

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Москва – 2026

Работа выполнена на кафедре почвоведения, геологии и ландшафтоведения
ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет — МСХА
имени К. А. Тимирязева»

Научный руководитель

Борисов Борис Анорьевич,
доктор биологических наук, профессор,
профессор кафедры почвоведения, геологии и
ландшафтоведения ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА
имени К. А. Тимирязева

Официальные оппоненты:

Семенов Вячеслав Михайлович, доктор
биологических наук, доцент, старший научный
сотрудник, главный научный сотрудник лаборатории
почвенных циклов азота и углерода, Институт физико-
химических и биологических проблем почвоведения
имени В.А. Ковды Российской академии наук –
обособленное подразделение ФГБУН ФИЦ
«Пущинский научный центр биологических
исследований Российской академии наук»

Холодов Владимир Алексеевич, доктор
сельскохозяйственных наук, заведующий
лаборатории, ведущий научный сотрудник
лаборатории органического вещества и биохимии
почв, ФГБНУ ФИЦ «Почвенный институт им. В.В.
Докучаева»

Ведущая организация

ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский
институт агрохимии имени Д.Н. Прянишникова»

Защита состоится 04 июня 2026 года в 15 час. 00 мин. на заседании
диссертационного совета 35.2.030.05 на базе ФГБОУ ВО «Российский
государственный аграрный университет–МСХА имени К.А. Тимирязева», по
адресу: 127434, г. Москва, ул. Прянишникова, д. 19, тел: 8 (499) 976-17-14.

Юридический адрес для отправки почтовой корреспонденции (отзывов):
127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке
имени Н.И. Железнова ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный
университет – МСХА имени К.А. Тимирязева» и на сайте Университета
www.timacad.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат биологических наук, доцент



И.М. Митюшев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследований

Изучение агрогенного 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 агропочвоведении. В процессе формирования и функционирования агроландшафтов существенно ускорились темпы минерализации органического вещества и интенсивность эрозии. Важной характеристикой ПОВ являются характерные скорости процессов накопления и закрепления в почве, которые существенно меняются в агроландшафтах. При систематическом агрогенном воздействии на почву за счет механической обработки происходит перераспределение углерода внутри функциональных пулов 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. (Семенов, Когут, 2015)

На уровне обобщений такие процессы рассматриваются 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 теорий функционирования и формирования ПОВ. Как отмечают авторы (Cotrufo et al., 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. (Холодов и др., 2023) Эти подходы нуждаются в согласовании и формализации применительно к почвам агроландшафтов, где интенсивность антропогенного воздействия существенно изменяет характер функционирования ПОВ.

Цель работы

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».

По материалам диссертации опубликовано 20 работ, включая 5 статей в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 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 – август 2024), полевые измерения, закладка и описание почвенных разрезов, проведение почвенно-ландшафтного обследования 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.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Современные представления о почвенном органическом веществе и его лабильной части

По современным оценкам, почва является крупнейшим на планете резервуаром углерода (Six, 2002; Lal, 2004; Wang et al., 2014; Семенов, 2015; Kuzyakov, 2015; Tian et al., 2015; Cotrufo, 2021; Cotrufo, 2025). Сложность, гетерогенность и динамичность системы почвенного органического вещества не позволяет изучать его с использованием прямых измерений свойств, в связи с чем появляются новые косвенные методы как измерения, так и оценки состояния ПОВ в агроландшафтах (Шаймухаметов, 1994; Когут, 2003; Jone, 2005; Борисов, 2008; Артемьева, 2015; Кузяков, 2020; Cotrufo, 2022; Холодов и др., 2023; Cotrufo, 2025).

Глава 2. Объекты и методы исследования

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.

