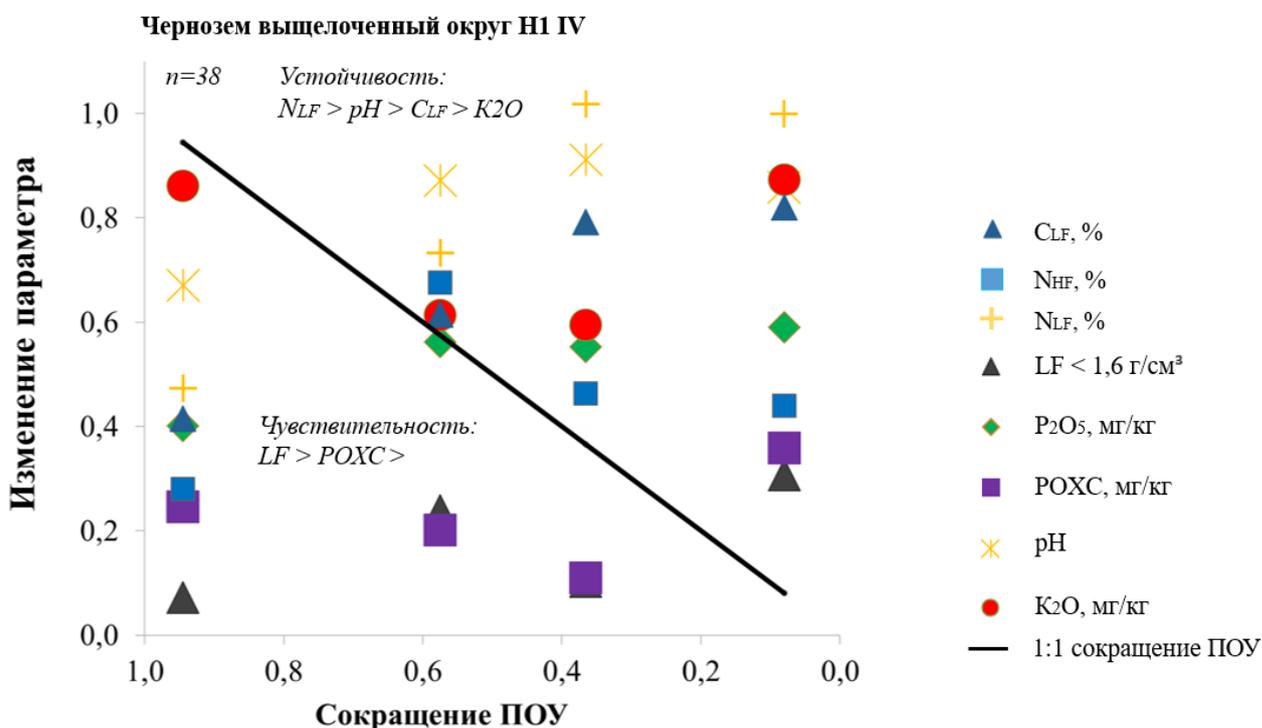


Рис.44 Экспериментальная оценка степени сопряженности химических свойств почв в агроландшафте относительно снижения содержания $C_{орг}$

Для содержания фракции $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$ выражена сильная степень взаимосвязи и при формировании агроландшафтов отчетливо прослеживается тренд резкого снижения выхода данной фракции. Фракция РОХС в условиях Краснодарского края обладает похожей мерой сопряженности к снижению $C_{орг}$ аналогично с выходом $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$. Для содержания C_{LF} характерно более

существенное уменьшение при незначительном уменьшении $C_{орг}$, при этом, дальнейшее уменьшение содержания $C_{орг}$ приводит к существенному увеличению доли углерода во фракции $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$, приближаясь к уровню фоновых необрабатываемых почв. Содержание N_{LF} характеризуется аналогичной тенденцией к некоторому снижению содержания при первичном сокращении $C_{орг}$, но на участках с минимальным уровнем содержания бихромат-окисляемого углерода доля N_{LF} возрастает. Содержание N_{HF} характеризуется несколько иной динамикой. При первичном снижении содержания $C_{орг}$ в агроландшафтах отмечается некоторое снижение содержания N_{HF} , однако последующее сокращение приводит к повышению его содержания и дальнейшее уменьшение выходит на тренд 1:1 по уменьшению содержания $C_{орг}$, что в целом может объясняться различными скоростями процессов минерализации при разных уровнях обеспеченности $C_{орг}$, и в целом показывает, что динамика азота на данном участке сильно зависит от содержания $C_{орг}$.

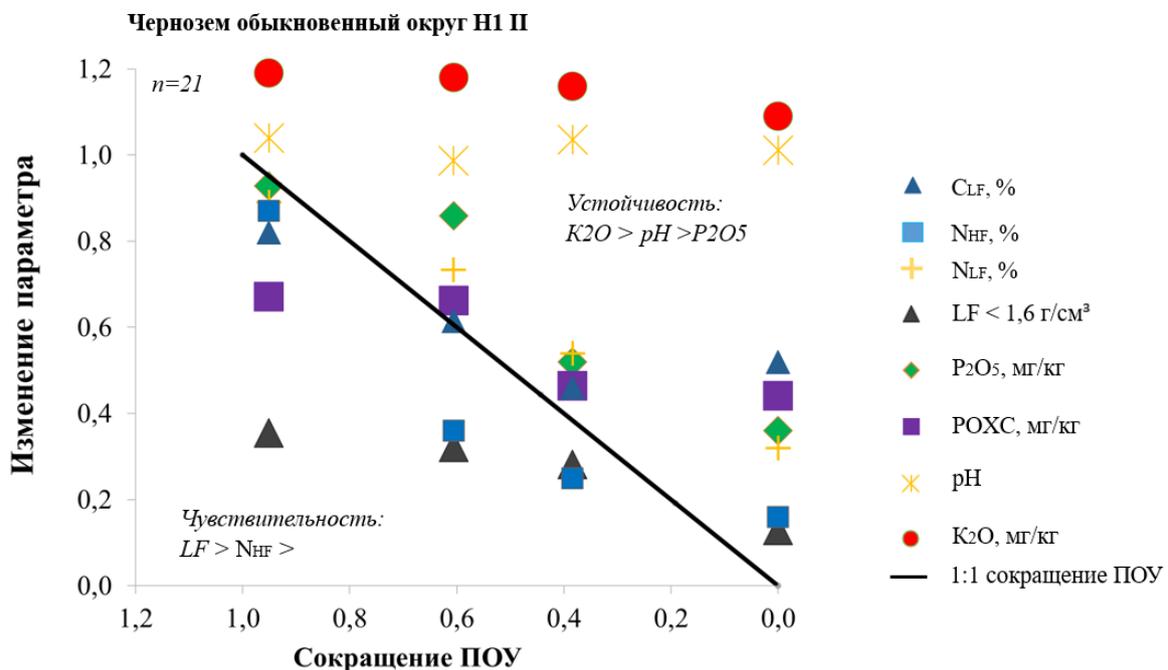


Рис.45 Экспериментальная оценка степени сопряженности химических свойств почв в агроландшафте относительно снижения содержания $C_{орг}$

Для участка, локализованного в Ростовской области содержание фракции $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$ обладает высокой степенью сопряженности относительно тренда

снижения $C_{\text{орг}}$. Содержание N_{HF} выражено снижается в агроландшафтах относительно референтных участков, при этом доля углерода в $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$ при максимальном снижении $C_{\text{орг}}$ аналогично Краснодарским черноземам повышалась. Содержание C_{LF} и содержание РОХС были эквивалентны.

Содержание $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$ в % от массы почвы обладает наиболее сильной степенью сопряженности при условии, что снижение содержания $C_{\text{орг}}$ выступает в роли одного из маркеров деградационных изменений почв. Данная тенденция выражена на всех исследуемых участках. Если предположить, что в референтных-фоновых участках с естественной растительностью почва находится в квазиравновесном состоянии и процессы минерализации ПОВ и накопления контролируются в большей степени биотическим фактором, то структурные пулы углерода насыщены максимально возможно. Из этого следует, что на участках пашни, где экзогенный и техногенный потенциал трансформации процессных и структурных пулов ПОВ существенно меняют соотношение между аккумуляцией/потерями, насыщение углеродом становится ниже, при этом, повышенное содержание C_{LF} , % и N_{LF} , % и более узкое соотношение C:N в LF могут обуславливать механизм стабилизирующий и насыщающий стабильный пул ПОВ. То есть фоновое содержание фракции $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$ в агроландшафтах существенно ниже не только за счет более интенсивной его трансформации и минерализации, а, в том числе, за счет того, что фракция $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$ может выступать как драйвер для насыщения углеродом фракции $HF > 1.6 \text{ г/см}^3$. Как было показано выше в главе 3 соотношение C: N_{HF} , как правило, существенно уже последнего C: N_{LF} . То есть, с точки зрения возможности минерализации ПОВ фракции $HF > 1.6 \text{ г/см}^3$ более склонно к минерализации, и скорость данного процесса должна быть выше, т.к. субстрат с таким диапазоном C:N потенциально более доступен для разложения (Cotrufo 2019). В естественных экосистемах минерализация контролируется, по большей части, за счет органоминеральных взаимодействий. При смене режима землепользования и формировании агроландшафтов за счет физического воздействия на сложение почвы, разрушения структуры за счет интенсификации почвообработок, а также перемешивания

верхнего слоя за счет механической обработки происходит повышение доступности данного субстрата для его минерализации, содержание углерода в $\text{HF} > 1.6 \text{ г/см}^3$ снижается и запускаются механизмы ее насыщения посредством углерода C_{LF} .

3.6 Группировка и диагностический потенциал показателей органического вещества в почвах разных провинций

Использование единой структуры данных позволило сопоставить степень сопряженности показателей к генетическим и агроэкологическим факторам, а также оценить их диагностическую значимость. Фракция перманганат-окисляемого углерода более чувствительна к типу землепользования. Для исследуемых участков на почвах черноземного типа содержание РОХС в фоновых условно-референтных почвах соответствует 900-1300 мг/кг, для плакорной группы черноземов агроландшафтов снижается в среднем до 360-950 мг/кг, эрозионной группы 420-749 мг/кг, для луговато-чернозёмных почв агроландшафтов соответствует 402–859 мг/кг. Разница между референтными необрабатываемыми черноземами и черноземами агроландшафтов достигает 400 мг/кг, что подтверждает информативность РОХС к изменениям в интенсивности разложения и поступления органического вещества. В почвенно-экологических условиях при формировании высокоуглеродных почв черноземного типа фракция РОХС демонстрирует разграничение почв по типу землепользования, но слабее реагирует на различия между плакорными, эрозионными и полугидроморфными участками. В условиях распространения серых лесных почв на территории Среднерусской широколиственно-лесной провинции (Калужская область) показатель РОХС характеризуется слабой информативностью за счет высокой пространственной неоднородности. Между фоновыми условно-референтными участками и пашней по количественной величине РОХС не отмечается достоверных различий. В таблице –3 представлена усреднённая характеристика фракций $\text{LF} < 1.6 \text{ г/см}^3$ и $\text{HF} > 1.6 \text{ г/см}^3$.

Таблица 3. Характеристика фракций ПОВ

| Краснодарский край | | | | | | | | |
|-------------------------------|-----------|-----------------|-----------------|-------------------|--------------------|------------------|-------------|---------------------|
| Агроэкологическая группа | LF,% | C _{LF} | N _{LF} | C:N _{LF} | C:N _{ННФ} | N _{ННФ} | РОХС, мг/кг | C _{орг} ,% |
| Эрозионные | 0,22±0,08 | 25,4±7,2 | 2,2±0,7 | 11,9±1,8 | 12,0±2,8 | 0,22±0,04 | 613±171 | 3,90±0,91 |
| Фоновые-референтные | 0,60±0,2 | 35,2±8,5 | 2,8±0,9 | 13,3±4,2 | 11,8±1,7 | 0,3±0,1 | 1193±183 | 4,49±0,40 |
| Плакорные | 0,25±0,06 | 35±2,6 | 3,0±0,4 | 11,8±2,3 | 10,4±1,8 | 0,3±0,1 | 795±176 | 4,05±0,69 |
| Ростовская область | | | | | | | | |
| Эрозионные | 0,14±0,05 | 24,5±2,1 | 2,72±0,73 | 9,6±2,5 | 17,0±2,9 | 0,122±0,02 | 581±165 | 2,43±0,34 |
| Фоновые-референтные | 0,77±0,2 | 32,7±4,0 | 1,9±0,44 | 17,3±1,8 | 12,1±0,6 | 0,247±0,05 | 925±82 | 3,17±0,59 |
| Слабополугидроморфные | 0,3±0,05 | 27,6±4,5 | 2,9±0,9 | 10,6±4,8 | 17,3±2,0 | 0,141±0,02 | 724±176 | 2,60±0,34 |
| Плакорные | 0,27±0,04 | 34,3±5,7 | 2,24±0,34 | 15,5±2,9 | 16,3±2,9 | 0,147±0,03 | 476±146 | 2,66±0,37 |
| Калужская область | | | | | | | | |
| Слабозерозивные | 0,21±0,14 | 31,2±4,9 | 1,94±0,2 | 16,1±1,4 | 9,32±1,4 | 0,14±0,01 | 379±135 | 1,74±0,43 |
| Средне- и Сильноэрозионные | 0,27±0,08 | 37,3±4,0 | 2,42±0,2 | 15,4±1,2 | 8,70±0,8 | 0,13±0,01 | 371±87 | 1,55±0,44 |
| Фоновые-референтные | 0,44±0,08 | 34,2±3,3 | 2,16±0,3 | 16,5±3,5 | 8,24±2,5 | 0,23±0,07 | 427±182 | 2,81±0,78 |
| Слабополугидроморфные | 0,24±0,03 | 26,8±7,9 | 1,56±0,4 | 17,3±3,5 | 8,24±1,4 | 0,14±0,02 | 374±121 | 1,89±0,47 |
| Среднеполугидроморфные | 0,28±0,02 | 29,0±2,7 | 1,24±0,4 | 24,5±5,8 | 12,5±1,0 | 0,13±0,01 | 463±101 | 2,08±0,50 |
| Плакорные | 0,20±0,04 | 33,4±1,8 | 2,18±0,3 | 15,6±2,2 | 8,12±1,6 | 0,13±0,01 | 394±127 | 1,87±0,45 |
| Республика Кабардино-Балкария | | | | | | | | |
| Эрозионные | 0,10±0,03 | 30,2±4,8 | 1,92±0,16 | 15,8±1,8 | 18,1±1,7 | 0,12±0,02 | 370±118 | 2,87±0,47 |
| Фоновые-референтные | 0,42±0,05 | 27,3±3,3 | 2,61±0,28 | 9,9±1,4 | 22,1±3,2 | 0,13±0,03 | 758±41 | 3,47±0,25 |
| Слабополугидроморфные | 0,13±0,05 | 28,3±4,5 | 2,63±0,67 | 11,1±1,9 | 22,0±3,4 | 0,14±0,01 | 411±35 | 3,45±0,35 |
| Плакорные | 0,12±0,03 | 26,8±5,8 | 3,33±0,85 | 7,6±0,8 | 20,5±5,6 | 0,14±0,06 | 374±77 | 3,40±0,51 |
| Воронежская область | | | | | | | | |
| Эрозионные | 0,39±0,19 | 28,0±2,1 | 2,94±0,58 | 9,8±2,1 | 27,6±13,2 | 0,17±0,06 | 838±167 | 4,61±0,62 |
| Фоновые-референтные | 0,85±0,10 | 35,3±2,2 | 4,20±0,24 | 8,4±0,2 | 14,3±4,2 | 0,46±0,09 | 1213±94 | 7,78±0,62 |
| Плакорные | 0,38±0,15 | 27,3±4,2 | 3,10±0,39 | 8,8±1,0 | 23,5±9,7 | 0,21±0,11 | 819±163 | 6,46±0,69 |

* ± 1 среднеквадратическое отклонение

Для фракции LF<1.6 г/см³ отмечается устойчивая тенденция – переход от фонового условно-референтного состояния к агроландшафтам приводит к снижению содержания, что не зависит от условий увлажнения и делает данный показатель одним из наиболее надёжных индикаторов трансформации процессного пула органического вещества. В условиях Краснодарского края, где

для типичных и выщелоченных черноземов содержание $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$ в условно референтном-состоянии в среднем достигает 0,60% при C_{LF} в среднем 35,2% и N_{LF} 2,8%, в черноземах плакорной агроэкологической группы агроландшафтов выход $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$ снижается до 0,12–0,15%, содержание C_{LF} остаётся на уровне 35%, а содержание N_{LF} снижается в среднем до 2,2%.

В обыкновенных чернозёмах Ростовской области общая тенденция сохраняется, выход $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$ в необрабатываемых почвах в среднем составляет 0,77%, в агроландшафтах 0,26%. Аналогичная закономерность фиксируется для почв Республики Кабардино-Балкария, где фоновые черноземы характеризуются выходом $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$ в среднем на уровне 0,42%. Несмотря на различия почвенно-климатических условий $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$ демонстрирует высокую чувствительность к типу землепользования, выступая индикатором трансформации процессного пула и повышения интенсивности процессов минерализации за счет механического воздействия посредством проведения почвообработки.

Для исследуемого участка в условиях Среднерусской широколиственно-лесной провинции фракция $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$ проявляет иную динамику, решающим становится качественный состав, измеряемый через $C:N_{LF}$. Уникально широкие значения $C:N_{LF}$, достигающие 30 в полугидроморфных участках Калужской области, свидетельствуют о снижении скорости минерализации органического вещества. В условиях других почвенных провинций подобные значения не встречаются. Фракция $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$ демонстрирует универсальную количественную чувствительность к типу землепользования, а её качественные характеристики $C:N_{LF}$ могут выступать высокоинформативными генетическими маркерами в почвах с повышенным увлажнением.

Особого внимания заслуживают отношения $C:N_{HF}$, представляющие собой маркеры качества структурного органического вещества. Наиболее узкие соотношения $C:N_{HF}$ наблюдаются в обыкновенных чернозёмах на участках в Ростовской области (в среднем 12,1–14,2), что отражает высокую степень гумусированности и устойчивость структурного пула. В агроландшафтах эти значения становятся уже, в частности в эрозийных группах, что указывает на

относительный дефицит азота во фракции $\text{HF} > 1.6 \text{ г/см}^3$. В условиях Республики Кабардино-Балкария на исследуемых участках C:N_{HF} демонстрирует широкие значения в фоновых почвах (до 22,1). В условиях Калужской области значения C:N_{HF} умеренно стабильны и не превышают 15, что отражает более равномерный ход процессов стабилизации и минерализации. Сопоставление результатов между провинциями позволяет выявить фундаментальные различия в функционировании органического вещества в зависимости от провинциально обусловленных факторов и степени антропогенной трансформации почв. Несмотря на то, что анализ проводился по унифицированному набору показателей, реакция каждого из них на агроэкологические условия существенно варьировала в зависимости от принадлежности к провинции, что позволяет не только оценить их диагностическую ценность, но и предложить функциональную группировку, отражающую различную природу сигналов, зафиксированных в структуре органического вещества.

Перманганат-окисляемый углерод выступает в качестве индикатора процессного органического вещества, и его межпровинциальная сопоставимость существенно выше, чем у $\text{C}_{\text{орг}}$. Несмотря на различие в абсолютных значениях РОХС между чернозёмами Краснодарского края и чернозёмами Ростовской области, характер снижения РОХС при переходе от фоновых-референтных участков к агроландшафтам остаётся стабильным. На исследуемых участках в Воронежской области фракция РОХС чувствительна к эрозии. В условиях Калужской области на исследуемых участках напротив, фракция РОХС не характеризуется наличием диагностической функции в почвах. Фракция РОХС проявляет свою максимальную эффективность как индикатор нарушения структуры органического вещества в условиях автоморфного режима, а его чувствительность резко усиливается в чернозёмах.

Систематизация выявленных закономерностей показывает, что каждый из анализируемых показателей обладает собственной степенью сопряженности относительно агроэкологических факторов. Фракция РОХС и параметр C_{LF} преимущественно отражают динамику процессного пула, соотношения C:N в

соответствующих фракциях интегрируют процессы путём отражения относительного насыщения углеродом и азотом. Показатели C_{LF} количественно реагируют на смену режима землепользования, но в условиях повышенного увлажнения качественные параметры становятся высокоинформативными генетическими признаками. Взаимодействуя между собой, эти показатели формируют целостную систему диагностики, позволяющую не только дифференцировать свойства ПОВ в условно-референтном состоянии и при функционировании в условиях агроландшафтов, но и выявлять внутренние механизмы деградации или стабилизации органического вещества.

Системное сопоставление показателей органического вещества в разрезе трех провинций показывает, что структура и изменчивость ПОВ обусловлены не столько абсолютным содержанием, сколько сочетанием трёх факторов: провинциального режима увлажнения, дифференциацией рельефа (в том числе через интенсивность проявления эрозионных процессов) и особенностями увлажнения. Использование денситометрических и химически окисляемых фракций $POXC$ и $C_{орг}$, отношений $C:N_{LF}$, $C:N_{HF}$ может позволить реконструировать целостную модель функционирования органического вещества, учитывающую как современное состояние и тренды изменчивости при интенсификации процессов дегумусирования.

Системное сопоставление полной структуры анализируемых данных показывает, что каждый показатель характеризуется разными пределами информативности. Для чернозёмов Краснодарского края и Воронежской области наиболее чувствительными индикаторами оказываются $POXC$ и $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$. В степных чернозёмах более аридных участков на территории Ростовской области и Республики Кабардино-Балкария диагностический приоритет смещается в сторону C_{HF} и $C:N_{HF}$ как индикаторов стабилизации ПОВ, нарушаемой главным образом под воздействием эрозии. В серых лесных почвах на исследуемых участках в Калужской области роль первичных индикаторов приобретает $C_{орг}$ и $C:N_{LF}$, фиксирующие качественные изменения в состоянии ПОВ при проявлении эрозионных процессов и гидроморфизма.