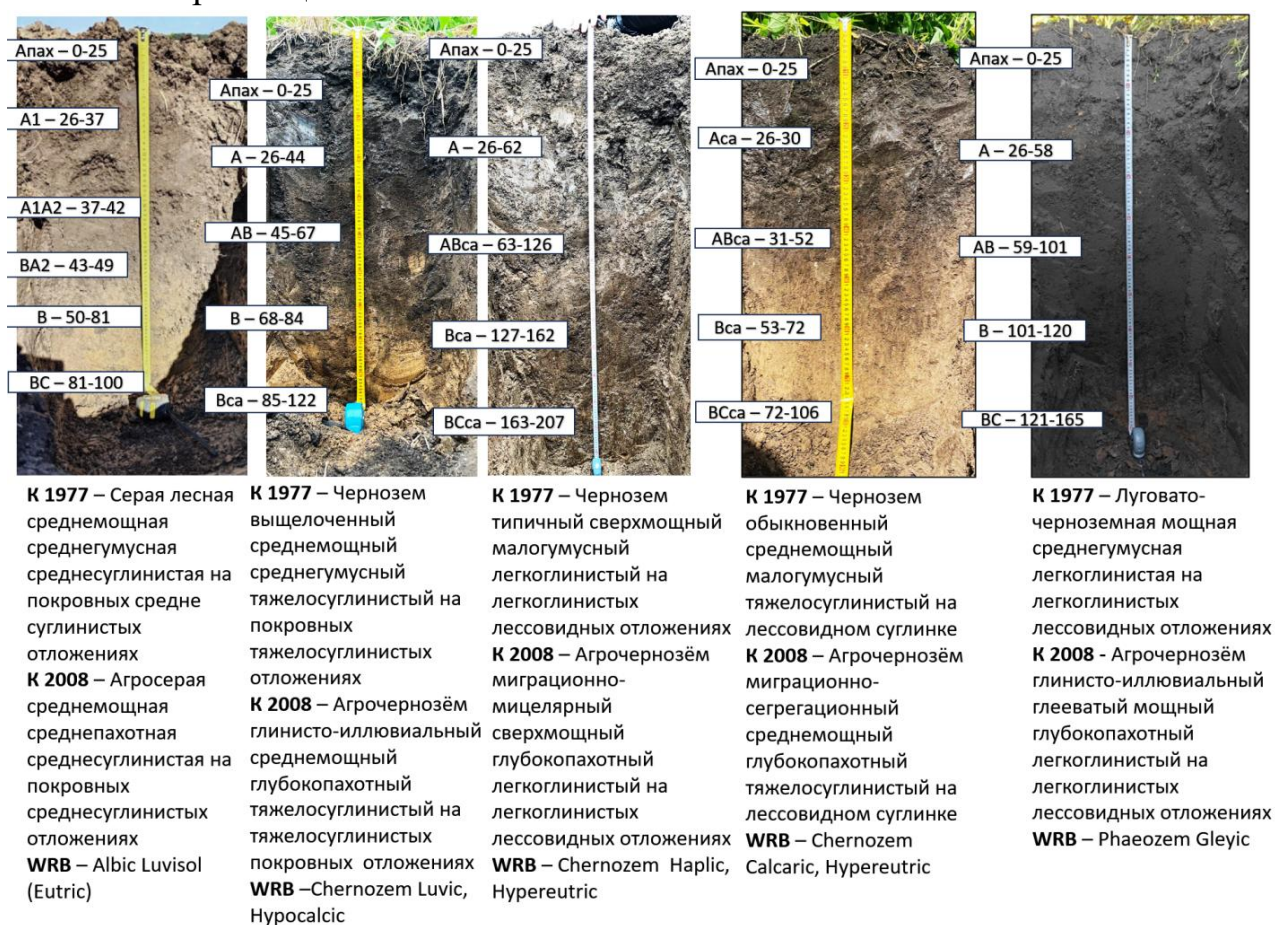


Рис. 1 Морфологическое строение типовых профилей почв

Исследуемые объекты приурочены к территориям: Калужской области (Бабынинский р-н п. Тырново), Воронежской области (Каменский р-н п.

Коденцово), Краснодарского края (Новокубанский, Мостовской р-ны п. Отрадное, п. Беноково), Ростовской области (Зерноградский р-н п. Путь правды), Республики Кабардино-Балкария (Терский р-н п. Хамидие). Анализ почвенно-ландшафтных условий и описание почвенных профилей были произведены во время полевых обследований в период 14.04.2022-15.08.2024.