Таблица 4. Изменения в состоянии ПОВ при проявлении эрозионных процессов и гидроморфизма

| Показатель | Экологическая чувствительность | Региональные особенности проявления | Диагностическая роль |
|----------------------------------|--|---|--|
| РОХС, мг/кг | Чувствителен к изменениям землепользования и проявлению эрозионных процессов, отражает вариации доли легкоокисляемого углерода | Наиболее выраженные различия выявлены в почвах чернозёмного типа | Оперативный маркер вариации процессного (лабильного) пула органического вещества в условиях автоморфных почв |
| $C_{орг}$, % | Интегрально отражает суммарные изменения органического вещества, менее чувствителен к краткосрочным трансформациям | Проявляет диагностическую значимость во всех провинциях | Базовый количественный показатель обеспеченности почв органическим веществом |
| $LF < 1.6$ г/см ³ , % | Чувствителен к смене режима землепользования и проявлению эрозии | Устойчиво реагирует во всех провинциях, наибольшая контрастность отмечена в почвах Предкавказья | Количественный маркер изменения процессного пула и интенсивности поступления растительных остатков |
| $C:N_{LF}$ | Отражает относительное соотношение углерода и азота в лёгкой фракции, ассоциирован с вариацией условий минерализации | Наиболее информативен в почвах с повышенным увлажнением | Показатель качественного состояния лёгкой фракции; чувствителен к гидроморфным условиям |
| $C:N_{HF}$ | Характеризует относительное соотношение С и N в структурном пуле органического вещества | Более вариабелен в почвах чернозёмного типа | Показатель качественных характеристик структурного пула органического вещества |

Проведённый анализ характеристик ПОВ в условиях трех почвенных провинций выявил, что пространственная структура ПОВ представляет собой результат взаимодействия провинциально-обусловленных процессов стабилизации и минерализации и специфики водного режима. При этом каждый показатель качества органического вещества фиксирует определенную сторону этого взаимодействия и обладает ограниченным диапазоном применимости

Сопоставление всех провинций показывает, что универсальность отдельных показателей ограничена: РОХС является индикатором только в почвах черноземного типа; $LF < 1.6$ г/см³ — сильный маркер чувствительный к типу землепользования, но не агроэкологическим факторам; $C:N_{LF}$ реагирует на гидроморфизм.

3.7 Провинциальные особенности насыщения почв углеродом

В основе оценки насыщения органического вещества фракции $\text{HF} > 1.6 \text{ г/см}^3$ лежали концептуальные положения, характеризующие почву как гетерогенную систему, накапливающую твердофазные продукты функционирования (ТПФ). (Таргульян, 2008; Шеин 2018; Cotrufo, 2022) В рамках исследования проверяемая гипотеза формулировалась следующим образом: соотношение углерода в лёгкой ($\text{LF} < 1.6 \text{ г/см}^3$) и тяжёлой ($\text{HF} > 1.6 \text{ г/см}^3$) фракциях описывается нелинейной насыщающейся функцией, параметры которой зависят от комплекса внешних факторов (физико-химические свойства почвы, показатели состояния органического вещества).

Исходно проверялось положение о том, что зависимость C_{HF} от LF не является линейной пропорцией между пулами, а характеризуется убывающей предельной отдачей, совместимой с концепцией ограниченной ёмкости минерально-ассоциированного органического вещества. Анализ носит статический характер и основан на поперечных данных. Исследование не направлено на оценку кинетики перехода $C_{\text{LF}} \rightarrow C_{\text{HF}}$ во времени. Следовательно, полученные результаты интерпретируются как описание статистической формы распределения состояний системы, совместимой с гипотезой насыщаемости, но не как прямое доказательство скорости или механизма трансформации углерода между фракциями.

В анализе состояние лёгкой фракции, связанное с содержанием C_{LF} , аппроксимировалось массовым выходом LF (% от массы почвы), который рассматривается как индикатор объёма слабосвязанного с минеральной частью почвы органического вещества, однако не является прямым эквивалентом концентрации углерода в LF . В связи с этим интерпретация зависимости $\text{LF} \rightarrow C_{\text{HF}}$ относится к условной модели накопления лёгкой фракции, а не к прямой количественной оценке перехода углерода $C_{\text{LF}} \rightarrow C_{\text{HF}}$ в строгом стехиометрическом смысле.

Для оценки уровня насыщения C_{HF} выполнена аппроксимация экспериментальных данных с использованием нелинейных моделей. В качестве

альтернатив рассматривались: стандартная логистическая функция, функция Гомпертца, гиперболический тангенс и арктангенс-сигмоида. Выбор оптимальной модели осуществлялся на основе сопоставления R^2 , RMSE, информационного критерия AIC, а также анализа структуры остатков. Сравнение моделей по AIC проводилось при единообразном предположении о распределении ошибок. Дополнительно проводился визуальный анализ распределения остатков, оценка признаков гетероскедастичности и анализ влияния отдельных наблюдений (включая проверку влияющих точек).

По совокупности критериев наилучшее соответствие данным продемонстрировала стандартная логистическая функция, которая была использована в дальнейшем анализе. Преимуществом логистической формы являлась более устойчивая идентификация асимптотического параметра при включении нескольких предикторов.

Общая форма модели задавалась выражением:

$$C_{HF} = \frac{K_i}{1 + \exp(-a * (\sum b_i * x_i - x_0))} \quad (7)$$

Где:

K_i – асимптотический параметр логистической модели, характеризующий верхний уровень функции в пределах наблюдаемого диапазона условий

a – параметр крутизны логистической кривой,

b_i – Коэффициенты регрессии при предикторах x_i

x_i - Значение независимой переменной

x_0 - параметр сдвига по аргументу функции

После подбора модели проводилась калибровка параметров. Границы параметров задавались априорно в пределах наблюдаемого диапазона данных исключительно с целью стабилизации численной оптимизации и предотвращения неидентифицируемых решений. Ограничения не использовались для искусственной фиксации значения асимптоты. Изменение метрик качества после введения ограничений не превышало 2–4%. При этом

оценка параметра Ki рассматривается как модельно-зависимая и потенциально чувствительная к структуре выборки и диапазону предикторов.

Устойчивость оценки асимптоты Ki и производных пороговых значений проверялась методом повторной выборки с возвращением (bootstrap, $B=1000$) и анализом чувствительности с исключением по одному наблюдению (leave-one-out). Доверительные интервалы для Ki рассчитывались по перцентильному методу (2,5-й и 97,5-й перцентили распределения бутстреп-оценок).

В результате были построены региональные модели накопления C_{HF} . Согласно современной концепции углеродного насыщения почв, минерально-ассоциированное органическое вещество обладает ограниченной ёмкостью накопления, определяемой свойствами минеральной матрицы (Angst et al., 2023). При приближении к этому пределу наблюдается снижение предельного прироста C_{HF} , тогда как избыток органического вещества может накапливаться преимущественно во фракции LF или в менее стабильных формах. Фракция LF, в отличие от HF, в ряде случаев демонстрирует близкий к линейному характеру увеличения при росте поступления органического вещества (Stewart et al., 2008). Таким образом, логистическая форма зависимости C_{HF} от LF и сопутствующих факторов интерпретируется как статистически согласующаяся с механизмом ограниченной ёмкости минерально-связанного пула, однако не рассматривается как прямое доказательство причинной трансформации углерода между фракциями.

Для серых лесных почв Калужской области оптимальная модель включала РОХС, выход LF и содержание N_{HF} . Оценка 80% насыщения $C_{HF}^{80\%}$ ($0,8 \cdot Ki$) составила 1,37%, при модельной асимптоте $Ki=1,68\%$ (95% ДИ: 1,44–1,82%). Коэффициент детерминации составил $R^2=0,55$ (RMSE=0,16%), что отражает умеренную объяснённую дисперсию. Полученная зависимость демонстрирует тенденцию к убывающей отдаче при значениях LF порядка 0,15–0,25%, после чего наблюдается замедление прироста C_{HF} и приближение к плато. Переменная РОХС вошла в модель с положительным коэффициентом, что указывает на статистическую ассоциацию между уровнем

легкоокисляемого углерода и содержанием C_{HF} . Данный результат согласуется с представлением о роли активного пула органического вещества, однако не интерпретируется как доказательство причинного эффекта. Модель продемонстрировала умеренную устойчивость оценки Ki при объёме выборки $n=21$. Диапазон вариации Ki при бутстреп-оценке и анализе исключения отдельных наблюдений не продемонстрировал выраженной чувствительности асимптоты к исключению отдельных наблюдений. Тем не менее, учитывая ограниченный объём выборки, численные значения порогов и асимптот трактуются как модельные оценки.

Чернозёмы Воронежской области характеризуются наибольшими наблюдаемыми значениями C_{HF} в пределах анализируемой совокупности данных. Максимальные значения C_{HF} превышают 7,0% при выходе $LF < 1,6$ г/см³ в диапазоне 0,2–0,4%. Для описания вариации C_{HF} оптимальная многомерная модель включала РОХС, $LF < 1,6$ г/см³ и плотность почвы (ρ , г/см³) ($R^2 = 0,68$; $n = 20$). Логистическая аппроксимация дала оценку насыщения 80% от асимптоты C_{HF}^{80} на уровне 6,78%, при оценке $Ki = 7,8\%$ (95% ДИ: 6,92–8,40%). Оценка Ki интерпретируется как параметр выбранной функциональной формы и не рассматривается как прямое измерение предельной ёмкости системы. Включённые в модель переменные продемонстрировали статистическую значимость: РОХС — положительную ассоциацию с вариацией C_{HF} фракция $LF < 1,6$ г/см³ — ключевой предиктор, определяющий форму насыщающейся зависимости, плотность (ρ) — отрицательную ассоциацию, соответствующую знаку коэффициента в модели. Интерпретация этих связей ограничивается рамками статистической зависимости, причинные механизмы в рамках данного анализа не тестировались. Различие между наблюдаемыми значениями C_{HF} (5–7%) и модельной асимптотой Ki 7,8% (95% ДИ: 6,92–8,40%) отражает расхождение между текущим положением точек в пространстве предикторов и оценкой верхнего предела логистической функции, определённой в рамках выбранной модели. Следует учитывать, что оценка Ki чувствительна к диапазону LF и распределению наблюдений в верхней части кривой. При $n=20$

асимптотический параметр определяется ограниченным числом точек, расположенных в зоне предполагаемого плато, что обуславливает модельную неопределённость, отражённую в доверительном интервале. Высокие абсолютные значения $LF < 1,6 \text{ г/см}^3$ и C_{HF} свидетельствуют о значительном уровне содержания органического вещества в исследованных образцах, однако данные показатели интерпретируются исключительно в контексте сравнения внутри данной выборки. Полученные результаты указывают на статистически значимые ассоциации между $LF < 1,6 \text{ г/см}^3$, РОХС, плотностью и содержанием C_{HF} при этом большая часть наблюдений располагается ниже уровня C_{HF}^{80} , что свидетельствует о том, что выборка включает состояния, удалённые от верхнего участка логистической кривой в пределах рассматриваемой выборки.

Для почв, локализованных на исследуемых участках в Краснодарском крае, модель продемонстрировала высокую степень приближения наблюдаемых значений C_{HF} к оценочной асимптоте Ki в пределах данной выборки. Модель включала: РОХС, $LF < 1,6 \text{ г/см}^3$, N_{HF} , N_{LF} и плотность почвы (ρ) ($R^2 = 0,75$; $n = 24$). С учётом числа предикторов интерпретация коэффициентов проводится с осторожностью, принимая во внимание корреляцию между объясняющими переменными. Между $LF < 1,6 \text{ г/см}^3$ и РОХС наблюдалась линейная корреляция ($r = 0,75$). Включение обеих переменных улучшало качество модели, при этом коэффициенты сохраняли знак и величину, что свидетельствует об отсутствии мультиколлинеарности, качество модели снижалось при исключении переменных. Структура модели показывает, что вариация C_{HF} характеризуется наибольшими по модулю коэффициентами при $LF < 1,6 \text{ г/см}^3$ и плотности почвы. Наблюдается группа точек с относительно высоким содержанием C_{HF} (4,0–4,2%), значения которых сопоставимы с оценкой Ki , уже при $LF < 1,6 \text{ г/см}^3$ 0,05–0,10, что указывает на неоднородность распределения данных в верхней части логистической кривой и потенциальную чувствительность оценки асимптоты к отдельным наблюдениям. Логистическая аппроксимация дала оценку уровня 80% от асимптоты C_{HF}^{80} на уровне 3,21% при модельной асимптоте Ki 4,0% (95% ДИ: 3,3–4,6%). Параметр крутизны логистической функции (a) определяет

форму кривой, обеспечивая достижение уровня C_{HF}^{80} при относительно низких значениях LF, после чего прирост C_{HF} замедляется. Оценка Ki определяется ограниченным числом наблюдений в верхней части кривой и должна рассматриваться как параметр выбранной функциональной формы. В среднем наблюдаемые значения C_{HF} расположены вблизи уровня C_{HF}^{80} , при этом значительная часть наблюдений соответствует высоким относительным значениям C_{HF} / Ki , что может интерпретироваться как высокая степень реализации модельной ёмкости пула в пределах рассматриваемой выборки. Указанная характеристика относится исключительно к положению наблюдений относительно параметров модели и не эквивалентна достижению физического предела системы, но показывает более высокую степень насыщенности пула C_{HF} относительно всех исследуемых участков. Фракция РОХС продемонстрировала положительную ассоциацию с вариацией C_{HF} . В рамках модели увеличение РОХС на 100 мг/кг соответствует росту C_{HF} на 0,07% при фиксированных значениях остальных переменных ($p < 0,001$). Сопоставление наблюдаемых значений C_{HF} с модельной асимптотой показывает, что дальнейшее увеличение C_{HF} в пределах наблюдаемого диапазона LF и других предикторов ограничено расположением точек вблизи асимптоты логистической функции, определённой в рамках выбранной модели.

Для участков, расположенных на территории Ростовской области, оценка параметра Ki характеризуется промежуточным значением в пределах полученных модельных оценок по регионам. Оптимальная модель с точки зрения объяснённой дисперсии ($R^2 = 0,60$; $RMSE = 0,17\%$; $n = 16$) включала три переменные: N_{HF} , $LF < 1,6$ г/см³ и pH_{H_2O} . Логистическая зависимость C_{HF} от LF демонстрирует достижение асимптотического уровня Ki на уровне 3,0% (95% ДИ: 2,5–3,1%). При значениях LF ниже 0,1% наблюдается относительно более крутой участок кривой, после чего прирост C_{HF} замедляется. При объёме выборки $n = 16$ оценка асимптоты определяется ограниченным числом наблюдений в верхней части диапазона и характеризуется повышенной неопределённостью. Фактический диапазон LF достигает 0,34%, однако при

высоких значениях LF прирост C_{HF} минимален, что отражается в сигмоидальной форме зависимости, выявленной моделью. Данная особенность интерпретируется как поведение в рамках выбранной функциональной формы. В сравнении с серыми лесными почвами Калужской области оценка Ki для Ростовской области выше, однако ниже, относительно чернозёмов Воронежской области и Краснодарского края. Таким образом, положение региона в градиенте оценочных значений Ki можно охарактеризовать как промежуточное. Наблюдаемые значения C_{HF} преимущественно располагаются в диапазоне 2,0–2,5%, что соответствует 70–85% от оценочной асимптоты. Расположение части наблюдений в верхнем сегменте логистической кривой не позволяет интерпретировать выявленную зависимость как доказательство дальнейшего прироста или его отсутствия.

В целом, сопоставление региональных моделей показывает, что зависимость C_{HF} от LF и сопутствующих факторов статистически лучше описывается логистической функцией по сравнению с линейной. Это согласуется с гипотезой о наличии убывающей предельной отдачи в диапазонах наблюдаемых данных. Уровень рН, плотность, содержание азота и показатели качества органического вещества включались в модели различных регионов и демонстрировали статистические ассоциации с вариацией C_{HF} . В таблице 5 представлены коэффициенты регрессии для переменных, включенных в модели.

Таблица 5. Коэффициенты логистических моделей насыщения C_{HF} по регионам

| Переменная - x_n | Красн. край | Калужская о. | Ростовская о. | Воронежская о. |
|-----------------------------|-------------|--------------|---------------|----------------|
| РОХС, мг/кг | 0,0007 | 0,0008 | * | 0,0012 |
| N_{HF} , % | 1,39 | 2,154 | 2,11 | * |
| Плотность г/см ³ | -1,58 | * | * | -1,84 |
| LF, % | 1,1714 | 1,1273 | 0,985 | 0,9091 |
| рН, ед.рН | * | * | -0,52 | * |
| N_{LF} , мг/мг | 0,54 | * | * | * |
| $C_{HF}^{80\%}$ | 3,21 | 1,37 | 2,48 | 6,78 |

* Не включен в итоговую модель

На рисунке – 46 представлена визуализация ключевого порога насыщения C_{HF}^{80} от измеренной емкости при фиксированных условиях многомерной модели предикторов на медиальном уровне (за исключением $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$). Такой подход корректен для иллюстрации формы зависимости, однако полученная кривая не соответствует конкретному реальному профилю, а отражает условный средний режим факторов.

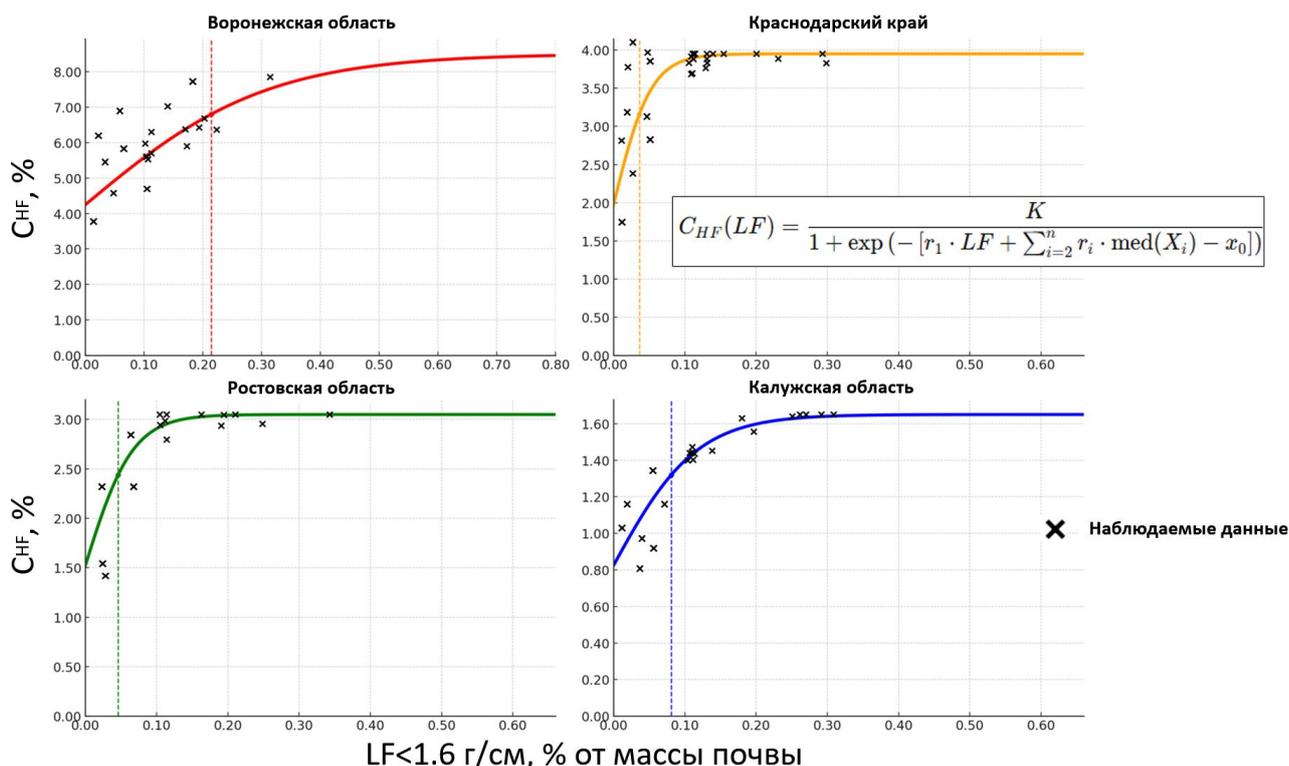


Рис. 46 Визуализация порога насыщения 80% C_{HF} от доли LF при фиксации многомерной регрессии с учетом медиан значимых переменных x_i

Фиксация остальных переменных не изменяет сигмоидальный характер зависимости, однако приводит к горизонтальному смещению кривой за счёт изменения значения линейного предиктора внутри экспоненты, что эквивалентно сдвигу по оси LF при фиксированных параметрах модели. При сравнении регионов важно учитывать, что медианный режим предикторов различается между регионами; следовательно, различия одномерных кривых отражают как параметры модели, так и различие типичных условий (медианных значений) объясняющих переменных.

При переходе от многомерной логистической модели к её одномерной визуализации по переменной LF остальные предикторы фиксируются на уровне медианных значений. В этом случае линейный предиктор принимает вид:

$$C_{HF} = \frac{Ki}{1 + \exp[-a(\beta_{LF} * LF + \sum_{j \neq LF} \beta_j * X_j - x_0)]} \quad (8)$$

Где:

K_i – асимптотический параметр логистической модели, характеризующий верхний уровень функции в пределах наблюдаемого диапазона условий

a – Параметр наклона логистической кривой

β_{LF} – Коэффициент регрессии при переменной LF

β_j – Коэффициенты регрессии при остальных предикторах модели

X_j – Независимые переменные, кроме LF (ПОХС, N_{HF} , pH и др.)

x_0 – Сдвиг кривой по оси X; значение $a x_0$ – при котором $C_{HF} = z_i * K_i$

Такое преобразование сохраняет функциональную форму логистической зависимости, и кривизна определяется параметром a при заданном масштабе K_i . Следовательно, различия одномерных кривых обусловлены как параметрами модели (K_i , a , β_{LF}), так и региональными различиями медианных значений предикторов. Величина K_i задаёт верхнюю асимптоту функции, определяя модельный уровень плато. Фиксация остальных переменных на медианах не изменяет сигмоидальный характер зависимости, но влияет на положение точек насыщения.

Анализ диапазонов LF, соответствующих 70–80% от K_i , показывает, что для исследуемых участков значения LF, при которых наблюдается снижение предельного прироста C_{HF} , составляют порядка 0,1–0,2% для почв с $K_i < 4,0\%$ и 0,2–0,4% при $K_i > 4,0\%$. Следует подчеркнуть, что данные значения интерпретируются как характеристики логистической функции, а не как физические пороги. Полученные модели демонстрируют, что первая производная логистической функции $C_{HF}(LF)$ монотонно уменьшается при увеличении LF, что статистически согласуется с гипотезой убывающей предельной отдачи в пределах наблюдаемого диапазона переменных. При этом

различия между регионами отражаются в величине K_i и положении кривой. Факторы рН, плотность, содержание азота и показатели качества органического вещества демонстрируют статистические ассоциации с параметрами логистической функции. Их вклад выражается в изменении положения (через линейный предиктор) и крутизны (через параметр a) кривой в рамках модели, однако такие зависимости не интерпретируются как прямые доказательства механизма трансформации углерода между фракциями.

Таким образом, полученные результаты описывают распределение состояний системы в поперечном (кросс-секционном) разрезе и статистически согласуются с гипотезой ограниченной ёмкости минерально-ассоциированного пула углерода. Выявленные различия между регионами отражают вариации модельных параметров и типичных условий среды, а не непосредственно измеренную динамику перехода $C_{LF} \rightarrow C_{HF}$. В общем плане концептуально данную схему можно представить в следующем виде:

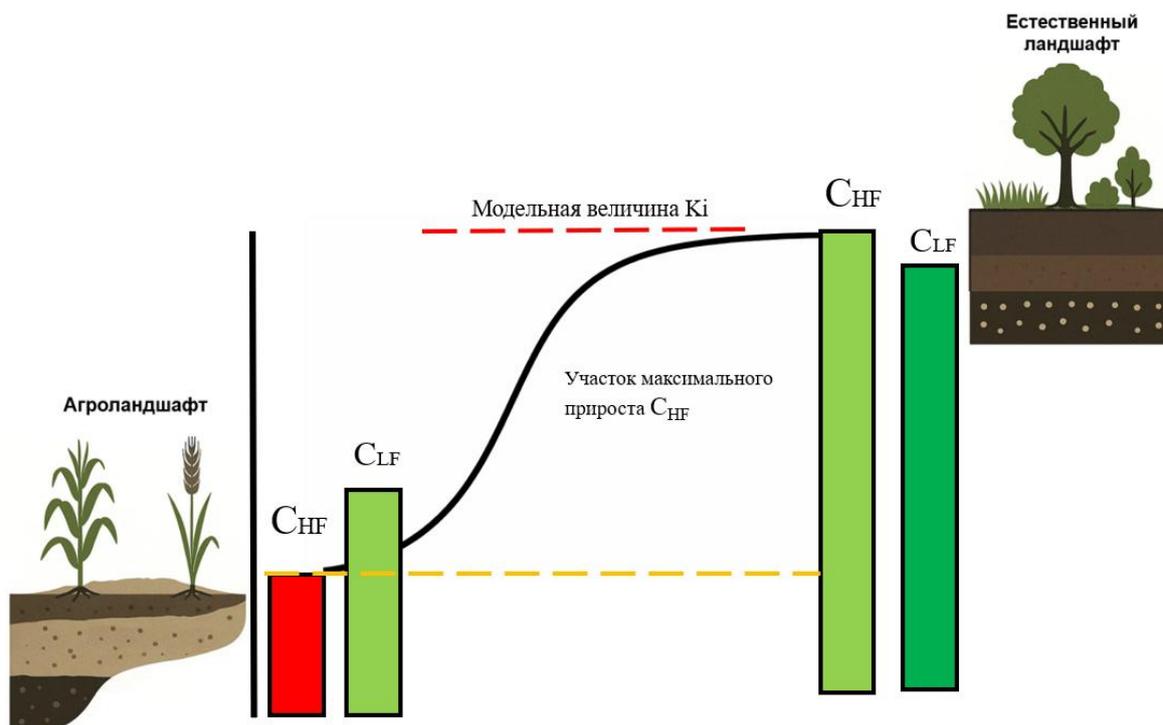


Рис. 47 Схематическая иллюстрация положения наблюдаемых значений C_{HF} в агроландшафтах и естественных ландшафтах относительно модельной асимптоты K_i логистической зависимости C_{HF} от $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$

Концептуальная модель, представленная на рисунке – 47 отражает полученные эмпирические данные по исследуемым участкам. Пунктирной линией показана оценка параметра K_i — асимптотического значения функции, интерпретируемого как модельная характеристика потенциального уровня C_{HF} при заданных фоновых условиях. Различие между агроландшафтом и естественным ландшафтом отражает различие положения наблюдений на одной и той же логистической кривой при сопоставимых параметрах модели. Выделенный участок кривой соответствует диапазону наибольшего прироста C_{HF} в пределах выбранной функциональной формы. Схема носит концептуальный характер и не отражает динамику во времени.

Поступление растительных остатков с более узким соотношением C:N статистически ассоциируется с более высокими значениями C_{HF} в пределах наблюдаемого диапазона данных, что может отражать условия, благоприятные для трансформации органического вещества лёгкой фракции и формирования минерально-ассоциированного пула углерода. При этом в рамках настоящего анализа такие связи интерпретируются как корреляционные и не рассматриваются как прямое доказательство механизма перехода.

Фракция POXC, несмотря на её высокую чувствительность к изменениям состояния почвы, отмеченную в ряде исследований (Fine, 2018; Culman, 2021; Прохоров, 2024), не во всех случаях может служить однозначным индикатором биологического качества органического вещества, поскольку отражает преимущественно легкоокисляемую часть углерода. Согласно полученным данным, для гидроморфных почв характерен более широкий диапазон соотношения C:N как в естественных экосистемах, так и на пашне. В рамках логистических моделей это сопровождается более высокими оценками параметра K_i , что может указывать на потенциально более высокий уровень модельной асимптоты C_{HF} при сопоставимых условиях. Следует подчеркнуть, что речь идёт о параметрах статистической модели, а не о прямом измерении физической ёмкости пула.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенных научных исследований была проведена оценка провинциальных особенностей состояния почвенного органического вещества в агроландшафтах европейской части России. Получены следующие **выводы**:

1. Установлено, что пространственная вариация количественных и качественных показателей ПОВ в агроландшафтах обусловлена неоднородностью агроэкологических факторов. Отмечается существенное перераспределение свойств в почвах, подверженных эрозионным процессам и испытывающих повышенное увлажнение. При этом для разных почвенных провинций перераспределение показателей неоднородно. В пахотных горизонтах эродированных черноземов и серых лесных почв содержание $C_{\text{орг}}$ уменьшается на 15–30%, на полугидроморфных участках отмечаются как более широкие диапазоны отношений C:N во фракциях $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$ и $HF > 1.6 \text{ г/см}^3$, так и более высокие уровни содержания $C_{\text{орг}}$ на 10–20%, относительно автоморфных почв.

2. На примере черноземов и серых лесных почв показано, что при условии высокого содержания $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$ в фоновых условно-референтных участках отмечается тенденция к большему снижению данного показателя при переходе к квазиравновесному состоянию на пашне. В необрабатываемых автоморфных почвах исследуемых участков – величина $LF < 1.6 \text{ г/см}^3(\%)$ в среднем соответствовала: 0,44% → 0,77% → 0,59% → 0,41%, (серая лесная → чернозем типичный и выщелоченный → чернозем типичный (фациальный подтип очень теплые кратковременно промерзающие) → чернозем обыкновенный (фациальный подтип очень теплые кратковременно промерзающие) тогда как для зональных почв (плакорной агроэкологической группы) агроландшафтов доля $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$ по тем же участкам снижалась в среднем до: 0,22% → 0,14% → 0,22% → 0,10%, для серых лесных на 50% от фоновых значений для черноземов Среднерусской лесостепной провинции на 81,8%, черноземов Предкавказской провинции 62,7% для типичных и выщелоченных и 75,6% для обыкновенных, в соответствии с чем, для

высокоуглеродных почв доля сокращения $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$ при формировании агроландшафтов существенно выше.

3. Для всех исследуемых участков установлено, что доля фракции $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$ в % от массы почвы характеризуется высокой степенью сопряженности к типу землепользования. При рассмотрении линейного тренда уменьшения содержания $C_{\text{орг}}$ в агроландшафтах содержание $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$ для серых лесных почв Среднерусской широколиственно-лесной провинции снижается на 51–77% от фоновых условно-референтных значений, для черноземов исследуемого участка, локализованного на территории Среднерусской лесостепной провинции на 19,2–88,1%, для типичных и выщелоченных черноземов Предкавказской провинции на 40,0–83,1%, для черноземов обыкновенных на 72,8–81,3%.

4. Установлено, что содержание углерода РОХС при оценке разницы средних с использованием критерия Тьюки показывает достоверные различия между фоновыми условно-референтными почвами и почвами агроландшафтов при $\alpha=0.05$ по всем участкам для почв черноземного типа. Для серых лесных почв в среднем содержание углерода фракции РОХС, как в референтных участках, так и участках пашни, на 40-80% ниже относительно черноземов, при этом не отмечается статистически достоверных различий содержания РОХС между серыми лесными почвами условно-референтных участков и серыми лесными почвами агроландшафтов. По всем участкам установлено, что фракция РОХС менее чувствительна к агроэкологическим факторам таким, как повышенное увлажнение и проявление процессов эрозии. При оценке разницы среднего содержания РОХС для группы почв, типизированных по данным факторам статистически достоверных различий средних при $\alpha=0.05$ не отмечалось. Фракция РОХС маркер чувствительный к типу землепользования на почвах черноземного типа, но нечувствительный к агроэкологическим условиям.

5. Для исследуемых почв с учётом провинциальных особенностей получены различающиеся модельные оценки асимптотического уровня C_{HF}

(параметр K_i) логистической зависимости от $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$. Значения K_i составили: для серых лесных почв Калужской области — 1,6–1,7%, для типичных и выщелоченных чернозёмов Воронежской области — 7,8–8,2%, для чернозёмов Краснодарского края — 4,0–4,1%, для обыкновенных чернозёмов Ростовской области — 3,0–3,1%. Указанные величины интерпретируются как параметры выбранной функциональной формы и отражают положение верхней асимптоты логистической модели в рамках наблюдаемого диапазона данных. Полученная зависимость аппроксимируется логистической функцией, что статистически согласуется с гипотезой насыщающегося характера в пределах анализируемого диапазона переменных, при котором предельный прирост C_{HF} уменьшается по мере увеличения содержания $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$. В рамках логистической модели значения $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$, соответствующие уровню 80% от K_i , составляют порядка 0,1–0,2% для почв с $K_i < 4,0\%$ и 0,2–0,4% для почв с $K_i > 4,0\%$. Указанные величины рассматриваются как функциональные ориентиры в контексте параметризованной логистической зависимости и отражают диапазон $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$, при котором предельный прирост C_{HF} по $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$ (при фиксированных значениях остальных предикторов модели) становится менее выраженным по сравнению с начальными участками зависимости.

6. В условиях Среднерусской широколиственно-лесной провинции для серых лесных грунтово-глеевых и поверхностно-глееватых почв отмечаются статистически достоверные различия относительно автоморфных аналогов в содержании $C_{орг}$ и отношению C:N в $HF > 1.6 \text{ г/см}^3$ с заданным $\alpha = 0.05$. Содержание $C_{орг}$ увеличивается на 10–20% относительно зональных серых лесных почв, отношение C:N в $HF > 1.6 \text{ г/см}^3$ становится шире и происходит сдвиг в среднем с 10–15 ед. до 25–30 ед. Оценивая полугидроморфные почвы других исследуемых участков статистически достоверных различий по содержанию $C_{орг}$ и отношению C:N во фракции $HF > 1.6 \text{ г/см}^3$ между луговато-черноземными почвами и зональными черноземами не отмечается. Повышенный гидроморфизм в условиях Калужской области в большей степени способствует консервации ПОВ.

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

В рамках действующего мониторинга земель сельскохозяйственного назначения, выполняемого ФГБУ «РосАгрохимслужба», рекомендуется дополнить стандартные показатели органического вещества индикаторами: долей LF < 1.6 г/см³, % как базовым маркером трансформации ПОВ при распашке и, для чернозёмов, фракцией РОХС как индикатора изменений лабильного углерода при сельскохозяйственном использовании. Для серых лесных почв Среднерусской широколиственно-лесной провинции приоритетен контроль C_{орг} и отношения C:N во фракции HF > 1.6 г/см³ как индикаторов провинциально-специфической консервации органического вещества при повышенном гидроморфизме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агроэкологическая оценка земель, проектирование адаптивно-ландшафтных систем земледелия: методическое руководство / под ред. В.И. Кирюшина, А.Л. Иванова. — М.: Росинформагротех, 2005. — 784 с. — EDN: PJRTTN.
2. Ананьева Н.Д., Сусьян Е.А., Гавриленко Е. Г. Особенности определения углерода микробной биомассы почвы методом субстрат-индуцированного дыхания // Почвоведение. — 2011. — № 11. — С. 1327–1333.
3. Артемьева З. С., Данченко Н. Н., Заговская Э. П., Колягин Ю. Г., Кириллова Н. П., Когут Б. М. Изотопный состав углерода и химическая структура органического вещества типичного чернозема в условиях контрастного землепользования // Почвоведение. — 2021. — № 6. — С. 686–700. — DOI: 10.31857/S0032180X21060034.
4. Артемьева З. С., Травникова Л. С. Изменение характеристик органического вещества и глинистых минералов серых почв в процессе агропедогенеза // Почвоведение. — 2006. — № 1. — С. 96–107.
5. Артемьева З.С. Некоторые особенности динамики качественного состава органического вещества дерново-подзолистых почв в период зарастания пашни лесом // Проблемы региональной экологии. 2017. № 2. С. 54-59.
6. Артемьева З.С. Органические и органо-глинистые комплексы агрогенно-деградированных почв. Автореф. дис. докт. биол. наук. М., 2008. 48 с.
7. Артемьева З.С. Органическое вещество и гранулометрическая система почвы. Москва: ГЕОС, 2010. 240 с.
8. Артемьева З.С., Рыжова И.М., Силева Т.М., Ерохова А.А. Стабилизация органического углерода в микроагрегатах дерново-подзолистых почв в зависимости от характера землепользования // Вестник Московского университета. Сер. 17, почвоведение. 2013. № 3. С. 19–26.
9. Артемьева З.С., Федотов Г.Н. Состав функциональных пулов легкоразлагаемого органического вещества автоморфных зонального ряда почв

центра Русской равнины // Вестник Московского университета. Сер. 17, почвоведение. 2013. № 4. С. 3–10.

10. Борисов Б. А., Ганжара Н. Ф. Географические закономерности распределения и обновления легкоразлагаемого органического вещества целинных и пахотных почв зонального ряда европейской части России // Почвоведение. – 2008. – № 9. – С. 1071–1078.

11. Борисов Б. А., Ганжара Н. Ф., Таразанова Т. В. Диагностика степени выпаханности почв различных зон по содержанию легкоразлагаемых органических веществ // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. – 2004. – № 1. – С. 16–23. – EDN: VYICJP.

12. Борисов Б.А., Ганжара Н.Ф. Географические закономерности распределения и обновления легкоразлагаемого органического вещества целинных и пахотных почв зонального ряда европейской части России // Почвоведение. 2008. № 9. С. 1071–1078.

13. Вадюнина А. Ф., Корчагина З. А. Методы исследования физических свойств почв. – М. : Высшая школа, 1986. – 400 с.

14. Ганжара Н. Ф., Байбеков Р. Ф., Борисов Б. А., Надежкин С. М. Оптимизация содержания лабильного органического вещества в почвах лесостепи Поволжья // Плодородие. – 2010. – № 5(56). – С. 15–17. – EDN: MXGUKN.

15. ГОСТ 26213—2021. Почвы. Методы определения органического вещества. — М.: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации (МГС), 2021. — 8 с.

16. Заварзина А. Г., Данченко Н. Н., Демин В. В., Артемьева З. С., Когут Б. М. Гуминовые вещества – гипотезы и реальность (обзор) // Почвоведение. – 2021. – № 12. – С. 1449–1480. – DOI: 10.31857/S0032180X21120169.

17. Золотарева Б. Н., Фоминых Л. А., Ширшова Л. Т., Холодов А. Л. Состав гумуса мерзлотных почв Большеземельской и Колымской тундр // Почвоведение. – 2009. – № 1. – С. 42–55. – EDN JVFWFR.

18. Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 223 с.

19. Когут Б. М. Оценка содержания гумуса в пахотных почвах России // Почвоведение. – 2012. – № 9. – С. 944–952.
20. Когут Б. М. Принципы и методы оценки содержания трансформируемого органического вещества в пахотных почвах // Почвоведение. – 2003. – № 3. – С. 308–316.
21. Когут Б. М., Милановский Е. Ю., Хаматнуров Ш. А. О методах определения содержания органического углерода в почвах (критический обзор) // Бюллетень Почвенного института имени В. В. Докучаева. – 2023. – Вып. 114. – С. 5–28. – DOI: 10.19047/0136-1694-2023-114-5-28.
22. Когут Б.М. Принципы и методы оценки содержания трансформируемого органического вещества в пахотных почвах // Почвоведение. 2003. № 3. С. 308–316.
23. Когут Б.М. Трансформация гумусового состояния черноземов при их сельскохозяйственном использовании // Почвоведение. 1998. № 7. С. 794–802.
24. Когут Б.М., Булкина Л.Ю. Сравнительная оценка воспроизводимости методов определения лабильных форм гумуса черноземов // Почвоведение. 1987. № 4. С. 143–145.
25. Когут Б.М., Семенов В.М., Артемьева З.С., Данченко Н.Н. Дегумусирование и почвенная секвестрация углерода // Агрохимия. 2021. № 5. С. 3–13. <https://doi.org/10.31857/S0002188121050070>
26. Кононова М.М. Органическое вещество почвы. М.: Наука, 1963. 190 с.
27. Ларионова А.А., Золотарева А.Н., Евдокимов И.В., Быховец С.С., Кузяков Я., Бюггер Ф. Идентификация лабильного и устойчивого пулов органического вещества в агросерой почве // Почвоведение. 2011. № 6. С. 685–698.
28. Лебедева Т. Н., Соколов Д. А., Семенов М. В., Зинякова Н. Б., Удальцов С. Н., Семенов В. М. Распределение органического углерода между структурными и процессными пулами в серой лесной почве разного землепользования // Бюллетень Почвенного института имени В. В. Докучаева. – 2024. – Вып. 118. – С. 79–127. – DOI: 10.19047/0136-1694-2024-118-79-127.

29. Мукина Л. Р., Шпедт А. А., Золотухин Г. Е. Гумусное состояние черноземов Красноярского края в условиях залежи // Материалы II Международной научно-практической конференции «Почва как связующее звено функционирования природных и антропогенно-преобразованных экосистем». – Иркутск, 2006. – С. 217–219.
30. Орлов Д.С. Гумусовые кислоты почв и общая теория гумификации. М.: Изд-во МГУ, 1990. 325 с.
31. Орлов Д.С., Бирюкова О.Н., Суханова Н.И. Органическое вещество почв Российской Федерации. М.: Наука, 1996. 256 с.
32. Орлов Д.С., Гришина Л.А. Практикум по химии гумуса. М.: Изд-во МГУ, 1981. 272 с.
33. Прохоров А. А. Характеристика методов выделения фракций почвенного органического вещества и их использование для оценки гумусового состояния почв // АгроЭкоИнфо. – 2022. – № 6(54). – DOI: 10.51419/202126604. – EDN VIEWBI.
34. Прохоров А. А., Агеев К. Д., Горячев К. С. Использование индексов вегетации в почвенно-ландшафтном картографировании и агроэкологической оценке // АгроЭкоИнфо. – 2024. – № 2(62). – DOI: 10.51419/202142228. – EDN EXXOQW.
35. Прохоров А. А., Борисов Б. А., Ефимов О. Е. и др. Использование Google Earth Engine для решения задач агроэкологической оценки земель на примере агроландшафтов Мостовского района Краснодарского края // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. – 2024. – № 6. – С. 12–21. – DOI: 10.26897/0021-342X-2024-6-12-21. – EDN MJEBTI.
36. Прохоров А. А., Борисов Б. А., Ефимов О. Е. и др. Оценка продуктивности плакорной агроэкологической группы земель на примере Краснодарского края // Агрехимический вестник. – 2024. – № 4. – С. 39–44. – DOI: 10.24412/1029-2551-2024-4-008. – EDN HWLYIM.