Образцы почв были отобраны в рамках проведения почвенно-ландшафтных обследований территорий сельскохозяйственных предприятий. Отбор производился из почвенных разрезов и прикопок из пахотных и гумусовых горизонтов в пределах верхних 25 см. Для обеспечения сопоставления агрогенно-преобразованных почв с почвами в условно-естественном состоянии, 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. В Краснодарском крае, Новокубанском районе (пос. Отрадное), разрезы заложены в пределах лесополос по периметру агроландшафта, где доминируют: Вяз приземистый, Клён ясенелистный. В Краснодарском крае, Мостовском районе (п. Беноково) фоновый участок приурочен к вытянутому водоразделу, примыкающему к агроландшафтам. Растительность соответствует лугово-степным сообществам предгорных равнин Западного Кавказа. 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. В Республике Кабардино-Балкария (п. Хамидие) фоновый участок расположен на вытянутом увале, переходящем в склон к реке Куруп. Растительность представлена ковыльно-злаковой ассоциацией предгорных равнин Северного Кавказа. Общее число наблюдений по участкам составило 592 ед. (n=592). В соответствии с методикой (Кирюшин, 2005), почвы были сгруппированы в агроэкологические группы, при этом степень смывости почв в полевых условиях была определена в соответствии с методологией, предложенной в (Классификация и диагностика почв СССР, 1977).



Рис. 2 Агроэкологическая группировка почв (Кирюшин, 2005)

Для каждой подвыборки измеряемых характеристик почв из общей структуры данных проведен тест Андерсона-Дарлинга и Шапиро-Уилка для проверки нормальности распределения с заданными $\alpha=0.05$. В пробах почв определяли ряд ключевых показателей состояния органического вещества: содержание бихромат-окисляемой фракции путем мокрого озоления пробы в присутствии $K_2Cr_2O_7: H_2SO_4$ (1:1) в соответствии с методом Тюрина в модификации Симакова с нагреванием в сушильном шкафу при температуре 150° . Выход легкой фракции $LF < 1.6$ г/см³ определяли с использованием протокола (Golchin, 1994). Таким образом, почва, просеянная через сито диаметром < 2 мм была разделена на лёгкую ($LF < 1.6$ г/см³) и тяжёлую ($HF > 1.6$ г/см³) фракции только по плотности с использованием раствора йодистого калия при плотности 1,60 г/см³. Содержание фракции Permanganate oxidizable carbon (POXC) определяли на основании известного протокола (Weil, 2003).

При оценке меры сопряженности почвенных свойств к снижению содержания $C_{орг}$ использовался подход, предложенный в работе (Kuzuyakov, 2020), в ряду зональных почв свойственных каждому рассматриваемому участку для слоя 0-25 см оценивались отношения трендов изменчивости почвенных параметров к уменьшению содержания $C_{орг}$. В основе оценки лежит допущение о том, что если свойство меняется пропорционально уменьшению $C_{орг}$ (линия тренда 1:1), то механизм его трансформации напрямую сопряжен с уровнем содержания в почве $C_{орг}$. Если изменения происходят быстрее, чем снижается

уровень $C_{\text{орг}}$, то механизмы трансформации напрямую связаны с уровнем содержания $C_{\text{орг}}$, если медленнее, то характерно наличие иного механизма его изменения, не связанного с содержанием органического вещества.

В основе оценки насыщения органического вещества фракции HF (Heavy fraction) 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. Форма модели – логистическая кривая. Для учета асимптоты насыщения, оценку качества производили с учетом R^2 , RMSE. Общая форма логистической функции была задана формулой:

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

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

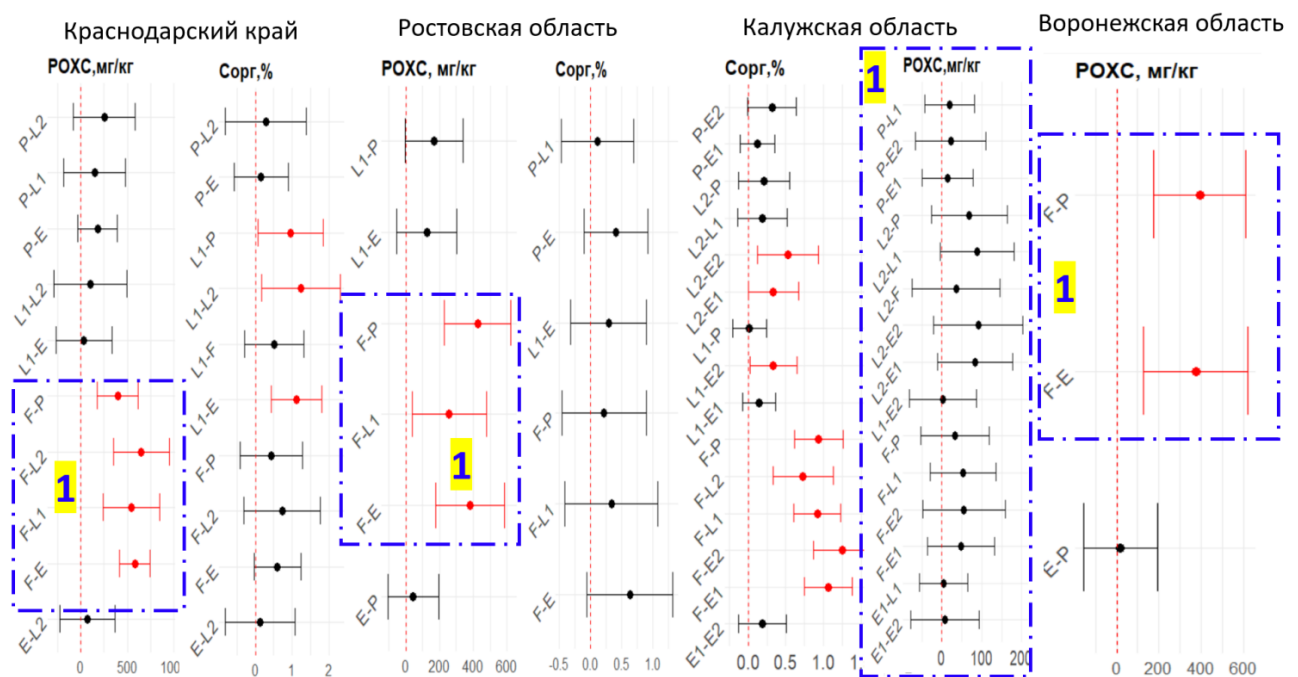
x_i – Значение независимой переменной

x_0 – параметр сдвига по аргументу функции

Глава 3. Результаты и обсуждение

3.1 Особенности накопления органического вещества в агроландшафтах с учетом провинциальных особенностей

Анализ полученных данных показал, что наиболее чувствительна к типу землепользования лёгкая денситометрическая фракция $LF < 1,6 \text{ г/см}^3$, доля которой в пахотных горизонтах уменьшается в 2–4 раза по сравнению с ее содержанием в гумусовых горизонтах аналогичных условно-референтных почв. Органическое вещество тяжёлой фракции $HF > 1,6 \text{ г/см}^3$ более устойчиво, однако при проявлении эрозионных процессов содержание углерода в $HF > 1,6 \text{ г/см}^3$ снижается на 20–30 %. Во всех исследованных провинциях для агроландшафтов было характерно более узкое отношение C:N как в LF, так и в HF. Пространственная изменчивость показателей дифференцируется на двух уровнях: – межпровинциальном (с учетом особенностей почвообразования), внутрипровинциальном – тренды по агроэкологической стратификации рядов почв, объединённых по агроэкологическим группам (Кирюшин, 2005).



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

Рис. 3 Оценка достоверности различий средних с использованием критерия Тьюки

В условиях Среднерусской широколиственно-лесной провинции в пахотных серых лесных почвах (Калужская область, почвенный округ Л1 III) содержание $C_{орг}$ в среднем составляет 0,9–2,1%, что на 10–60 % ниже относительно почв в условно-референтном состоянии (2,8–3,6%). Углерод фракции POXC демонстрирует низкую чувствительность к агроэкологическим условиям за счет высокой пространственной изменчивости ($V > 70\%$), но более чувствителен к типу землепользования на почвах чернозёмного типа $\alpha = 0,05$ (рис. 3).