37. Прохоров А. А., Борисов Б. А., Ефимов О. Е. Индексная оценка степени выпаханности черноземов Предкавказской провинции // *Агрохимический вестник*. – 2023. – № 5. – С. 50–55. – DOI: 10.24412/1029-2551-2023-5-009. – EDN OXSZRW.

38. Прохоров А. А., Борисов Б. А., Ефимов О. Е. Перманганат-окисляемый углерод как маркер качества почв агроландшафтов // *Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева*. 2024. № 121. С. 47–69. DOI: 10.19047/0136-1694-2024-121-47-69. EDN: JLVJKR.

39. Прохоров А. А., Борисов Б. А., Ефимов О. Е., Минаев Н. В. Оценка чувствительности агрохимических по-казателей почв к снижению содержания почвенного органического углерода // *Агрохимический вестник*. 2024. № 6. С. 26–31. DOI: 10.24412/1029-2551-2024-6-005. EDN: HDQYZP.

40. Прохоров А. А., Ефимов О. Е., Борисов Б. А., Горячев П. С. Оценка гумусированности серых и светло-серых лесных почв разных агроэкологических групп в агроландшафтах Калужской области // *Плодородие*. – 2024. – № 6(141). – С. 9–13. – DOI: 10.25680/S19948603.2024.141.02. – EDN ANNTKG.

41. Самсонова В. П. Пространственная изменчивость почвенных свойств: на примере дерново-подзолистых почв. – М. : Изд-во ЛКИ, 2008. – 160 с.

42. Семенов В. М., Лебедева Т. Н., Соколов Д. А., Зинякова Н. Б., Лопес де Гереню В. О., Семенов М. В. Измерение почвенных пулов органического углерода, выделенных биофизико-химическими способами фракционирования // *Почвоведение*. – 2023. – № 9. – С. 1155–1172. – DOI: 10.31857/S0032180X23600427.

43. Семенов В.М., Журавлев Н.С., Тулина А.С. Минерализация органического вещества в серой лесной почве и типичном черноземе, обесструктуренных физическими воздействиями // *Почвоведение*. 2015. № 10. С. 1254–1266. <https://doi.org/10.7868/S0032180X1510010X>

44. Семенов В.М., Иванникова Л.А., Кузнецова Т.В. Структурно-функциональное состояние органического вещества почвы // Почвенные процессы и пространственно-временная организация почв. Москва: Наука, 2006. С. 230-247.
45. Семенов В.М., Иванникова Л.А., Кузнецова Т.В., Семенова Н.А. Роль растительной биомассы в формировании активного пула органического вещества почвы // Почвоведение. 2004. № 11. С. 1350–135
46. Семенов В.М., Когут Б.М. Почвенное органическое вещество. Москва: ГЕОС, 2015. 233 с.
47. Семенов В.М., Лебедева Т.Н., Лопес де Гереню В.О., 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. 6. № 1. e199. <https://doi.org/10.31251/pos.v6i1.199>
48. Семенов В.М., Тулина А.С., Семенова Н.А., Иванникова Л.А. Гумификационные и негумификационные пути стабилизации органического вещества в почве (обзор) // Почвоведение. 2013. № 4. С. 393–407. <https://doi.org/10.7868/S0032180X13040114>
49. Таргульян В. О., Бронникова М. А. Память почв: теоретические основы концепции, современное состояние и перспективы развития // Почвоведение. – 2019. – № 3. – С. 259–275. – DOI: 10.1134/S0032180X19030110.
50. Таргульян В.О., Горячкин С.В. Память почв: почва как память биосферно-геосферно-антропоенных взаимодействий. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 692 с.
51. Таргульян В.О., Соколова Т.А. Почва как биокосная природная система: “реактор”, “память” и регулятор биосферных взаимодействий // Почвоведение. 1996. № 1. С. 34–47.
52. Титова Н.А., Травникова Л.С., Шаймухаметов М.Ш. Развитие исследований по взаимодействию органических и минеральных компонентов почв // Почвоведение. 1995. № 5. С. 639-646.
53. Тулина А. С., Семенов В. М. Оценка чувствительности минерализуемого пула почвенного органического вещества к изменению

температуры и влажности // Почвоведение. – 2015. – № 8. – С. 952. – DOI: 10.7868/S0032180X15080109. – EDN: TZMCQP.

54. Тулина А. С., Семенов В. М., Розанова Л. Н. [и др.] Влияние влажности на стабильность органического вещества почв и растительных остатков // Почвоведение. – 2009. – № 11. – С. 1333–1340. – EDN: KYGCPR.

55. Тюрин И.В. Органическое вещество почвы и его роль в плодородии. М.: Наука, 1965. 320 с.

56. Урусевская, И. С. Карта почвенно-экологического районирования Российской Федерации. Масштаб 1:8 000 000. Пояснительный текст и легенда к карте / И. С. Урусевская, И. О. Алябина, С. А. Шоба ; Отв. ред. И. С. Урусевская. – Москва : ООО "МАКС Пресс", 2020. – 100 с. – ISBN 978-5-317-06346-7. – EDN TALQVO.территория

57. Фарходов Ю. Р., Ярославцева Н. В., Яшин М. А. [и др.] Выход денсиметрических фракций из типичных черноземов разного землепользования // Бюллетень Почвенного института им. В. В. Докучаева. – 2020. – № 103. – С. 85–107. – DOI: 10.19047/0136-1694-2020-103-85-107. – EDN: GYJVEM.

58. Филиппова О. И., Холодов В. А., Сафронова Н. А. [и др.] Микроагрегатный, гранулометрический и агрегатный состав гумусовых горизонтов зонального ряда почв европейской России // Почвоведение. – 2019. – № 3. – С. 335–347. – DOI: 10.1134/S0032180X19030031. – EDN: VUFCWH.

59. Хитров Н. Б., Никитин Д. А., Иванова Е. А., Семенов М. В. Пространственно-временная изменчивость содержания и запасов органического вещества почвы: аналитический обзор // Почвоведение. – 2023. – № 12. – С. 1493–1521. – DOI: 10.31857/S0032180X23600841.

60. Холодов В. А. Механизмы восстановления структуры и органического вещества гумусовых горизонтов почв на разных уровнях иерархической организации : дис. ... д-ра с.-х. наук : 03.02.13 – Почвоведение. – 2021. – 241 с. – EDN: QTYQNG.

61. Холодов В. А., Рогова О. Б., Лебедева М. П., Варламов Е. Б., Волков Д. С., Зиганшина А. Р., Ярославцева Н. В. Органическое вещество и минеральная матрица почв: современные подходы, определения терминов и методы изучения (обзор) // Бюллетень Почвенного института имени В. В. Докучаева. – 2023. – Вып. 117. – С. 52–100. – DOI: 10.19047/0136-1694-2023-117-52-100.

62. Холодов В. А., Рогова О. Б., Лебедева М. П., Варламов Е. Б., Волков Д. С., Зиганшина А. Р., Ярославцева Н. В. Органическое вещество и минеральная матрица почв: современные подходы, определения терминов и методы изучения (обзор) // Бюллетень Почвенного института имени В. В. Докучаева. – 2023. – Вып. 117. – С. 52–100. – DOI: 10.19047/0136-1694-2023-117-52-100.

63. Холодов В. А., Ярославцева Н. В., Фарходов Ю. Р. [и др.] Изменение соотношения фракций агрегатов в гумусовых горизонтах черноземов в различных условиях землепользования // Почвоведение. – 2019. – № 2. – С. 184–193. – DOI: 10.1134/S0032180X19020060. – EDN: YVZMRV.

64. Холодов В. А., Ярославцева Н. В., Фарходов Ю. Р. [и др.] Оптические характеристики экстрагируемых фракций органического вещества типичных черноземов в многолетних полевых опытах // Почвоведение. – 2020. – № 6. – С. 691–702. – DOI: 10.31857/S0032180X20060052. – EDN: HUEWNN.

65. Холодов В.А., Фарходов Ю.Р., Ярославцева Н.В., Айдиев А.Ю., Лазарев В.И., Ильин Б.С., Иванов А.Л., Куликова Н.А. Термостабильное и термостабильное органическое вещество черноземов разного землепользования. Почвоведение. 2020б. № 8. С. 970-982. <https://doi.org/10.31857/S0032180X20080080>.

66. Холодов В.А., Ярославцева Н.В., Константинов А.И., Перминова И.В. Препаративный выход и свойства гуминовых кислот при последовательных щелочных экстракциях // Почвоведение. 2015. № 10. С. 1222-1231.

67. Холодов В.А., Ярославцева Н.В., Фарходов Ю.Р., Яшин М.А., Лазарев В.И., Ильин Б.С., Филиппова О.И., Воликов А.Б., Иванов А.Л. Оптические характеристики экстрагируемых фракций органического вещества типичных

черноземов в многолетних полевых опытах // Почвоведение. 2020а. № 6. С. 691-702. <https://doi.org/10.31857/S0032180X20060052>.

68. Цомаева Е. В., Артемьева З. С., Засухина Е. С., Варламов Е. Б. Несиликатное железо минерально-ассоциированного органического вещества агрочерноземов разной локализации на склоне // Бюллетень Почвенного института имени В. В. Докучаева. – 2023. – Вып. 115. – С. 54–86. – DOI: 10.19047/0136-1694-2023-115-54-86.

69. Шаймухаметов М.Ш., Титова Н.А., Травникова Л.С., Лабенец Е.М. Применение физических методов фракционирования для характеристики органического вещества почв // Почвоведение. 1984. № 8. С. 131-141.

70. Шаймухаметов М.Ш., Титова Н.А., Травникова Л.С., Лабенец Е.М. Применение физических методов фракционирования для характеристики органического вещества почв // Почвоведение. 1984. № 8. С. 131-141.

71. Шеин Е. В., Рыжова И. М. Математическое моделирование в почвоведении: учебник. – М. : ИП Маракушев А. Б., 2016. – 377 с. – ISBN 978-5-9908895-0-7.

72. Abatzoglou J.T., Dobrowski S.Z., Parks S.A., Hegewisch K.C. TerraClimate: A high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015 // Scientific Data. – 2018. – Vol. 5. – Article 170191. – DOI: 10.1038/sdata.2017.191.

73. Смагин А.В., Садовникова Н.Б, Смагина М.В. и др. Моделирование динамики органического вещества почв. М.: Изд-во Моск. Ун-та, 2001. 120 с.

74. Abatzoglou J. T., Dobrowski S. Z., Parks S. A., Hegewisch K. C. Terraclimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015 // Scientific Data. – 2018. – Vol. 5. – Article 170191. – DOI: 10.1038/sdata.2017.191.

75. Agtmaal M., Straathof A., Termorshuizen A., Teurlinckx S., Hundscheid M., Ruymers S., Busschaert P., Lievens B., de Boer W. Exploring the

reservoir of potential fungal plant pathogens in agricultural soil // *Applied Soil Ecology*. – 2017. – Vol. 121. – P. 152–160. – DOI: 10.1016/j.apsoil.2017.09.032.

76. Ahkami A. H., White R. A., Handakumbura P. P., Jansson C. Rhizosphere engineering: Enhancing sustainable plant ecosystem productivity // *Rhizosphere*. – 2017. – Vol. 3. – P. 233–243. – DOI: 10.1016/j.rhisph.2017.04.012.

77. Akinsete S. J., Nortcliff S. Storage of total and labile soil carbon fractions under different land-use types: a laboratory incubation study // *Soil Carbon* / eds. A. E. Hartemink, K. McSweeney. – Cham : Springer, 2014. – P. 197–207. – DOI: 10.1007/978-3-319-04084-4_21.

78. Akinsete S., Nortcliff S. Storage of total and labile soil carbon fractions under different land-use types: a laboratory incubation study // *Soil Carbon* / eds. Hartemink A. E., McSweeney K. – Cham : Springer, 2014. – P. 197–207. – DOI: 10.1007/978-3-319-04084-4_21.

79. Amorim H. C. S., Hurtarte L. C. C., Souza I. F., Zinn Y. L. C:N ratios of bulk soils and particle-size fractions: global trends and major drivers // *Geoderma*. – 2022. – Vol. 425. – Article 116026. – DOI: 10.1016/j.geoderma.2022.116026.

80. Andrén O., Kätterer T. ICBM: the introductory carbon balance model for exploration of soil carbon balances // *Ecological Applications*. – 1997. – Vol. 7. – P. 1226–1236.

81. Andrews S. S., et al. On-farm assessment of soil quality in California's Central Valley // *Agronomy Journal*. – 2002. – Vol. 94. – P. 12–23. – DOI: 10.2134/agronj2002.1200.

82. Andrews S. S., Karlen D. L., Cambardella C. A. The Soil Management Assessment Framework: a quantitative soil quality evaluation method // *Soil Science Society of America Journal*. – 2004. – Vol. 68. – P. 1945–1962. – DOI: 10.2136/sssaj2004.1945.

83. Angers D. A., Arrouays D., Saby N. P. A., Walter C. Estimating and mapping the carbon saturation deficit of French agricultural topsoils // *Soil Use and Management*. – 2011. – Vol. 27. – P. 448–452.

84. Angst G., Mueller K. E., Castellano M. J., et al. Unlocking complex soil systems as carbon sinks: multi-pool management as the key // *Nature Communications*. – 2023. – Vol. 14. – Article 2967. – DOI: 10.1038/s41467-023-38700-5.

85. Angst G., Mueller K., Castellano M., Vogel C., Wiesmeier M., Mueller C. Unlocking complex soil systems as carbon sinks: multi-pool management as the key // *Nature Communications*. – 2023. – Vol. 14. – Article 2967. – DOI: 10.1038/s41467-023-38700-5.

86. Angst Š., Mueller C. W., Cajthaml T., Angst G., Lhotáková Z., Bartuška M., Špaldoňová A., Frouz J. Stabilization of soil organic matter by earthworms is connected with physical protection rather than with chemical changes of organic matter // *Geoderma*. – 2017. – Vol. 289. – P. 29–35. – DOI: 10.1016/j.geoderma.2016.11.017.

87. Armenise E., Redmile-Gordon M., Stellacci A. M., Ciccicarese A., Rubino P. Developing a soil quality index to compare soil fitness for agricultural use under different managements in the Mediterranean environment // *Soil and Tillage Research*. – 2013. – Vol. 130. – P. 91–98. – DOI: 10.1016/j.still.2013.02.013.

88. Askari M. S., Holden N. M. Quantitative soil quality indexing of temperate arable management // *Soil and Tillage Research*. – 2015. – Vol. 150. – P. 57–67. – DOI: 10.1016/j.still.2015.01.010.

89. Averill C., Waring B. Nitrogen limitation of decomposition and decay: How can it occur? // *Global Change Biology*. – 2017. – Vol. 24. – DOI: 10.1111/gcb.13980.

90. Baldock J. A., McNally S. R., Beare M. H., Curtin D., Hawke B. Predicting soil carbon saturation deficit and related properties of New Zealand

soils using infrared spectroscopy // *Soil Research*. – 2019. – Vol. 57. – P. 835–844.

91. Banger K., Toor G., Biswas A., Sidhu S., Sudhir A. Soil organic carbon fractions after 16 years of applications of fertilizers and organic manure in a Typic Rhodalfs in semi-arid tropics // *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. – 2010. – Vol. 86. – P. 391–399. – DOI: 10.1007/s10705-009-9301-8.

92. Barré P., Durand H., Chenu C., Meunier P., Montagne D., Castel G., Billiou D., Soucémariadin L., Cécillon L. Geological control of soil organic carbon and nitrogen stocks at the landscape scale // *Geoderma*. – 2017. – Vol. 285. – P. 50–61. – DOI: 10.1016/j.geoderma.2016.09.029.

93. Barré P., Quénéa K., Vidal A., Cécillon L., Christensen B., Kätterer T., Macdonald A., Petit L., Plante A., Oort F., Chenu C. Microbial and plant-derived compounds both contribute to persistent soil organic carbon in temperate soils // *Biogeochemistry*. – 2018. – Vol. 140. – P. 93–106. – DOI: 10.1007/s10533-018-0475-5

94. Beare M., McNeill S., Curtin D., Parfitt R., Jones H. S., Dodd M., Sharp J. Estimating the organic carbon stabilisation capacity and saturation deficit of soils: a New Zealand case study // *Biogeochemistry*. – 2014. – Vol. 118. – P. 209–220. – DOI: 10.1007/s10533-014-9982-1.

95. Belmonte S. A., Celi L., Stahel R. J., et al. Effect of long-term soil management on the mutual interaction among soil organic matter, microbial activity and aggregate stability in a vineyard // *Pedosphere*. – 2018. – Vol. 28, no. 2. – P. 288–298. – DOI: 10.1016/S1002-0160(18)60015-3.

96. Blagodatsky S., Smith P. Soil physics meets soil biology: towards better mechanistic prediction of greenhouse gas emissions from soil // *Soil Biology and Biochemistry*. – 2012. – Vol. 47. – P. 78–92. – DOI: 10.1016/j.soilbio.2011.12.015.

97. Blanco-Moure N., Gracia R., Bielsa A., López M. Long-term no-tillage effects on particulate and mineral-associated soil organic matter under

rainfed Mediterranean condition // *Soil Use and Management*. – 2013. – Vol. 29. – P. 250–259. – DOI: 10.1111/sum.12039.

98. Blankinship J., Berhe A., Crow S., Druhan J., Heckman K., Keiluweit M., Lawrence C., Marin-Spiotta E., Plante A., Rasmussen C., Schädel C., Schimel J., Sierra C., Thompson A., Wagai R., Wieder W. Improving understanding of soil organic matter dynamics by triangulating theories, measurements, and models // *Biogeochemistry*. – 2018. – Vol. 140. – P. 1–13. – DOI: 10.1007/s10533-018-0478-2.

99. Bongiorno G., Bünemann E. K., Oguejiofor C. U., Meier J., Gort G., Comans R., Mäder P., Brussaard L., de Goede R. G. M. Sensitivity of labile carbon fractions to tillage and organic matter management and their potential as comprehensive soil quality indicators across pedoclimatic conditions in Europe // *Ecological Indicators*. – 2019. – Vol. 99. – P. 38–50. – DOI: 10.1016/j.ecolind.2018.12.008.

100. Boye K., Noel V., Tfaily M., Bone S., Williams K., Bargar J., Fendorf S. Thermodynamically controlled preservation of organic carbon in floodplains // *Nature Geoscience*. – 2017. – Advance online publication. – DOI: 10.1038/ngeo2940.

101. Brady N. C., Weil R. R. *The Nature and Properties of Soils*. – 14th ed. – Upper Saddle River, New Jersey : Prentice Hall, 2008. – 975 p.

102. Bünemann E. K., Bongiorno G., Bai Z., Creamer R. E., De Deyn G., de Goede R., Fleskens L., Geissen V., Kuyper T. W., Mäder P., Pulleman M., Sukkel W., van Groenigen J. W., Brussaard L. Soil quality – a critical review // *Soil Biology and Biochemistry*. – 2018. – Vol. 120. – P. 105–125. – DOI: 10.1016/j.soilbio.2018.01.030.

103. Cai A., Han T., Ren T., Sanderman J., Rui Y., Wang B., Smith P., Xu M., Li Y. Declines in soil carbon storage under no tillage can be alleviated in the long run // *Geoderma*. – 2022. – Vol. 425. – Article 116028. – DOI: 10.1016/j.geoderma.2022.116028.

104. Carter M., Angers D., Gregorich E., Bolinder M. Characterizing organic matter retention for surface soils in Eastern Canada using density and particle size fractions // *Canadian Journal of Soil Science*. – 2003. – Vol. 83. – P. 11–23. – DOI: 10.4141/S01-087.

105. Chang R., Liu S., Chen L., Li N., Bing H., Wang T., Chen X., Li Y., Wang G. Soil organic carbon becomes newer under warming at a permafrost site on the Tibetan Plateau // *Soil Biology and Biochemistry*. – 2021. – Vol. 152. – Article 108074. – DOI: 10.1016/j.soilbio.2020.108074.

106. Chen X., Chen C., Ma Z., Searle E., Yu Z., Huang Z. Effects of plant diversity on soil carbon in diverse ecosystems: a global meta-analysis // *Biological Reviews*. – 2019. – Vol. 94. – P. 333–348. – DOI: 10.1111/brv.12554.

107. Coleman K., Jenkinson D.S., Crocker G.J., Grace P.R., Klír J., Körschens M., Poulton P.R., Richter D.D. Simulating trends in soil organic carbon in long-term experiments using RothC-26.3 // *Geoderma*. – 1997. – Vol. 81, Issues 1–2. – P. 29–44. – DOI: 10.1016/S0016-7061(97)00079-7.

108. Cotrufo M. F., Haddix M. L., Kroeger M. E., Stewart C. E. The role of plant input physical-chemical properties, and microbial and soil chemical diversity on the formation of particulate and mineral-associated organic matter // *Soil Biology and Biochemistry*. – 2022. – Vol. 168. – Article No. 108648. – DOI: 10.1016/j.soilbio.2022.108648.

109. Cotrufo M. F., Lavalley J., Zhang Y., Hansen P., Paustian K., Schipanski M., Wallenstein M. In-N-Out: a hierarchical framework to understand and predict soil carbon storage and nitrogen recycling // *Global Change Biology*. – 2021. – Vol. 27. – P. 4465–4468. – DOI: 10.1111/gcb.15782.

110. Cotrufo M. F., Ranalli M. G., Haddix M., Six J., Lugato E. Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter // *Nature Geoscience*. – 2019. – Vol. 12. – P. 1–6. – DOI: 10.1038/s41561-019-0484-6.

111. Cotrufo M. F., Soong J. L., Horton A. J., Campbell E. E., Haddix M. L., Wall D. H., Parton W. J. Formation of soil organic matter via biochemical and

physical pathways of litter mass loss // *Nature Geoscience*. – 2015. – Vol. 8. – P. 776–779. – DOI: 10.1038/ngeo2520.

112. Cotrufo, M. F., Lavelle, J. Soil organic matter formation, persistence, and functioning: A synthesis of current understanding to inform its conservation and regeneration // *Advances in Agronomy*. – 2022. – Vol. 172. – P. 1–46. – DOI: 10.1016/bs.agron.2021.11.002.

113. Culman S., Hurisso T., Wade J. Permanganate oxidizable carbon: an indicator of biologically-active soil carbon // *Laboratory Methods for Soil Health Analysis*. – Vol. 2. – John Wiley Sons, 2021. – P. 152–175.

114. Culman S., Snapp S., Freeman M., Schipanski M., Beniston J., et al. Permanganate oxidizable carbon reflects a processed soil fraction that is sensitive to management // *Soil Science Society of America Journal*. – 2012. – Vol. 76, No. 2. – P. 494–504. – DOI: 10.2136/sssaj2011.0286.

115. Culman S., Snapp S., Schipanski M., Freeman M., Beniston J., Drinkwater L., Franzluebbers A., Glover J., Grandy S., Lal R., Lee J., Maul J., Mirsky S., Six J., Spargo J., Wander M. Permanganate oxidizable carbon reflects a processed soil fraction that is sensitive to management // *Soil Science Society of America Journal*. – 2012. – Vol. 76. – P. 494–504. – DOI: 10.2136/sssaj2011.0286.

116. Daly A. B., Jilling A., Bowles T. M., Buchkowski R. W., Frey S. D., Kallenbach C. M., Keiluweit M., Mooshammer M., Schimel J. P., Grandy A. S. A holistic framework integrating plant–microbe–mineral regulation of soil bioavailable nitrogen // *Biogeochemistry*. – 2021. – Vol. 154. – P. 211–229. – DOI: 10.1007/s10533-021-00786-0.

117. Das D., Dwivedi B., Singh V., Datta S., Meena M., Chakraborty D., Bandyopadhyay K. K., Kumar R., Mishra R. P. Long-term effects of fertilisers and organic sources on soil organic carbon fractions under a rice–wheat system in the Indo-Gangetic Plains of north-west India // *Soil Research*. – 2016. – Vol. 55. – P. 296–308. – DOI: 10.1071/SR16097.

118. Deneff K., Zotarelli L., Boddey R., Six J. Microaggregate-associated carbon as a diagnostic fraction for management-induced changes in soil organic carbon in two Oxisols // *Soil Biology and Biochemistry*. – 2007. – Vol. 39. – P. 1165–1172. – DOI: 10.1016/j.soilbio.2006.12.024.

119. Dikgwatlhe S., Kong F.-L., Chen Z., Lal R., Zhang H., Chen F. Tillage and residue management effects on temporal changes in soil organic carbon and fractions of a silty loam soil in the North China Plain // *Soil Use and Management*. – 2014. – Vol. 30. – P. 524–531. – DOI: 10.1111/sum.12143.

120. Doetterl S., Berhe A., Nadeu E., Wang Z., Sommer M., Fiener P. Erosion, deposition and soil carbon: a review of process-level controls, experimental tools and models to address C cycling in dynamic landscapes // *Earth-Science Reviews*. – 2016. – Vol. 154. – P. 179–193. – DOI: 10.1016/j.earscirev.2015.12.005.

121. Doran J. W., Parkin T. B. Defining and assessing soil quality // *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment* / Eds. Doran J. W., Coleman D. C., Bezdicsek D. F., Stewart B. A. – Madison : Soil Science Society of America, 1994. – P. 3–21. – DOI: 10.2136/sssaspecpub35.c1.

122. Dungait J. A. J., Hopkins D. W., Gregory A. S., Whitmore A. P. Soil organic matter turnover is governed by accessibility not recalcitrance // *Global Change Biology*. – 2012. – Vol. 18. – P. 1781–1796. – DOI: 10.1111/j.1365-2486.2012.02665.x.

123. Eavis B. W., Ratliff L. F., Taylor H. M. Use of a deadload technique to determine axial root growth pressure // *Agronomy Journal*. – 1969. – Vol. 61. – P. 640–643.

124. Eickhorst T., Tippkötter R. Management-induced structural dynamics in paddy soils of south east China simulated in microcosms // *Soil and Tillage Research*. – 2009. – Vol. 102. – P. 168–178. – DOI: 10.1016/j.still.2008.07.007.

125. Elliott E.T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils // *Soil Science Society of America Journal*. – 1986.

– T. 50. – C. 627–633. – DOI:
<http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1986.03615995005000030017x>.

126. Fabrizzi K. P., Gorgia F. O., Costa J. L., Picone L. I. Soil water dynamics, physical properties and corn and wheat responses to minimum and no-tillage systems in southeastern Pampas of Argentina // *Soil and Tillage Research*. – 2005. – Vol. 81. – P. 57–69.

127. Fageria N. K., Baligar V. C., Bailey B. A. Role of cover crops in improving soil and row crop productivity // *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. – 2005. – Vol. 36. – P. 2733–2757. – DOI: 10.1080/00103620500303939.

128. Fan W., Wu J. Short-term effects of returning granulated straw on soil microbial community and organic carbon fractions in dryland farming // *Journal of Microbiology*. – 2020. – Vol. 58. – P. 657–667.

129. Farr T. G., Rosen P. A., Caro E., Crippen R., Duren R., Hensley S., Kobrick M., Paller M., Rodriguez E., Roth L., Seal D., Shaffer S., Shimada J., Umland J., Werner M., Oskin M., Burbank D., Alsdorf D. E. The shuttle radar topography mission // *Reviews of Geophysics*. – 2007. – Vol. 45, no. 2. – Article RG2004. – DOI: 10.1029/2005RG000183.

130. Faucon M.-P., Houben D., Lambers H. Plant functional traits: soil and ecosystem services // *Trends in Plant Science*. – 2017. – Vol. 22. – P. 385–394. – DOI: 10.1016/j.tplants.2017.01.005.

131. Feng W., Plante A. F., Six J. Improving estimates of maximal organic carbon stabilization by fine soil particles // *Biogeochemistry*. – 2013. – Vol. 112, no. 1–3. – P. 81–93. – DOI: 10.1007/s10533-011-9679-7.

132. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). World reference base for soil resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. Updated 2022. – Rome: FAO, 2022. – 182 p. – (World Soil Resources Reports; No. 106). – URL:

<https://www.fao.org/documents/card/en/c/ccfcb8en> (дата обращения: 20.09.2024).

133. Fujisaki K., Chevallier T., Chapuis-Lardy L., Albrecht A., Razafimbelo T., Masse D., Ndour Y., Chotte J.-L. Soil carbon stock changes in tropical croplands are mainly driven by carbon inputs: a synthesis // *Agriculture, Ecosystems and Environment*. – 2018. – Vol. 259. – P. 147–158. – DOI: 10.1016/j.agee.2017.12.008.

134. Georgiou K., Angers D., Champiny R., Cotrufo M. F., Craig M., Doetterl S., Grandy S., Lavallee J., Lin Y., Lugato E., Poeplau C., Rocci K., Schweizer S., Six J., Wieder W. Soil carbon saturation: what do we really know? // *Global Change Biology*. – 2025. – Vol. 31. – DOI: 10.1111/gcb.70197.

135. Ghani A., Dexter M., Perrott K. Hot-water extractable carbon in soils: a sensitive measurement for determining impacts of fertilisation, grazing and cultivation // *Soil Biology and Biochemistry*. – 2003. – Vol. 35. – P. 1231–1243. – DOI: 10.1016/S0038-0717(03)00186-X.

136. Golchin A., Oades J., Skjemstad J., Clarke P. Study of free and occluded particulate organic matter in soils by solid state ¹³C CP/MAS NMR spectroscopy and scanning electron microscopy // *Australian Journal of Soil Research*. – 1994. – Vol. 32. – P. 285–309.

137. Grabau Z., Chen S. Influence of long-term corn–soybean crop sequences on soil ecology as indicated by the nematode community // *Applied Soil Ecology*. – 2016. – Vol. 100. – P. 172–185. – DOI: 10.1016/j.apsoil.2015.12.016.

138. Guillaume T., Bragazza L., Levasseur C., Libohova Z., Sinaj S. Long-term soil organic carbon dynamics in temperate cropland–grassland systems // *Agriculture, Ecosystems and Environment*. – 2021. – Vol. 305. – Article 107184. – DOI: 10.1016/j.agee.2020.107184.

139. Guillaume T., Makowski D., Libohova Z., Bragazza L., Sallaku F., Sinaj S. Soil organic carbon saturation in cropland-grassland systems: Storage

potential and soil quality // *Geoderma*. – 2022. – Vol. 406. – Article 115529. – DOI: 10.1016/j.geoderma.2021.115529.

140. Guillaume T., Maranguit D., Murtilaksono K., Kuzyakov Ya. Sensitivity and resistance of soil fertility indicators to land-use changes: New concept and examples from conversion of Indonesian rainforest to plantations // *Ecological Indicators*. – 2016. – Vol. 67. – P. 49–57. – DOI: 10.1016/j.ecolind.2016.02.039.

141. Guo L., Lin E. Carbon sink in cropland soils and the emission of greenhouse gases from paddy soils: a review of work in China // *Chemosphere – Global Change Science*. – 2001. – Vol. 3. – P. 413–418. – DOI: 10.1016/S1465-9972(01)00019-8.

142. Hartemink A. E. Soils are back on the global agenda // *Soil Use and Management*. – 2008. – Vol. 24, no. 4. – P. 327–330. – DOI: 10.1111/j.1475-2743.2008.00187.x.

143. Hartemink A. E., McSweeney K. (eds.) *Soil Carbon*. – Cham: Springer, 2014. – XXVI, 506 p. – (Progress in Soil Science). – ISBN 978-3-319-04083-7 (hardcover), ISBN 978-3-319-04084-4 (eBook). – DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-04084-4>.

144. Hassink J. Density fractions of soil macroorganic matter and microbial biomass as predictors of C and N mineralization // *Soil Biology and Biochemistry*. – 1995. – Vol. 27. – P. 1099–1108.

145. Hisano M., Chen X., Ryo M. Functional shifts in natural forests under environmental change over the last 65 years are faster in colder regions // Preprint. – 2020. – DOI: 10.21203/rs.3.rs-85210/v1.

146. Hobley E., Willgoose G., Frisia S., Jacobsen G. Environmental and site factors controlling the vertical distribution and radiocarbon ages of organic carbon in a sandy soil of NSW // *Biology and Fertility of Soils*. – 2013. – Vol. 49. – P. 1015–1026. – DOI: 10.1007/s00374-013-0800-z.

147. Jansen B., Wiesenberg G. L. B. Opportunities and limitations related to the application of plant-derived lipid molecular proxies in soil science // SOIL. – 2017. – Vol. 3. – P. 211–234. – DOI: 10.5194/soil-3-211-2017.

148. Janssen B. Nitrogen mineralization in relation to C:N ratio and decomposability of organic materials // Plant and Soil. – 1996. – Vol. 181. – P. 39–45. – DOI: 10.1007/BF00011290.

149. Jastrow J.D., Miller R.M., Boutton T.W. Carbon dynamics of aggregate-associated organic matter estimated by carbon-13 natural abundance // Soil Science Society of America Journal. – 1996. – T. 60, № 3. – C. 801–807. – DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1996.03615995006000030017x>.

150. Jensen J. L., Schjøning P., Watts C., Christensen B. T., Obour P. B., Munkholm L. J. Soil degradation and recovery – Changes in organic matter fractions and structural stability // Geoderma. – 2020. – Vol. 364. – Article 114181. – DOI: 10.1016/j.geoderma.2020.114181.

151. Jensen J. L., Schjøning P., Watts C., Christensen B. T., Peltre C., Munkholm L. J. Relating soil C and organic matter fractions to soil structural stability // Geoderma. – 2018. – Vol. 337. – P. 834–843. – DOI: 10.1016/j.geoderma.2018.10.034.

152. Jilling A., Kane D., Williams A., Yannarell A. C., Davis A., Jordan N. R., Koide R. T., Mortensen D. A., Smith R. G., Snapp S. S., Spokas K. A., Grandy A. S. Rapid and distinct responses of particulate and mineral-associated organic nitrogen to conservation tillage and cover crops // Geoderma. – 2020. – Vol. 359. – Article 114001. – DOI: 10.1016/j.geoderma.2019.114001.

153. Joergensen R. G. Amino sugars as specific indices for fungal and bacterial residues in soil // Biology and Fertility of Soils. – 2018. – Vol. 54. – P. 559–568. – DOI: 10.1007/s00374-018-1288-3.

154. John B., Yamashita T., Ludwig B., Flessa H. Storage of organic carbon in aggregate and density fractions of silty soils under different types of

land use // Geoderma. 2005. V. 128. P. 63–79.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.12.013>

155. Johnston A. E., Poulton P. R., Coleman K. Soil organic matter: its importance in sustainable agriculture and carbon dioxide fluxes // *Advances in Agronomy*. – 2009. – Vol. 101. – P. 1–57. – DOI: 10.1016/S0065-2113(08)00801-8.

156. Just C., Armbruster M., Barkusky D., Baumecker M., Diepolder M., Döring T., Heigl L., Honermeier B., Melkamu J., Merbach I., Rusch C., Schubert D., Schulz F., Schweitzer K., Seidel S., Sommer M., Spiegel H., Thumm U., Zimmer J., Wiesmeier M. Soil organic carbon sequestration in agricultural long-term field experiments as derived from particulate and mineral-associated organic matter // *Geoderma*. – 2023. – Vol. 434. – Article 116472. – DOI: 10.1016/j.geoderma.2023.116472.

157. Kaiser A., Neugirg F., Haas F., Schmidt J., Becht M., Schindewolf M. Determination of hydrological roughness by means of close range remote sensing // *SOIL*. – 2015. – Vol. 1, № 2. – P. 613–620. – DOI: 10.5194/soil-1-613-2015.

158. Kalbitz K., Schmerwitz J., Schwesig D., Matzner E. Biodegradation of soil-derived dissolved organic matter as related to its properties // *Geoderma*. – 2003. – Vol. 113. – P. 273–291. – DOI: 10.1016/S0016-7061(02)00365-8.

159. Karlen D. Soil quality as an indicator of sustainable tillage practices // *Soil and Tillage Research*. – 2004. – Vol. 78. – P. 129–130. – DOI: 10.1016/j.still.2004.02.001.

160. King A., Blesh J. Crop rotations for increased soil carbon: perenniality as a guiding principle // *Ecological Applications*. – 2017. – Vol. 28. – DOI: 10.1002/eap.1648.

161. Kirkby C.A., Richardson A.E., Wade L.J., Batten G.D., Blanchard C., Kirkegaard J.A. Carbon-nutrient stoichiometry to increase soil carbon

sequestration // *Soil Biology and Biochemistry*. – 2013. – Vol. 60. – P. 77–86. – DOI: 10.1016/j.soilbio.2013.01.005.

162. Kleber M., Johnson M.G. Advances in understanding the molecular structure of soil organic matter: Implications for interactions in the environment // *Advances in Agronomy*. – 2010. – Vol. 106. – P. 77–142.

163. Kleber M., Lehmann J. Humic substances extracted by alkali are invalid proxies for the dynamics and functions of organic matter in terrestrial and aquatic ecosystems // *Journal of Environmental Quality*. – 2019. – Vol. 48. – P. 207–216. – DOI: 10.2134/jeq2019.01.0036.

164. Kögel-Knabner I. The macromolecular organic composition of plant and microbial residues as inputs to soil organic matter // *Soil Biology and Biochemistry*. – 2002. – Vol. 34, № 2. – P. 139–162. – DOI: 10.1016/S0038-0717(01)00158-4.

165. Kögel-Knabner I., Amelung W., Cao Z.-H., Fiedler S., Frenzel P., Jahn R., Kalbitz K., Kölbl A., Schloter M. Biogeochemistry of paddy soils // *Geoderma*. – 2010. – Vol. 157. – P. 1–14. – DOI: 10.1016/j.geoderma.2010.03.009.

166. Kögel-Knabner, I. The macromolecular organic composition of plant and microbial residues as inputs to soil organic matter: Fourteen years on // *Soil Biology and Biochemistry*. – 2017. – Vol. 105. – P. A3–A8. – DOI: 10.1016/j.soilbio.2016.08.011.

167. Kravchenko A.N., Guber A.K. Soil pores and their contributions to soil carbon processes // *Geoderma*. – 2017. – Vol. 287. – P. 31–39. – DOI: 10.1016/j.geoderma.2016.06.026.

168. Kuzyakov Y., Blagodatskaya E. Microbial hotspots and hot moments in soil: Concept, review // *Soil Biology and Biochemistry*. – 2015. – Vol. 83. – P. 184–199. – DOI: 10.1016/j.soilbio.2015.01.025.

169. Kuzyakov Y., Gunina A., Zamanian K., Tian J., Luo Y., Xu X., Yudina A., Aponte H., Alharbi H., Ovsepyan L., Kurganova I., Guillaume T. New

approaches for evaluation of soil health, sensitivity and resistance to degradation // *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 7. – DOI: 10.15302/J-FASE-2020338.

170. Lal R. Restoring Soil Quality to Mitigate Soil Degradation // *Sustainability*. – 2015. – Vol. 7, No. 5. – P. 5875–5895. – DOI: 10.3390/su7055875.

171. Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security // *Science*. – 2004. – Vol. 304. – P. 1623–1627. – DOI: 10.1126/science.1097396.

172. Lal R. Soil erosion and the global carbon budget // *Environment International*. – 2003. – Vol. 29. – P. 437–450. – DOI: 10.1016/S0160-4120(02)00192-7.

173. Lavallee J. M., Conant R. T., Haddix M. L., Follett R. L., Bird M. I., Paul E. A. Selective preservation of pyrogenic carbon across soil organic matter fractions and its influence on calculations of carbon mean residence times // *Geoderma*. – 2019. – Vol. 354C. – Art. 113866. – DOI: 10.1016/j.geoderma.2019.07.024.

174. Lavallee J., Soong J., Cotrufo M. F. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century // *Global Change Biology*. – 2020. – Vol. 26. – DOI: 10.1111/gcb.14859.

175. Lehmann J., Bossio D., Kögel-Knabner I., Rillig M. The concept and future prospects of soil health // *Nature Reviews Earth & Environment*. – 2020. – Vol. 1. – P. 1–10. – DOI: 10.1038/s43017-020-0080-8.

176. Lehmann J., Kleber M. The contentious nature of soil organic matter // *Nature*. – 2015. – Vol. 528. – P. 60–68. – DOI: 10.1038/nature16069.

177. Lehmann J., Kleber M. The contentious nature of soil organic matter // *Nature*. 2015. Vol. 528 (7580). P. 60-68.

178. Leifeld J., Lützw M. Chemical and microbial activation energies of soil organic matter decomposition // *Biology and Fertility of Soils*. – 2013. – Vol. 50. – P. 1–7. – DOI: 10.1007/s00374-013-0822-6.

179. Liang B., Lehmann J., Solomon D., Sohi S., Thies J.E., Skjemstad J.O., Luizão F.J., Engelhard M.H., Neves E.G., Wirick S. Stability of biomass-derived black carbon in soils // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2008. – Vol. 72. – P. 6069–6078.

180. Liang Ch., Schimel J.P., Jastrow J.D. The importance of anabolism in microbial control over soil carbon storage // *Nature Microbiology*. – 2017. – Vol. 2. – Art. 17105. – DOI: 10.1038/nmicrobiol.2017.105.

181. Liang Ch., Zhu X. The soil Microbial Carbon Pump as a new concept for terrestrial carbon sequestration // *Science China Earth Sciences*. – 2021. – Vol. 64. – DOI: 10.1007/s11430-020-9705-9.

182. Liptzin D., Norris C.E., Cappellazzi S.B., Mac Bean G., Cope M., Greub K.L.H., Rieke E.L. et al. An evaluation of carbon indicators of soil health in long-term agricultural experiments // *Soil Biol. Biochem.* 2022. V. 172. P. 108708. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108708>

183. Liu X., Li L., Wang Q., Mu S. Land-use change affects stocks and stoichiometric ratios of soil carbon, nitrogen, and phosphorus in a typical agro-pastoral region of northwest China // *Journal of Soils and Sediments*. – 2018. – Vol. 18. – DOI: 10.1007/s11368-018-1984-5.

184. Liu X., Wang Q., Qi Z., Han J.-G., Li L. Response of N₂O emissions to biochar amendment in a cultivated sandy loam soil during freeze-thaw cycles // *Scientific Reports*. – 2016. – Vol. 6. – Art. no. 35411. – DOI: 10.1038/srep35411.

185. Liu X., Wang Z., Zheng K., Han Ch., Li L., Sheng H., Ma Zh. Changes in soil carbon and nitrogen stocks following degradation of alpine grasslands on the Qinghai-Tibetan Plateau: A meta-analysis // *Land Degradation and Development*. – 2021. – Vol. 32. – P. 1262–1273. – DOI: 10.1002/ldr.3796.

186. Liu Y., Ge T., van Groenigen K.J., Yang Y., Wang P., Cheng K., Zhu Z., Wang J., Li Y., Guggenberger G., Sardans J., Peñuelas J., Wu J., Kuzyakov Y. Rice paddy soils are a quantitatively important carbon store according to a global synthesis // *Communications Earth & Environment*. – 2021. – Vol. 2, Article 229. – DOI: <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00229-0>.