Величина POXC в почвах агроландшафтов варьирует в пределах 97–754 мг/кг, на фоновых участках 144–822 мг/кг. Максимальное среднее содержание отмечается для серых лесных грунтово-глеевых (L2) 463 мг/кг, минимальное в серых лесных среднесмытых (E2) 372 мг/кг. В условиях агроландшафтов среднее содержание POXC в почвах разных агроэкологических группах не характеризуется достоверными различиями при заданном уровне $\alpha = 0,05$. Для $C_{орг}$ при среднем содержании 1,91 % максимум характерен для подгруппы необрабатываемых серых лесных почв, где $C_{орг}$ соответствует 2,31 %, для серых лесных почв плакорной группы агроландшафтов содержание $C_{орг}$ в среднем соответствует 1,87%; в слабо и среднеэрозионных группах 1,74 и 1,55 %, для серых лесных поверхностно-глееватых почв 2,01%.

Во фракции $LF < 1,6 \text{ г/см}^3$, максимальная доля C_{LF} характерна для серых лесных среднесмытых при среднем содержании C_{LF} 37,3% и вариации в пределах 33–41 %, минимальное содержание C_{LF} и наибольшая вариация характерны для

серых лесных поверхностно-глееватых (C_{LF} в среднем 26,8 %, при вариации 20–38 %). Соотношение $C:N_{LF}$ было наиболее широким в пробах серых лесных грунтово-глеевых почв среднеполугидроморфной агроэкологической группы (в среднем 24,5, при вариации 18,9–30,4), тогда как в автоморфных условиях, отношения $C:N_{LF}$ принимали значения преимущественно 11–20. Общий выход $LF < 1,6$ г/см³ для почв агроландшафтов относительно однороден 0,10–0,35 % минимум характерен для эрозионной группы. Для фоновых серых лесных почв доля $LF < 1,6$ г/см³ в среднем соответствовала 0,44 %, что в 2 раза превышает средний выход $LF < 1,6$ г/см³ в агроландшафтах. Содержание C_{HF} максимально в подгруппе серых лесных грунтово-глеевых 1,50–1,90%, $C:N_{HF}$, аналогично, шире в данной подгруппе, тогда как в автоморфных условиях $C:N_{HF}$ принимает значения 7,0–8,0.

В условиях Среднерусской лесостепной провинции в чернозёмах типичных и выщелоченных (Воронежская область почвенный округ М1 V) среднее содержание $C_{орг}$ в пахотных горизонтах соответствует 6,10% при вариации 3,2–7,7 %. Мезорельеф определяет неоднородность почвенных свойств. На склонах $>2-3^\circ$ (особенно южной экспозиции) содержание $C_{орг}$ в среднем ниже и соответствует 4,64%, выражено проявление водной эрозии. На водоразделах содержание $C_{орг}$ соответствует 7,0–7,5%. Величина РОХС в пахотном горизонте варьирует в пределах 554–1256 мг/кг. По результатам сравнения среднего содержания РОХС по агроэкологическим группам (рис.3) установлено, что фракция чувствительна к типу землепользования. Во фракции $LF < 1,6$ г/см³ максимальное содержание углерода C_{LF} характерно для необрабатываемых черноземов 35,2 %, для черноземов плакорной группы C_{LF} в среднем соответствовал 27,3 %, для эрозионной 28,0%. Для $HF > 1,6$ г/см³ максимальный C_{HF} отмечался в пробах необрабатываемых черноземов 6,35 %, содержание N_{HF} , для плакорной и эрозионной группы агроландшафтов сопоставимы (в среднем 0,42–0,46%).

В условиях Предкавказской провинции в черноземах на исследуемых участках в Краснодарском крае, Ростовской области и Республике Кабардино-Балкария среднее содержание $C_{орг}$ в верхнем слое 0–25 см пахотных почв снижалось по сравнению с фоновыми-референтными участками на 25–40%. В Ростовской области содержание $C_{орг}$ варьирует в пределах 1,9–3,5% при среднем 2,6%, тогда как на фоновых необрабатываемых участках средняя величина $C_{орг}$ соответствует 3,4%. Особенно сильно снижается содержание $C_{орг}$ на эрозионных участках, где почвенный покров представлен слабо и среднесмытыми чернозёмами обыкновенными. Содержание РОХС в пахотных черноземах также существенно снижалось относительно необрабатываемых (фоновых) почв. На

исследуемом участке в Ростовской области диапазон вариации РОХС в агроландшафтах соответствовал 349–848 мг/кг, (необрабатываемые участки 842–1006 мг/кг). Максимальное среднее содержание РОХС соответствует 925 мг/кг и отмечается на фоновых-референтных участках, в то время как минимальное в обыкновенных черноземах плакорной агроэкологической группы – 476 мг/кг.