187. Lützw M., Kögel-Knabner I., Ludwig B., Matzner E., Flessa H., Ekschmitt K., Guggenberger G., Marschner B., Kalbitz K. Stabilization mechanisms of organic matter in four temperate soils: Development and application of a conceptual model // *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. – 2008. – Vol. 171. – P. 111–124. – DOI: [10.1002/jpln.200700047](https://doi.org/10.1002/jpln.200700047).

188. Maharjan B., Das S., Acharya B. Soil health gap: a concept to establish a benchmark for soil health management // *Global Ecology and Conservation*. – 2020. – Vol. 23. – Article e01116. – DOI: [10.1016/j.gecco.2020.e01116](https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01116).

189. Maltais-Landry G., Scow K., Brennan E. Soil phosphorus mobilization in the rhizosphere of cover crops has little effect on phosphorus cycling in California agricultural soils // *Soil Biology and Biochemistry*. – 2014. – Vol. 78. – P. 255–262. – DOI: [10.1016/j.soilbio.2014.08.014](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.08.014).

190. Margenot A., Wade J., Woodings F. S. The misuse of permanganate as a quantitative measure of soil organic carbon // *Agricultural and Environmental Letters*. – 2024. – Vol. 9, no. 1. – DOI: [10.1002/ael2.20124](https://doi.org/10.1002/ael2.20124).

191. Mary B., Clivot H., Blaszczyk N., Labreuche J., Ferchaud F. Soil carbon storage and mineralization rates are affected by carbon inputs rather than physical disturbance: Evidence from a 47-year tillage experiment // *Agriculture, Ecosystems & Environment*. – 2020. – Vol. 299. – Article 106972. – DOI: [10.1016/j.agee.2020.106972](https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.106972).

192. Matus F. J. Fine silt and clay content is the main factor defining maximal C and N accumulations in soils: a meta-analysis // *Scientific Reports*. – 2021. – Vol. 11. – Article 6438. – DOI: [10.1038/s41598-021-84821-6](https://doi.org/10.1038/s41598-021-84821-6).

193. McDaniel M., Tiemann L., Grandy S. Does agricultural crop diversity enhance soil microbial biomass and organic matter dynamics? A meta-analysis // *Ecological Applications*. – 2013. – Vol. 24. – DOI: 10.1890/13-0616.1.

194. McNally S., Beare M., Curtin D., Meenken E., Kelliher F., Calvelo Pereira R., Shen Q., Baldock J. Soil carbon sequestration potential of permanent pasture and continuous cropping soils in New Zealand // *Global Change Biology*. – 2017. – Vol. 23. – DOI: 10.1111/gcb.13720.

195. Meyer N., Bornemann L., Welp G., Schiedung H., Herbst M., Amelung W. Carbon saturation drives spatial patterns of soil organic matter losses under long-term bare fallow // *Geoderma*. – 2017. – Vol. 306. – P. 89–98. – DOI: 10.1016/j.geoderma.2017.07.004.

196. Midwood A., Hannam K., Gebretsadikan T., Emde D., Jones M. Storage of soil carbon as particulate and mineral associated organic matter in irrigated woody perennial crops // *Geoderma*. – 2021. – Vol. 403. – Article 115185. – DOI: 10.1016/j.geoderma.2021.115185.

197. Mullen R., Hatfield J., Sauer T. Nutrient cycling in soils: nitrogen // *Soil Management: Building a Stable Base for Agriculture* / Eds. Hatfield J. L., Sauer T. J. – 2011. – Chapter 5. – Madison, WI : American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America. – DOI: 10.2136/2011.soilmanagement.c5.

198. Muñoz Sabater J. ERA5-Land monthly averaged data from 1981 to present // Copernicus Climate Change Service (C3S), Climate Data Store (CDS). – 2019. – DOI: 10.24381/cds.68d2bb30. – Дата обращения: 18.08.2024.

199. Nadal-Romero E., Rubio P., Kremyda V., Lasanta T., et al. Effects of agricultural land abandonment on soil organic carbon stocks and composition of soil organic matter in the Central Spanish Pyrenees // *Catena*. – 2021. – Vol. 205, no. 4. – Article 105441. – DOI: 10.1016/j.catena.2021.105441.

200. Neff J., Asner G. Dissolved organic carbon in terrestrial ecosystems: synthesis and a model // *Ecosystems*. – 2001. – Vol. 4. – P. 29–48. – DOI: 10.1007/s10021-000-0058.

201. Olk D.C., Bloom P.R., Perdue E.M., McKnight D.M., Chen Y., Fahrenhorst A., Senesi N., Chin Y.P., Schmitt-Kopplin P., Hertkorn N., Harir M. Environmental and agricultural relevance of humic fractions extracted by alkali from soils and natural waters // *J. Environ. Qual.* 2019. Vol. 48 (2). P. 217-232.

202. Paul E. A. *Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry*. – 3rd ed. – Amsterdam : Elsevier Academic Press, 2006. – 532 p.

203. Pausch J., Kuzyakov Y. Carbon input by roots into the soil: quantification of rhizodeposition from root to ecosystem scale // *Global Change Biology*. – 2018. – Vol. 24. – P. 1–12. – DOI: 10.1111/gcb.13850.

204. Pausch J., Zhu B., Kuzyakov Y., Cheng W. Plant inter-species effects on rhizosphere priming of soil organic matter decomposition // *Soil Biology and Biochemistry*. – 2013. – Vol. 57. – P. 91–99. – DOI: 10.1016/j.soilbio.2012.08.029.

205. Poeplau C., Don A. Sensitivity of soil carbon stocks and fractions to different land-use changes across Europe // *Geoderma*. – 2013. – Vol. 192. – P. 189–201. – DOI: 10.1016/j.geoderma.2012.08.003.

206. Poeplau C., Don A. Sensitivity of soil carbon stocks and fractions to different land-use changes across Europe // *Geoderma*. – 2013. – Vol. 192. – P. 189–201. – DOI: 10.1016/j.geoderma.2012.08.003.

207. Poeplau C., Don A., Six J., Kaiser M., Benbi D., Chenu C., Cotrufo M. F., Derrien D., Gioacchini P., Grand S., Gregorich E., Griepentrog M., Gunina A., Haddix M., Kuzyakov Y., Kühnel A., Macdonald L. M., Soong J., Trigalet S., Vermeire M.-L., Rovira P., van Wesemael B., Wiesmeier M., Yeasmin S., Yevdokimov I., Nieder R. Isolating organic carbon fractions with varying turnover rates in temperate agricultural soils – a comprehensive method comparison // *Soil*

Biology and Biochemistry. – 2018. – Vol. 125. – P. 10–26. – DOI: 10.1016/j.soilbio.2018.06.025.

208. Powlson D., Stirling C., Jat M.L., Gerard B., Palm C., Sanchez P., Cassman K. Limited potential of no-till agriculture for climate change mitigation // *Nature Climate Change*. – 2014. – Vol. 4. – P. 678–683. – DOI: 10.1038/nclimate2292.

209. Puget P., Chenu C., Balesdent J. Dynamics of soil organic matter associated with particle-size fractions of water-stable aggregates // *European Journal of Soil Science*. – 2000. – Vol. 51. – P. 595–605. – DOI: 10.1111/j.1365-2389.2000.00353.x.

210. Qiu C., Zhu D., Ciais P., Guenet B., Krinner G., Peng S., Aurela M., Bruemmer C., Bret-Harte S., Chu H., Chen J., Desai A., Dušek J., Euskirchen E., Fortuniak K., Flanagan L., Friborg T., Grygoruk M., Ziemblińska K. Qiu C., Zhu D., Ciais P., Guenet B., Krinner G., Peng S., Aurela M., Bruemmer C., Bret-Harte S., Chu H., Chen J., Desai A., Dušek J., Euskirchen E., Fortuniak K., Flanagan L., Friborg T., Grygoruk M., Ziemblińska K. ORCHIDEE-PEAT (revision 4596), a model for northern peatland CO₂, water, and energy fluxes on daily to annual scales // *Geoscientific Model Development*. – 2018. – Vol. 11. – P. 497–519. – DOI: 10.5194/gmd-11-497-2018.

211. Rasse D., Rumpel C., Dignac M.-F. Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for specific stabilization // *Plant and Soil*. – 2005. – Vol. 269. – P. 341–356. – DOI: 10.1007/s11104-004-0907-y.

212. Rillig M. C. Arbuscular mycorrhizae, glomalin, and soil aggregation // *Canadian Journal of Soil Science*. – 2004. – Vol. 84. – P. 355–363.

213. Ryu Y., Jiang C., Kobayashi H., Detto M. MODIS-derived global land products of shortwave radiation and diffuse and total photosynthetically active radiation at 5 km resolution from 2000 // *Remote Sensing of Environment*. – 2018. – Vol. 204. – P. 812–825. – DOI: 10.1016/j.rse.2017.09.021.

214. Samson M.E., Chantigny M.H., Vanasse A., Menasseri-Aubry S., Angers D.A. Coarse mineral-associated organic matter is a pivotal fraction for SOM formation and is sensitive to the quality of organic inputs // *Soil Biology and Biochemistry*. – 2020. – Article ID 107935. – DOI: 10.1016/j.soilbio.2020.107935.

215. Sanderman J., Hengl T., Fiske G. Soil carbon debt of 12,000 years of human land use // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. – 2017. – Vol. 114. – Article ID 201706103. – DOI: 10.1073/pnas.1706103114.

216. Schadel C., Luo Y., Evans D., Fei Sh., Schaeffer S.M. Separating soil CO₂ efflux into Cpool specific decay rates via inverse analysis of soil incubation data // *Oecologia*. 2013. V. 171. P. 721–732

217. Schmidt M.W.I., Torn M.S., Abiven S., Dittmar T., Guggenberger G., Janssens I.A., Kleber M., Kögel-Knabner I., Lehmann J., Manning D.A.C., Nannipieri P., Rasse D.P., Weiner S., Trumbore S.E. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property // *Nature*. – 2011. – Vol. 478. – P. 49–56. – DOI: 10.1038/nature10386.

218. Six J., Paustian K., Elliott E.T., Combrink C. Soil structure and soil organic matter: I. Distribution of aggregate size classes and aggregate-associated carbon // *Soil Science Society of America Journal*. – 2000. – Vol. 64. – P. 681–689. – URL: <https://lter.kbs.msu.edu/pub/2665>.

219. Six, J., Elliott, E. T., Paustian, K., & Doran, J. W. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils // *Soil Science Society of America Journal*. – 2002. – T. 66, № 5. – C. 1367–1377. – DOI: 10.2136/sssaj1998.03615995006200050032x

220. Sokol N., Bradford M. Microbial formation of stable soil carbon is more efficient from belowground than aboveground input // *Nature Geoscience*. – 2019. – Vol. 12. – P. 46–53. – DOI: 10.1038/s41561-018-0258-6.

221. Sparrow S. D., Lewis C. E., Knight C. W. Soil quality response to tillage and crop residue removal under subarctic conditions // *Soil and Tillage*

Research. – 2006. – Vol. 91, Issues 1–2. – P. 15–21. – DOI: 10.1016/j.still.2005.08.008.

222. Stevenson F.J. Organic Forms of Soil Nitrogen // Humic Chemistry: Genesis, Composition, Reaction / ed. F.J. Stevenson. – 2nd ed. – New York: Wiley, 1994. – P. 118–160.

223. Stewart C.E., Paustian K., Conant R.T., Plante A.F., Six J. Soil carbon saturation: Concept, evidence and evaluation // Biogeochemistry. – 2007. – Vol. 86. – P. 19–31. – DOI: 10.1007/s10533-007-9140-0.

224. Stewart C.E., Plante A.F., Paustian K., Conant R.T., Six J. Soil carbon saturation: Linking concept and measurable carbon pools // Soil Science Society of America Journal. – 2008. – Vol. 72, No. 2. – P. 379–392. – DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2007.0104>.

225. Strong D.T., Sale P.W.G., Helyar K.R. Use of natural heterogeneity in a small field site to explore the influence of the soil matrix on nitrogen mineralisation and nitrification // Soil Research. – 1997. – Vol. 35. – P. 579–590. – DOI: 10.1071/S96056.

226. Thevenot M., Dignac M.-F., Rumpel C. Fate of lignins in soils: A review // Soil Biology and Biochemistry. – 2010. – Vol. 42. – P. 1200–1211.

227. Tian Q., Taniguchi T., Shi W.-Y., Li G., Yamanaka N., Du S. Land-use types and soil chemical properties influence soil microbial communities in the semiarid Loess Plateau region in China // Scientific Reports. – 2017. – Vol. 7. – Article number: 45289. – DOI: 10.1038/srep45289.

228. Tiemann L., Grandy S., Atkinson E., Marin-Spiotta E., Mcdaniel M. Crop rotational diversity enhances belowground communities and functions in an agroecosystem // Ecology Letters. – 2015. – Vol. 18. – DOI: 10.1111/ele.12453.

229. Traore O., Groleau-Renaud V., Plantureux S., Tubeileh A., Boeuf-Tremblay V. Effect of root mucilage and modelled root exudates on soil structure // European Journal of Soil Science. – 2000. – Vol. 51. – P. 575–581.

230. Trivedi P., Delgado-Baquerizo M., Trivedi C., Hu H., Anderson I.C., Jeffries T.C., Zhou J., Singh B.K. Microbial regulation of the soil carbon cycle: evidence from gene–enzyme relationships // *The ISME Journal*. – 2016. – Vol. 10. – P. 2593–2604.

231. Trumbore S. Radiocarbon and soil carbon dynamics // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. – 2009. – Vol. 37. – P. 47–66. – DOI: 10.1146/annurev.earth.36.031207.124300.

232. VandenBygaart A. J., Gregorich E. G., Angers D. A., Bolinder M. A., Janzen H. H., Campbell C. A., Lal R., Follett R. F. Modeling soil organic carbon change in Canadian agroecosystems: testing the Introductory Carbon Balance Model // In: Follett R. F., Kimble J. M. (eds.) *The Potential of U.S. Forest Soils to Sequester Carbon: Management for Climate Change*. – 2nd ed. – Madison, WI : Soil Science Society of America, 2009. – (SSSA Special Publication 57). – P. 11–25. – DOI: 10.2136/sssaspecpub57.2ed.c2.

233. Virto I., Barré P., Burlot A., Chenu C. Carbon input differences as the main factor explaining the variability in soil organic C storage in no-tilled compared to inversion tilled agrosystems // *Biogeochemistry*. – 2012. – Vol. 108. – P. 17–26. – DOI: 10.1007/s10533-011-9600-4.

234. Vosselman G. Slope based filtering of laser altimetry data // *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. – 2000. – Vol. XXXIII, Part B3. – P. 935–942. – Amsterdam, The Netherlands.

235. Wang S., Zhuang Q., Wang Q., Jin X., Han C. Mapping stocks of soil organic carbon and soil total nitrogen in Liaoning Province of China // *Geoderma*. – 2017. – Vol. 305. – P. 250–263. – DOI: 10.1016/j.geoderma.2017.05.048.

236. Wang Y., Jiang J., Niu Z., Li Y., Li C., Feng W. Responses of soil organic and inorganic carbon vary at different soil depths after long-term agricultural cultivation in Northwest China // *Land Degradation & Development*. – 2019. – Vol. 30. – P. 1229–1242. – DOI: 10.1002/ldr.3311.

237. Wardle D.A., Bellingham P.J., Kardol P., Giesler R., Tanner E.V.J. Coordination of aboveground and belowground responses to local-scale soil fertility differences between two contrasting Jamaican rain forest types // *Oikos*. – 2015. – Vol. 124, № 3. – P. 285–297. – DOI: 10.1111/oik.01584.

238. Weil R., Stine M., Gruver J., Samson-Liebig S. Estimating active carbon for soil quality assessment: A simplified method for laboratory and field use // *American Journal of Alternative Agriculture*. – 2003. – Vol. 18. – P. 3–17. – DOI: 10.1079/AJAA200228.

239. Whitmore A., Whalley R. Physical effects of soil drying on roots and crop growth // *Journal of Experimental Botany*. – 2009. – Vol. 60. – P. 2845–2857. – DOI: 10.1093/jxb/erp200.

240. Wiesmeier M., Schád P., Lützw M., Poeplau C., Spörlein P., Geuß U., Hangen E., Reischl A., Schilling B., Kögel-Knabner I. Quantification of functional soil organic carbon pools for major soil units and land uses in southeast Germany (Bavaria) // *Agriculture, Ecosystems & Environment*. – 2014. – Vol. 185. – P. 208–220. – DOI: 10.1016/j.agee.2013.12.028.

241. Wiesmeier M., Urbanski L., Hobbey E., Lang B., von Lützw M., Marin-Spiotta E., van Wesemael B., Rabot E., Ließ M., Garcia-Franco N., Wollschläger U., Vogel H.-J., Kögel-Knabner I. Soil organic carbon storage as a key function of soils – A review of drivers and indicators at various scales // *Geoderma*. – 2019. – Vol. 333. – P. 149–162. – DOI: 10.1016/j.geoderma.2018.07.026.

242. Wurst S., Ohgushi T. Do plant- and soil-mediated legacy effects impact future biotic interactions? // *Functional Ecology*. – 2015. – Vol. 29. – P. 1373–1382. – DOI: 10.1111/1365-2435.12456.

243. Wyngaard N., Cabrera M.L., Jarosch K.A., Bünemann E.K. Phosphorus in the coarse soil fraction is related to soil organic phosphorus mineralization measured by isotopic dilution // *Soil Biology and Biochemistry*. – 2016. – Vol. 96. – P. 107–118.

244. Young R., Wilson B.R., McLeod M., Alston C. Carbon storage in the soils and vegetation of contrasting land uses in northern New South Wales, Australia // *Australian Journal of Soil Research*. – 2005. – Vol. 43. – P. 21–31.

245. Yu W., Weintraub-Leff S., Hall S. Climatic and geochemical controls on soil carbon at the continental scale: interactions and thresholds // *Global Biogeochemical Cycles*. – 2021. – Vol. 35. – Article e2020GB006781. – DOI: 10.1029/2020GB006781.

246. Zhang C., Liu B., Xue S., Sun C. Soil organic carbon and total nitrogen storage as affected by land use in a small watershed of the Loess Plateau, China // *European Journal of Soil Biology*. – 2013. – Vol. 54. – P. 16–24. – DOI: 10.1016/j.ejsobi.2012.10.007.

247. Zhang K., Maltais-Landry G., James M., Mendez V., Wright D., George S., Liao H.-L. Absolute microbiome profiling highlights the links among microbial stability, soil health, and crop productivity under long-term sod-based rotation // *Biology and Fertility of Soils*. – 2022. – Vol. 58. – DOI: 10.1007/s00374-022-01675-4.

248. Zhang Z., Yan J., Han X., Zou W., Chen X., Lu X., Feng Y. Organic carbon fractions drive soil microbial communities after long-term fertilization in a Mollisol in Northeastern China // *Global Ecology and Conservation*. – 2021. – Vol. 32. – e01867. – DOI: 10.1016/j.gecco.2021.e01867.

249. Zhao L., Sun Y., Zhang X.-P., Yang X., Drury C. Soil organic carbon in clay and silt sized particles in Chinese mollisols: Relationship to the predicted capacity // *Geoderma*. – 2006. – Vol. 132. – P. 315–323. – DOI: 10.1016/j.geoderma.2005.04.026.

250. Zhao M., Zhou J., Kalbitz K. Carbon mineralization and properties of water-extractable organic carbon in soils of the south Loess Plateau in China // *European Journal of Soil Biology*. – 2008. – T. 44. – C. 158–165. – DOI: 10.1016/j.ejsobi.2007.09.007.

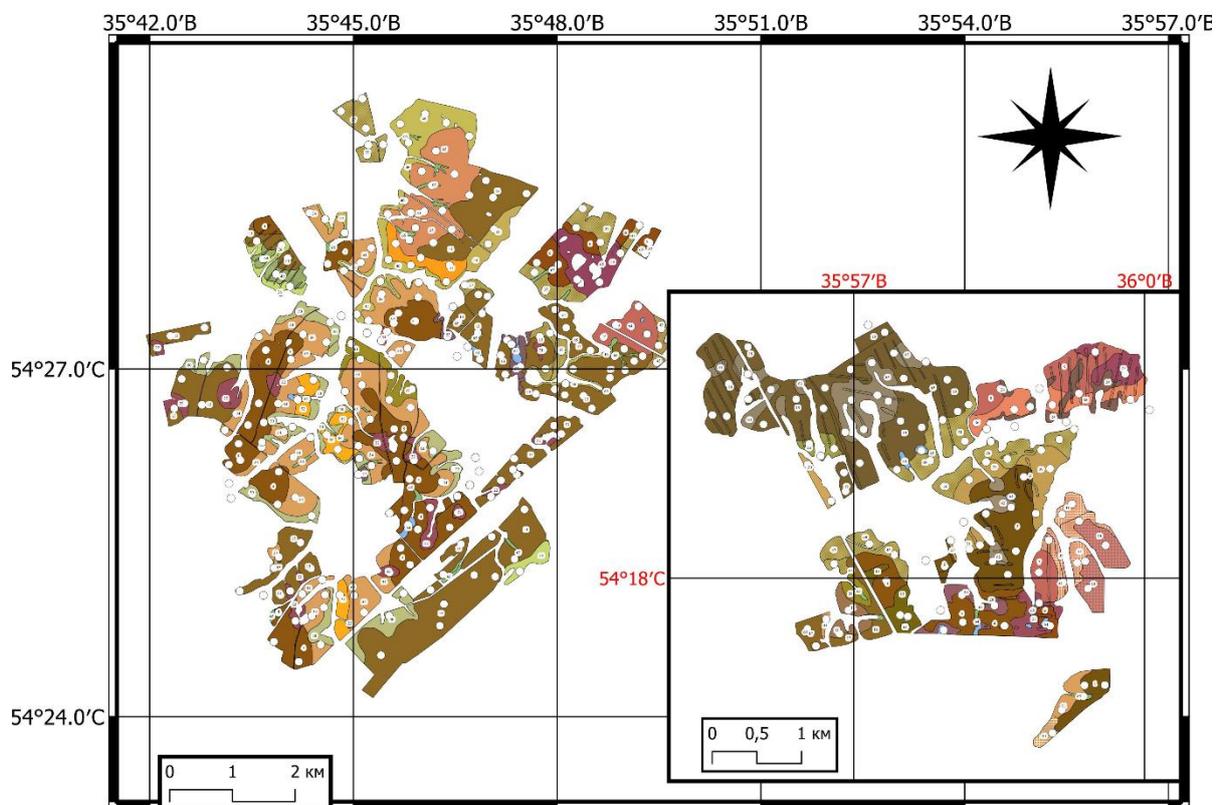
251. Zhao X., Zhang R., Xue J.-F., Zhang X.-Q., Liu Sh., Chen F., Lal R., Zhang H. Management-induced changes to soil organic carbon in China: a meta-analysis // *Advances in Agronomy*. – 2015. – Vol. 134. – P. 1–50. – DOI: 10.1016/bs.agron.2015.06.002.