В Краснодарском крае для почв исследуемых участков, самые низкие значения РОХС на уровне 500 мг/кг отмечаются в лугово-чернозёмных почвах, тогда как в плакорных типичных и выщелоченных черноземах содержание РОХС в среднем соответствует 796 мг/кг. В пределах Предкавказской провинции выход $LF < 1.6$ г/см³ на фоновых участках составляет 0,4–0,8% от массы почвы, тогда как на участках пашни снижается до 0,1–0,3%. Максимальное сокращение наблюдается на эродированных склонах до 0,1%, плакорах 0,12–0,26%.

Для черноземов обыкновенных участка, локализованного в Ростовской области, наблюдалась тенденция, где на эродированных склонах отношение $C:N_{LF}$ было минимальным (в среднем 9,6), тогда как на фоновых участках достигало максимальных значений (15–18). В целом, для агроландшафтов характерно повышение доли стабильного органического вещества C_{HF} относительно C_{LF} , но общее его количество заметно уменьшается.

Для фракции $LF < 1.6$ г/см³ диапазон значений $C:N$ варьирует значительно шире, относительно вариации в $HF > 1.6$ г/см³, что отражает высокую чувствительность к землепользованию и эрозии. На участке в Республике Кабардино-Балкария отношение $C:N_{LF}$ снижается до 6,8 в чернозёмах плакорной группы, что указывает на высокий потенциал минерализации, в смытых черноземах отношение $C:N_{LF}$ соответствует величинам 13,7–17,1.

3.2 Трансформация химических свойств почв в агроландшафтах

Помимо количественного распределения фракций ПОВ, важным аспектом является степень сопряженности свойств почвы к направленности деградационных изменений (Кузюаков, 2015). Сопоставив изменения ряда показателей с линейным трендом снижения содержания $C_{орг}$, проведена оценка степени сопряженности относительно тренда снижения содержания $C_{орг}$. Результаты обобщены на рисунке 4. Черная линия соответствует тренду 1:1 (т.е. скорости уменьшения параметра равны скорости снижения $C_{орг}$).