252. Zhou C., Zhou Q., Wang S. Estimating and analyzing the spatial distribution of soil organic carbon in China // *Ambio*. – 2003. – Vol. 32. – P. 6–12. – DOI: 10.1639/0044-7447(2003)032[0006:EAATSD]2.0.CO;2.

253. 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. – T. 58. – C. 658–667. – DOI: 10.1111/j.1365-2389.2006.00855.x.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Приложение А – Карта микроструктур почвенного покрова, исследуемый участок на территории Калужской области, Среднерусская широколиственная провинция округ Л1 III Бабынинский р-н пос. Тырново



Условные обозначения - индексы почвенных комбинаций:

- 1) Л2 ** сПс (75-90%) + Л2 ** сПс! (10-25%) - 14,3 га
- 2) Л2 ** сПс (90-95%) + Л Пгн *** сПс (5-10%) - 4,6 га
- 3) Л2 ** сПс (75-90%) + Л Пгн ** сПс (5-10%) + Л2 ** сПс! (5-10%) - 62,3 га
- 4) Л2 ** сПс (75-90%) + Л1 ** сПс (10-25%) + Л Пгн *** сПс (5-10%) - 348,0 га
- 5) Л2 ** сПс (75-90%) + Л1 ** сПс! (10-25%) + Л Пгн *** сПс (5-10%) - 93,2 га
- 6) Л2 ** сПс (50-75%) + Л1 ** сПс (25-50%) + Л Пгн *** сПс (5-10%) - 54,4 га
- 7) Л1 ** сПс (75-90%) + Л1 ** сПс! (10-25%) - 13,8 га
- 8) Л1 ** сПс (50-75%) + Л1 ** сПс! (25-50%) + Л Пгн *** сПс (5-10%) - 29,3 га
- 9) Л1 ** сПс (75-90%) + Л Пгн ** сПс (5-10%) + Л2 ** сПс! (5-10%) - 47,3 га
- 10) Л1 ** сПс (75-90%) + Л1 ** сПс! (10-25%) + Пд **/3 сПс (5-10%) - 30,4 га
- 11) Л1 ** сПс (50-75%) + Л2 ** сПс! (10-25%) + Л1 ** сПс! (10-25%) - 11,0 га
- 12) Л2 ** сПс (75-90%) + Л Пгн *** сПс (10-25%) - 13,8 га
- 13) Л2 ** сПс (50-75%) + Л Пгн ** сПс (10-25%) + Л1 ** сПс! (10-25%) - 607,7 га
- 14) Л2 ** сПс (50-75%) + Л Пгн ** сПс (10-25%)! + Л1 ** сПс! (10-25%) - 198,4 га
- 15) Л2 ** сПс (50-75%) + Л Пгн ** сПс (10-25%) + Л1 ** сПс! (10-25%) + Л1 ** сПс!! (5-10%) - 48,4 га
- 16) Л2 ** сПс (50-75%) + Л Пгн *** сПс (10-25%) + Л1 ** сПс (10-25%) - 10,5 га
- 17) Л2 ** сПс (25-50%) + Л1 ** сПс (25-50%) + Л Пгн *** сПс (10-25%) - 12,0 га
- 18) Л1 ** сПс (50-75%) + Л Пгн ** сПс (10-25%) + Л2 ** сПс! (10-25%) - 56,8 га
- 19) Л2 ** сПс (75-90%) + Л Пгн ** сПс (10-25%) + Л2 ** сПс! (5-10%) - 191,3 га
- 20) Л2 ** сПс (50-75%) + Л Пгн *** сПс (25-50%) + Л1 ** сПс (5-10%) - 11,5 га
- 21) Л2 ** сПс (25-50%) + Л Пгн *** сПс (25-50%) + Л1 ** сПс (25-50%) - 16,4 га
- 22) Л2 ** сПс (25-50%) + Л Пгн *** сПс (25-50%) + Л1 ** сПс (10-25%) - 86,1 га
- 23) Л1 ** сПс (25-50%) + Л Пгн *** сПс (25-50%) + Л1 ** сПс! (25-50%) - 17,1 га
- 24) Л Пгн *** сПс (25-50%) + Л1 ** сПс! (25-50%) + Л1 ** сПс! (10-25%) - 20,4 га
- 25) Л2 Пгн** сПс (25-50%) + Л2 ** сПс! (25-50%) + Л2 ** сПс& (25-50%) - 16,0 га
- 26) Л2 Пгн** сПс (25-50%) + Л2 ** сПс! (25-50%) + Л1 ** сПс! (25-50%) - 19,2 га
- 27) Л2 ** сПс! - 0,9 га
- 28) Л2 ** сПс! (50-75%) + Л2 ** сПс (10-25%) + Л2 ** сПс!! (10-25%) - 3,9 га
- 29) Л2 ** сПс! (25-50%) + Л2 ** сПс (25-50%) + Л2 ** сПс!! (10-25%) + Л1 ** сПс& (5-10%) - 32,3 га
- 30) Л2 ** сПс! (50-75%) + Л2 ** сПс!! (25-50%) - 5,6 га
- 31) Л2 ** сПс! (50-75%) + Л1 ** сПс! (10-25%) + Л2 ** сПс (10-25%) - 8,6 га
- 32) Л2 ** сПс! (50-75%) + Л1 ** сПс!! (10-25%) + Л2 ** сПс (10-25%) - 15,6 га
- 33) Л2 ** сПс! (50-75%) + Л1 ** сПс!! (25-50%) - 1,6 га
- 34) Л2 ** сПс! (50-75%) + Л2 ** сПс! (10-25%) + Л1 ** сПс! (10-25%) + Л Пгн ** сПс& (5-10%) - 427,5 га
- 35) Л2 ** сПс! (50-75%) + Л1 ** сПс!! (25-50%) + Л Пгн ** сПс& (5-10%) - 147,3 га
- 36) Л1 ** сПс! (50-75%) + Л1 ** сПс!! (25-50%) - 28,8 га
- 37) Л2 ** сПс! (50-75%) + Л2 ** сПс& (10-25%) + Л1 ** сПс (10-25%) - 128,6 га
- 38) Л2 ** сПс! (50-75%) + Л2 ** сПс& (10-25%) + Л2 ** сПс (10-25%) - 27,7 га
- 39) Л2 ** сПс!! (25-50%) + Л2 ** сПс! (25-50%) + Л1 ** сПс! (10-25%) - 35,0 га
- 40) Л2 ** сПс! (25-50%) + Л1 ** сПс! (10-25%) + Л2 ** сПс (10-25%) + Пд **/2 сПс! (10-25%) - 4,8 га
- 41) Л1 ** сПс! (50-75%) + Л1 ** сПс! (10-25%) + Пд **/3 сПс (10-25%) - 26,4 га
- 42) Л1 ** сПс! (50-75%) + Л1 ** сПс!! (10-25%) + Пд **/3 сПс (10-25%) - 3,1 га
- 43) Л1 ** сПс! (50-75%) + Л2 ** сПс& (10-25%) + Л2 ** сПс (10-25%) - 12,9 га
- 44) Л2 ** сПс! (50-75%) + Л2 Пгн** сПс& (10-25%) + Л2 ** сПс!! (10-25%) - 6,7 га
- 45) Л2 ** сПс! (50-75%) + Л2 ** сПс& (10-25%) + Л1 ** сПс!! (10-25%) - 17,9 га
- 46) Л2 ** сПс! (50-75%) + Л1 ** сПс& (25-50%) - 107,0 га
- 47) Л2 ** сПс! (50-75%) + Л2 ** сПс& (10-25%) + Л1 ** сПс& (10-25%) - 26,6 га
- 48) Л1 ** сПс! (50-75%) + Л1 ** сПс& (25-50%) - 29,5 га
- 49) Л2 ** сПс! (50-75%) + Л2 Пгн** сПс!! (10-25%) + Л1 ** сПс! (10-25%) - 23,9 га
- 50) Л2 ** сПс! (50-75%) + Л Пгн *** сПс& (25-50%) - 157,4 га
- 51) Л2 ** сПс!! (50-75%) + Л2 ** сПс! (25-50%) - 16,2 га
- 52) Л2 ** сПс!! (50-75%) + Л2 ** сПс! (25-50%) + Л Пгн ** сПс& (5-10%) - 35,9 га
- 53) Л2 ** сПс!! (50-75%) + Л1 ** сПс! (25-50%) + Л Пгн ** сПс& (5-10%) - 34,8 га
- 54) Л2 ** сПс!! (50-75%) + Л1 ** сПс!! (25-50%) + Л Пгн ** сПс& (5-10%) - 3,2 га
- 55) Л2 ** сПс (25-50%) + Л2 ** сПс! (25-50%) + Л1 Пгн** сПс& (25-50%) - 4,7 га
- 56) Л1 Пгн** сПс (25-50%) + Л1 ** сПс! (25-50%) + Л1 ** сПс& (25-50%) - 12,0 га
- 57) Л2 Пгн** сПс (25-50%) + Л2 ** сПс! (25-50%) + Л1 ** сПс& (25-50%) - 20,1 га
- 58) Л1 ** сПс (25-50%) + Л Пгн *** сПс (10-25%) + Л1 ** сПс& (10-25%) + Пд Пгн**/3 сПс (5-10%) - 50,3 га
- 59) Л2 ** сПс (25-50%) + Л Пгн *** сПс (25-50%) + Л Пгн *** сПс (25-50%) - 6,1 га
- 60) Л1 ** сПс (25-50%) + Л Пгн *** сПс (25-50%) + Л Пгн *** сПс (25-50%) - 0,5 га
- 61) Л2 ** сПс! (50-75%) + Л Пгн *** сПс& (25-50%) + Пд **/2 сПс (10-25%) + Л2 ** сПс! (10-25%) - 37,3 га
- 62) Л Пгн *** сПс (25-50%) + Л Пгн ** сПс (25-50%) + Л2 ** сПс (25-50%) - 10,8 га
- 63) Л Пгн *** сПс (25-50%) + Л Пгн ** сПс (10-25%) + Л2 ** сПс (10-25%) + Л Пгн ** сПс (10-25%) - 64,0 га
- 64) Л Пгн ** (*) сПс (75-90%) + Л Пгн *** сПс (10-25%) - 21,7 га
- 65) Почвы ложины и ложбин - 42,0 га

Приложение Б – Автоморфные почвы Среднерусская широколиственно-лесная провинция округ Л1 Ш



К 1977 - Серая лесная среднemoshная среднесуглинистая на покровных средних суглинках
WRB 2022 - Albic Luvisol (Eutric)



К 1977 – Светло серая лесная среднemoshная среднесуглинистая на покровных средних суглинках
WRB - Albic Retic Luvisol (Dystric)



К 1977 - Серая лесная среднemoshная среднесуглинистая на покровных средних суглинках
WRB - Albic Luvisol (Eutric)



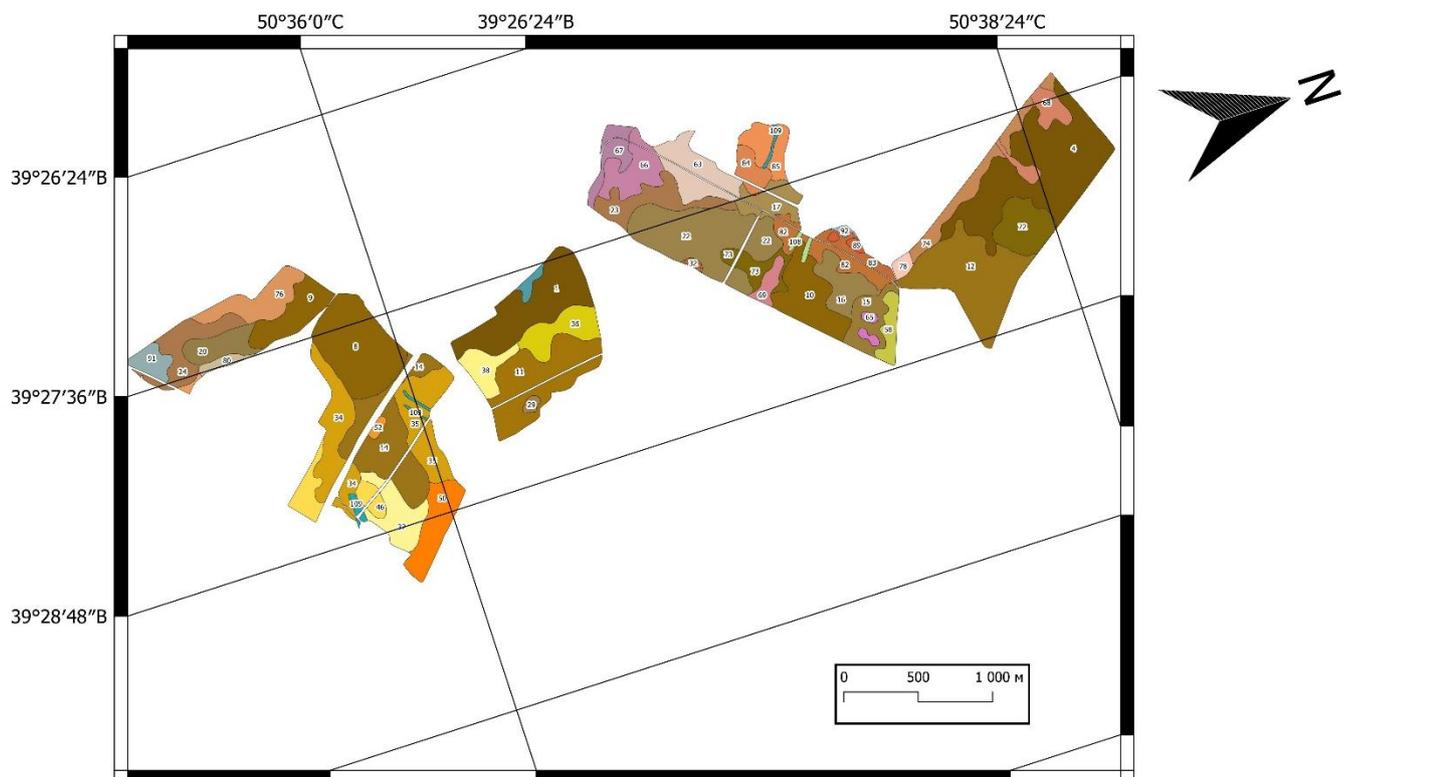
К 1977 - Серая лесная среднесмытая среднemoshная среднесуглинистая на покровных средних суглинках
WRB - Luvisol (Eutric, Truncated)



Обнажение горизонта **BA2** и **B** на смытых участках при проведении отвальной вспашки с оборотом пласта характерное для группы среднесмытых серых лесных почв с мощностью **A1** < 20 см



Приложение В – Карта микроструктур почвенного покрова исследуемый участок, локализованный на территории Воронежской области, Среднерусская лесостепная провинция округ М1 V Каменский р-н пос. Коденцово



Легенда карты микроструктур почвенного покрова

- | | |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> ■ Чт *** лгПлг (50-75%) + Чт *** лгПллг (25-50%) ■ Чт **** лгПлг (25-50%) + Чв ****/3 лгПлг (25-50%) + Чт *** лгПлг (25-50%) ■ Чт *** лгПлг (50-75%) + Чо *** лгПлг (25-50%) ■ Чт **** лгПлг (50-75%) + Чо *** лгПлг (25-50%) ■ Чт *** лгПлг (50-75%) + Чт *** лгПлг (10-25%) + Чо *** лгПлг (10-25%) ■ Чт *** лгПлг (25-50%) + Чт **** лгПлг (25-50%) + Чт *** тсПлг (10-25%) + Чт *** тсПлг (10-25%) ■ Чв *** лгПлг (75-90%) + Чт *** лгПлг (10-25%) ■ Чт *** тсПлг (25-50%) + Чо *** тсПлг (25-50%) + Чт **(*) лгПлг ? (25-50%) ■ Чв *** лгПлг (50-75%) + Чт *** лгПлг (10-25%) + Чо *** лгПлг (10-25%) ■ Чв **(*) тсПлг ! (50-75%) + Чв **** лгПлг (10-25%) + Чт *** тсПлг (10-25%) ■ Чт *** тсПлг (Т) ! (75-90%) + Чв *** тсПлг (Т) (10-25%) ■ Чт **(*) тсПлг (Т) ! (50-75%) + Чт **(*) лгПлг !! (10-25%) + Чо *** тсПлг (10-25%) ■ Чв **(*) тсПлг (Т) ! (50-75%) + Чт **(*) лгПлг !! (25-50%) ■ Чт **(*) лгПлг (Т) !! (25-50%) + Чв **(*) лгПлг (Т) !! (25-50%) + Чо *** тсПлг (Т) (10-25%) + Чо ** тсПлг !! (10-25%) ■ Чт **(*) лгПлг !! ■ Чт **(*) лгПлг !! (50-75%) + Чв ** лгПлг !! (10-25%) + Чтк * тсПлг !!! (10-25%) ■ Чо ** лгПлг ??? ■ Чл1 *** лгПлг (50-75%) + Чв *** лгПлг (25-50%) | <ul style="list-style-type: none"> ■ Чл1 уп *** лгПлг(Т) # ■ Чо сн ***/2 тсТотс (25-50%) + Чл1 м сн *** лгТЗлг (25-50%) + Чо *** лгПлг(Т) (25-50%) ■ Чл1 м сн *** лгТЗлг ■ Чл1 сн уп *** лгТЗлг (50-75%) + Чо *** лгПлг(Т) (25-50%) ■ Чл1 сн уп *** лгТЗлг (25-50%) + Чо *** лгПлг(Т) (25-50%) + Чл1 сн уп н *** лгТЗлг (25-50%) ■ Чл1 сн *** лгПлг(Т) (75-90%) + Чв *** лгПлг (10-25%) ■ Чл1 сн **** лгПлг (ТЗ) (75-90%) + Чв *** лгПлг (10-25%) ■ Чв *** лгПлг (75-90%) + Чл1 сн *** лгПлг(Т) (10-25%) ■ Чв *** лгПлг (ТЗ) (50-75%) + Чл1 сн **** лгПлг (25-50%) ■ Чв *** лгПлг (50-75%) + Чв сн *** тсПлг(Т) (25-50%) ■ Чв **(*) тсПлг(Т) ! # (50-75%) + Чо *** лгПлг (25-50%) ■ Чт **(*) тсПлг ! (50-75%) + Чо **(*) тсПлг(Т) ! (25-50%) ■ Чв сн *** тсПлг(Т) ■ Чо **(*) тсПлг(Т) ! ■ Чв уп н **(*) тсДтс ! (50-75%) + Чв *** тсДтс # (25-50%) ■ Чт н *** лгПлг (75-90%) + Чо сн **(*) тсПлг(Т) ! (10-25%) ■ Техногенные поверхностные образования ■ Смыто-намытые комплексы по дну ложин |
|---|---|

Приложение Г – Автоморфные почвы Среднерусская лесостепная провинция округ М1 V



К 1977 – Чернозем выщелоченный среднетощный тяжелосуглинисты на покровных отложениях тяжелосуглинистого состава
WRB – Chernozem (Luvic, Hypocalcic)



К 1977 – Чернозем выщелоченный среднетощный слабосмытый тяжелосуглинисты на покровных отложениях тяжелосуглинистого состава
WRB – Chernozem (Luvic, Hypocalcic)



К 1977 – Чернозем выщелоченный среднетощный среднесмытый тяжелосуглинисты на покровных отложениях тяжелосуглинистого состава
WRB – Chernozem (Luvic, Hypocalcic)



К 1977 – Чернозем выщелоченный среднетощный сильносмытый тяжелосуглинисты на покровных отложениях тяжелосуглинистого состава
WRB – Chernozem (Luvic, Hypocalcic, Truncated)



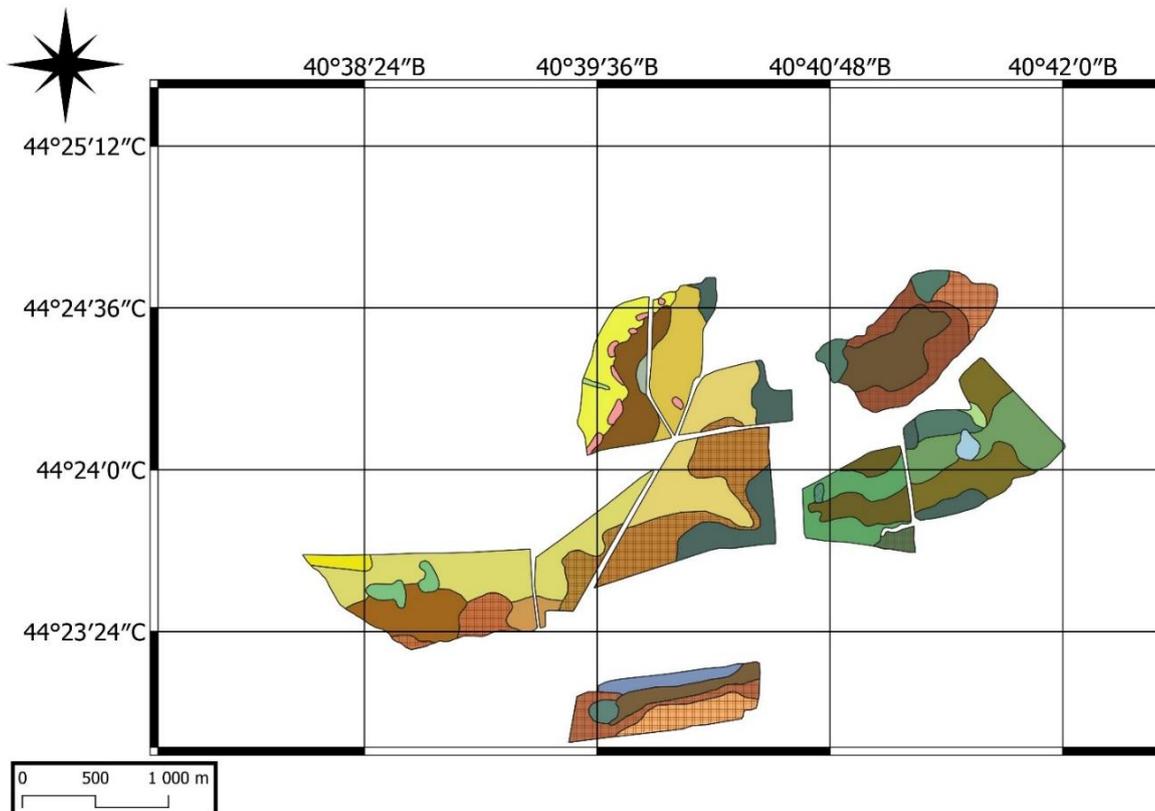
Обнажение покровных суглинков с выделениями карбонатов (CaCO_3) в виде налета и пленок на глубине 2,5-6 м



Формы выделения карбонатов в породе на глубине более 1,5 м из почвенных разрезов – тонкая пленка на агрегатах, диффузное пропитывание



Приложение Д – Карта микроструктур почвенного покрова участок, локализованный на территории Краснодарского края округ Н1 IV, Предкавказская провинция Мостовской р-н пос. Беноково

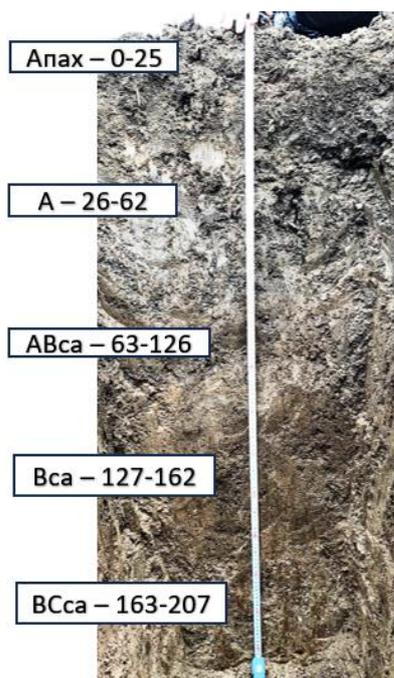


Условные обозначения

- Чв сл **** лгДлг - 24,3 га
- Чв сл **** лгДлг (75-90%) + Чв сл *** лгДлг! (10-25%) - 10,3 га
- Чв *** сЭдс (50-75%) + Чв *** сЭдс! (10-25%) - 19,1 га
- Чв *** сДс (50-75%) + Чв *** сДс!! (10-25%) + Чв **** сДс? (10-25%) - 19,9 га
- Чв сл **** лгДлг (25-50%) + Чв сл **** лгДлг? (25-50%) + Чв сл **** лгДлг! (25-50%) - 22,2 га
- Чв *** сДс (25-50%) + Чв *** сДс! (25-50%) + Чв **** сДс? (10-25%) + Чв *** сДс!! (10-25%) - 5,6 га
- Чв *** сДс (25-50%) + Чв *** сДс! (25-50%) + Чв **** сДс? (25-50%) - 10,1 га
- Чв сл *** лгДлг!! (25-50%) + Чв сл **** лгДлг (25-50%) + Чв сл **** лгДлг!? (25-50%) - 12,6 га
- Чв сл **** лгДлг!! (50-75%) + Чв сл **** лгДлг? (25-50%) - 10,1 га
- Чв ** тсЭдс!?! - 1,5 га
- Чв *** сЭдс!! (50-75%) + Чв **** сЭдс (10-25%) + Чв *** сЭдс!!! (10-25%) - 24,4 га
- Чв *** тсДтс!! (75-90%) + Чв *** тсДтс!!! (10-25%) - 22,5 га
- Чв *** тсЭдтс!! (75-90%) + Чв *** сДс!!! (10-25%) - 16,8 га
- Чв *** тсДтс!! (50-75%) + Чв *** тсДтс!? (10-25%) + Чв *** сДс!!! (10-25%) - 52,2 га
- Чв сл *** лгДлг!! (25-50%) + Чв сл **** лгДлг!? (25-50%) + Чв сл *** лгДлг!!! (25-50%) - 13,7 га
- Чв сл **** лгДлг (50-75%) + Чв **** лгДлг (10-25%) + Чл1 сл **** лгДлг (10-25%) - 16,0 га
- Чв *** тсДтс!! (50-75%) + Чв сл **** тсДтс? (10-25%) + Чл1 сл **** тсДтс? (10-25%) - 39,3 га
- Чв сл **** лгДлг (25-50%) + Чв *** тсДлг (25-50%) + Чл1 сл **** лгДлг (25-50%) - 26,0 га
- Чв *** тсДтс!? (25-50%) + Чв *** тсДтс!! (25-50%) + Чл1 сл **** тсДтс? (25-50%) - 8,0 га
- Чв сл **** лгДлг? (25-50%) + Чл1 сл **** лгДлг? (25-50%) + Чв сл **** лгДлг!! (25-50%) - 14,5 га
- Чв сл **** лгДлг (25-50%) + Чв сл **** лгДлг? (25-50%) + Чл1 сл **** лгДлг (25-50%) - 3,2 га
- Чв сл **** лгДлг?? (25-50%) + Чв сл *** лгДлг!! (25-50%) + Чв сл **** лгДлг!? (25-50%) - 8,1 га

- Чл1 сл **** тсДтс? (25-50%) + Чл1 сл **** лгДлг? (25-50%) + Чв сл **** тсДтс? (25-50%) - 15,8 га
- Чл1 сл **** лгДлг?? - 2,7 га
- Чл2 сл **** лгДлг - 2,3 га
- Чн *** лсЭдлс!! (50-75%) + Чн *** лсЭдсп!! (10-25%) + Чн *** спЭдсп!! (10-25%) - 20,3 га
- Чн ** спЭдсп!!! - 4,1 га
- Чн ** сЭм!!! (50-75%) + Чн ** сЭм!! (10-25%) - 3,8 га
- Смыто-намытые - 2,0 га

Приложение Е – Типовое описание почвенного профиля Предкавказская провинция почвенный округ Н1 IV Новокубанский район пос. Отрадное



K 1977 – Чернозем типичный сверхмощный малогумусный легкоглинистый на легкоглинистых лессовидных отложениях
K 2008 – Агрочернозём миграционно-мицелярный сверхмощный глубокопахотный легкоглинистый на легкоглинистых лессовидных отложениях
WRB – Chernozem haplic, Hypereutric

$A_{max} \frac{0-25}{25}$ – Пахотный горизонт, тёмно-серого цвета, местами прокрашен более интенсивно, в верхней части темная окраска более выражена. Хорошо оструктурен. Структура комковато-зернистая, за счет обработки структурные отдельности в большей степени угловатые, сложение – плотное, в нижней части на глубине 27 см отмечается уплотнение в целом, выраженное как стратификация пахотного горизонта по плотности за счет проведения обработки. В профиле присутствуют включения в виде мелких корней растений. Нижняя граница ровная. Переход отмечается по структуре, плотности.

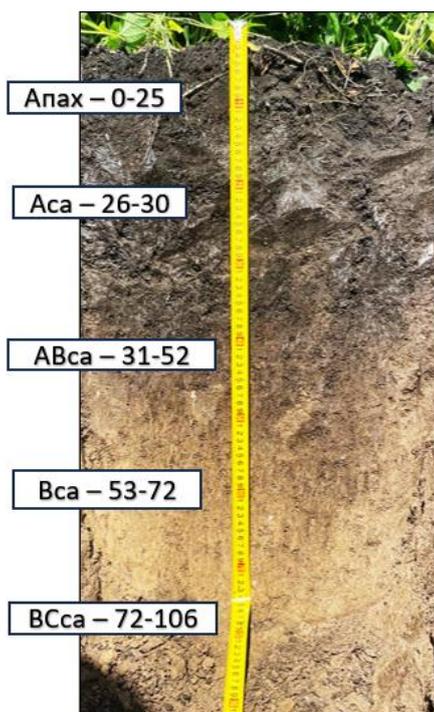
$A \frac{26-62}{36}$ – Гумусово-аккумулятивный горизонт, тёмно-серого цвета окраска неоднородная, местами прокрашен более интенсивно, в верхней части горизонта темная окраска более выражена. Хорошо оструктурен. Структура зернистая, сложение – плотное. В профиле присутствуют включения в виде мелких корней растений. Нижняя граница затечная. Переход отмечается постепенный по структуре, плотности и влажности.

$AB \frac{63-126}{63}$ – Переходный горизонт, более светлый, окраска неоднородная в верхней части более темная за счет элювирования органического вещества. Сложение неоднородное местами более плотный. По граням структурных отдельностей отмечается наличие пленок органических соединений. В горизонте появляются пленки и морфоны с коричневатым оттенком, тяжелосуглинистый, влажноватый, количество новообразований возрастает при движении вниз по горизонту, переход постепенный неровный по структуре, характеру проявления новообразований и цвету. Вскипание от 10% HCl наблюдается с глубины 93 см.

$B_{Ca} \frac{127-162}{35}$ – Коричневатый с оттенками бурого цвета, местами с темно-серыми затеками, структура комковато-ореховатая, местами бесструктурная, непрочный, мягкий, влажноватый, незначительное количество включений корней, переход постепенный неровный по структуре и характеру проявления новообразований в виде прожилок и мицелия.

$BC_{Ca} >163$ – Светло - бурый с оттенками коричневатого цвета, структура -ореховатая, присутствует незначительное количество включений корней, а также характерно наличие новообразований в виде налета и мицелярных образований.

Приложение Ж – Типовое описание почвенного профиля Предкавказская провинция почвенный округ Н1 II Зерноградский р-н пос. Путь правды



K 1977 – Чернозем обыкновенный среднесиловой малогумусный тяжелосуглинистый на лессовидном суглинке
K 2008 – Агрочернозем миграционно-сегрегационный среднесиловой глубокопахотный тяжелосуглинистый на лессовидном суглинке
WRB – Chernozem Calcaric, Hapreutric

$A_{пах} \frac{0-25}{25}$ – Пахотный горизонт, темно-серого цвета окраска неоднородная, местами прокрашен более интенсивно, в верхней части горизонта темная окраска более выражена. Структура зернистая, сложение – рыхлое, в нижней части на глубине. В профиле присутствуют включения в виде мелких корней растений. Нижняя граница ровная. Переход отмечается по структуре, плотности.

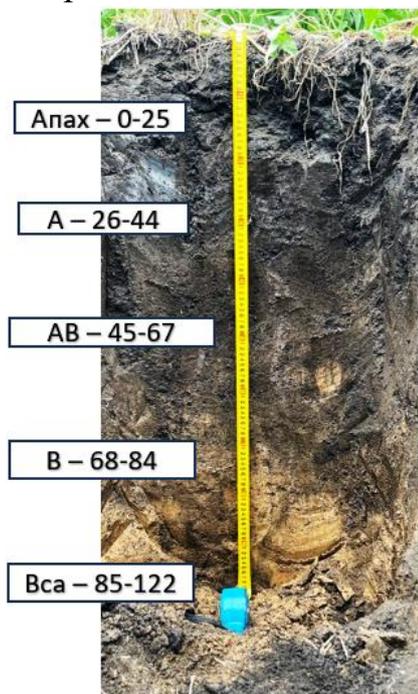
$A \frac{26-30}{4}$ – Остаточный неприпаханный гумусово-аккумулятивный горизонт, темно-серого цвета окраска неоднородная, местами прокрашен более интенсивно. Хорошо оструктурен. Структура зернистая, сложение – плотное. В профиле присутствуют. Нижняя граница затечная. Переход отмечается постепенный по структуре, плотности и цвету граней.

$AB \frac{31-52}{19}$ – Переходный горизонт, светло-серый с оттенками коричневатых тонов, окраска неоднородная в верхней части более темная за счет элювирования органического вещества. Сложение неоднородное местами более плотный. В горизонте появляются пленки и морфоны с коричневатым оттенком, тяжелосуглинистый, влажноватый, количество новообразований возрастает при движении вниз по горизонту, переход постепенный неровный отмечается по структуре, характеру проявления новообразований и цвету. Вскипание от 10% HCl наблюдается с глубины 43 см.

$B_{Ca} \frac{53-72}{19}$ – Коричневатый с оттенками бурого цвета, местами с темно-серыми затеками, структура комковато-призматическая, плотный, переход постепенный неровный по структуре и характеру проявления новообразований в виде прожилок и мицелия.

$BC_{Ca} >72$ – Светло-коричневый с оттенками палевого цвета, структура -призматическая, присутствует незначительное количество включений корней, а также характерно наличие новообразований в виде мицелиарных образований – локально мелких конкреций белоглазки.

Приложение И – Типовое описание почвенного профиля Среднерусская лесостепная провинция почвенный округ М1 V Воронежская область Каменский р-н пос. Коденцово



К 1977 – Чернозем
выщелоченный
среднемощный
среднегумусный
тяжелосуглинистый на
покровных
тяжелосуглинистых
отложениях
К 2008 – Агрочернозём
глинисто-иллювиальный
среднемощный
глубокопахотный
тяжелосуглинистый на
тяжелосуглинистых
покровных отложениях
WRB – Chernozem Luvic,
Hurocalcic

$A_{max} \frac{0-25}{25}$ – Пахотный горизонт, тёмно-серого цвета. Структура - зернистая, сложение – плотное, в нижней части на глубине 26 см отмечается уплотнение. В профиле присутствуют включения в виде мелких корней растений. Нижняя граница ровная. Переход отмечается по структуре, плотности.

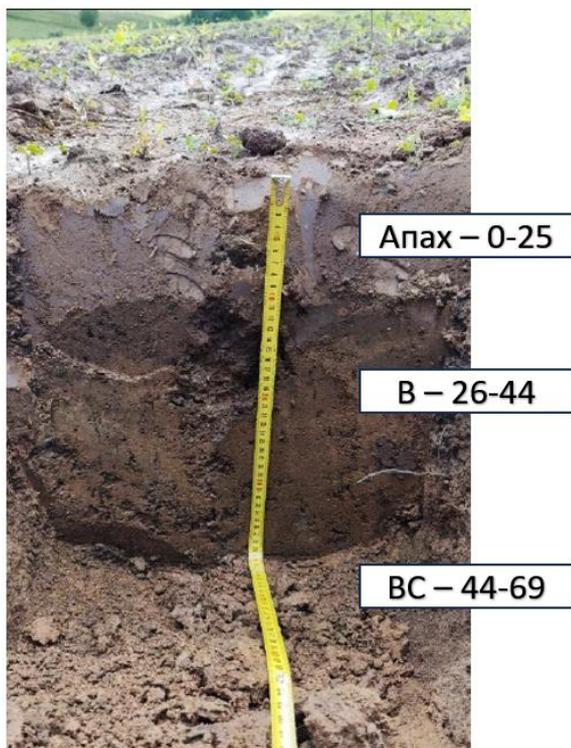
$A \frac{26-44}{18}$ – Гумусово-аккумулятивный горизонт, тёмно-серого цвета, в верхней части горизонта темная окраска более выражена. Хорошо оструктурен. Структура зернистая, сложение – плотное. В профиле присутствуют включения в виде мелких корней растений. Нижняя граница затечная. Переход постепенный по структуре, плотности.

$AB \frac{45-67}{22}$ – Переходный горизонт, светло-серый. Сложение неоднородное местами более плотный, тяжелосуглинистый, влажноватый, переход постепенный неровный по структуре и цвету.

$B_{Ca} \frac{68-84}{16}$ – Коричневатый с оттенками бурого цвета, местами с темно-серыми затеками, структура призматическая, местами бесструктурная, незначительное количество включений корней, переход постепенный неровный по структуре и характеру проявления новообразований в виде прожилок. Вскипание от 10% HCl наблюдается с глубины 75 см. Отмечается наличие зоны выщелачивания карбонатов в горизонте В мощностью 7 см.

$B_{Ca} >85$ – Светло – коричневый, структура -призматическая, присутствует незначительное количество включений корней, а также характерно наличие новообразований в виде налета и мицелярных образований.

Приложение К – Типовое описание почвенного профиля Среднерусская широколиственно-лесная провинция почвенный округ Л1 III Калужская область Бабынинский р-н пос. Тырново



$A_{пах} \frac{0-25}{25}$ – Пахотный горизонт, светло серый с преобладанием коричневатого оттенка. Структура - комковатая, сложение – очень рыхлое. В профиле присутствуют включения в виде мелких корней растений. Нижняя граница ровная. Переход отмечается по структуре и цвету. За счет малой мощности горизонта А, локализации участка на склоне крутизной 3-5° и проведения глубокой обработки часть нижележащего горизонта В припахана

$B \frac{26-44}{18}$ – Коричневый, структура ореховатая, местами бесструктурная, переход постепенный неровный по структуре и цвету

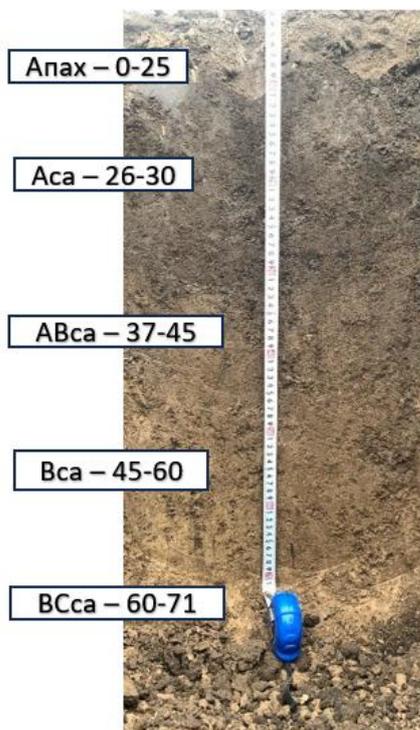
$BC > 49$ – Коричневый с оттенками бурого, структура -ореховатая, присутствует незначительное количество включений корней, а также характерно наличие новообразований в виде пленок железа.

К 1977 – Серая лесная среднemocная среднесмытая среднегумусная среднесуглинистая на покровных средне суглинистых отложениях

К 2008 – Агросерая среднemocная среднепахотная среднесуглинистая на покровных среднесуглинистых отложениях

WRB –Luvisol Eutric Truncated

Приложение Л – Типовое описание почвенного профиля Предкавказская провинция почвенный округ Н1 VI Республика Кабардино-Балкария Терский р-н пос. Хамидие



К 1977 – Чернозем
обыкновенный
среднемощный
малогумусный
тяжелосуглинистый на
лессовидном суглинке
К 2008 – Агрочернозём
миграционно-
сегрегационный
среднемощный
глубокопахотный
тяжелосуглинистый на
лессовидном суглинке
WRB – Chernozem
Calcaric, Hypereutric

$A_{max} \frac{0-25}{25}$ – Темно-серый, ореховато-комковатая структура, тяжелосуглинистый, рыхлый, очень мягкий, влажноватый, отмечается наличие включений корней, переход ровный по структуре, цвету и влажности

$A \frac{26-30}{4}$ – Темно-серого цвета комковатый, рыхлый, тяжелосуглинистый, влажноватый, очень мягкий отмечается наличие включений в виде корней растений, а также незначительное количество новообразований в виде прожилок.

$AB \frac{37-45}{8}$ – Серый с оттенком коричневого, комковато-ореховатая структура, рыхлый, тяжелосуглинистый, мягкая, влажноватая, количество новообразований возрастает при движении вниз по горизонту в нижней части отмечается большое количество карбонатных новообразований в виде псевдомицелия по корневым ходам растений. В горизонте отмечаются включения корней, переход постепенный неровный по структуре, характеру проявления новообразований и цвету. Вскипание от 10% HCl наблюдается с глубины 45 см

$B_{Ca} \frac{45-60}{15}$ – Бурый с оттенками коричневого цвета, местами с темно-серыми затеками, структура комковато-призматическая, плотный, переход постепенный неровный по структуре и характеру проявления новообразований в виде прожилок и мицелия.

$BC_{Ca} > 60$ – Темно-бурый, структура комковатая, мягкий, сложение – рыхлое, тяжелосуглинистый, влажноватый, незначительное количество включений корней растений.