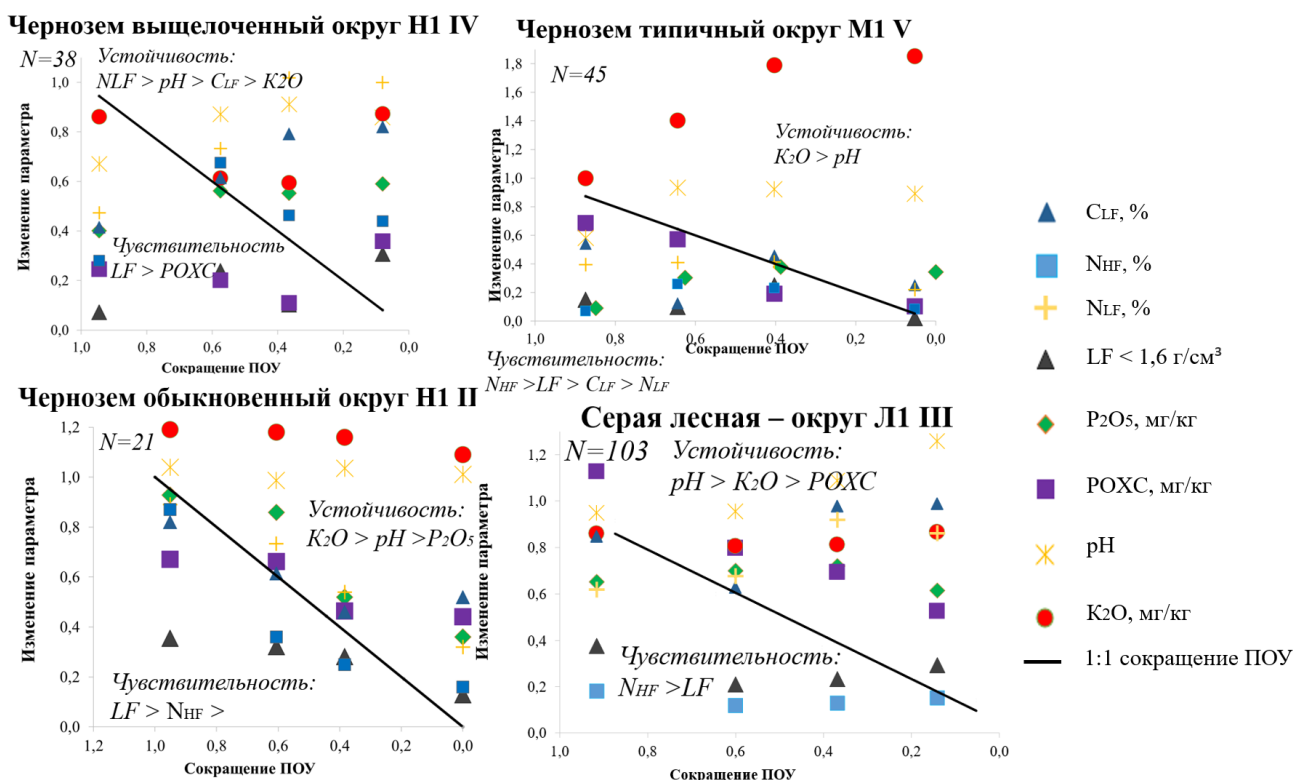


Рис. 4 Экспериментальная оценка чувствительности и почвенных параметров к деградации на основе сравнения с изменениями содержания $C_{орг}$

Установлено, что доля легкой фракции $LF < 1.6$ г/см³ характеризуется как наиболее сильный маркер, отражающий трансформацию свойств ПОВ при формировании агроландшафтов. При уменьшении $C_{орг}$ доля $LF < 1.6$ г/см³ по отношению фоновым-референтным почвам снижается гораздо сильнее вне зависимости от привязки к почвенной провинции. Аналогично, снижение содержания азота в тяжелой фракции N_{HF} протекает быстрее снижения уровня $C_{орг}$, содержание N_{HF} снижается непропорционально быстро относительно линейного тренда сокращения $C_{орг}$. Содержание перманганат-окисляемого углерода $POXC$ и углерода легкой фракции C_{LF} также уменьшается несколько быстрее $C_{орг}$, однако отмечается некоторая дифференциация по исследуемым участкам. Показатель pH и содержание подвижных форм P_2O_5 и K_2O являются устойчивыми маркерами.

3.3 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 в черноземах более чувствительна к типу землепользования. Для исследуемых участков на почвах черноземного типа содержание $POXC$ 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.

Для фракции $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$ 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. Особого внимания заслуживают отношения $C:N_{HF}$, представляющие собой маркеры качества структурного органического вещества. В агроландшафтах эти значения становятся уже, в частности в эрозионных группах, что указывает на относительный дефицит азота во фракции $HF > 1.6 \text{ г/см}^3$.

Таблица 1. Характеристика фракций ПОВ

Краснодарский край								
Агроэкологическая группа	LF,%	C _{LF}	N _{LF}	C:N _{LF}	C:N _{HF}	N _{HF}	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								
Слабоэрозионные	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

Продолжение Таблицы – 1

	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 среднее квадратическое отклонение

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 РОХС 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.

3.4 Провинциальные особенности насыщения почв углеродом

Исходно проверялось положение о том, что зависимость C_{HF} от $LF < 1.6$ г/см³ 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 $CLF \rightarrow CHF$ во времени. 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. При этом оценка параметра K_i рассматривается как модельно-зависимая и потенциально чувствительная к структуре выборки и диапазону предикторов. Устойчивость оценки асимптоты K_i и производных пороговых значений проверялась методом повторной выборки с возвращением (bootstrap, $B=1000$) и анализом чувствительности с исключением по одному наблюдению. Доверительные интервалы для K_i рассчитывались по перцентильному методу (2,5-й и 97,5-й перцентили распределения бутстреп-оценок). Логистические кривые зависимости $LF < 1.6$ г/см³ — C_{HF} при фиксированных значениях других переменных на уровне медианы представлены на рисунке 5.

Переменная - x_i	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
pH, ед.pH	*	*	-0,52	*
N_{LF} , мг/мг	0,54	*	*	*
$C_{HF} K-80\%$	3,21	1,37	2,48	6,87

* Не включен в итоговую модель

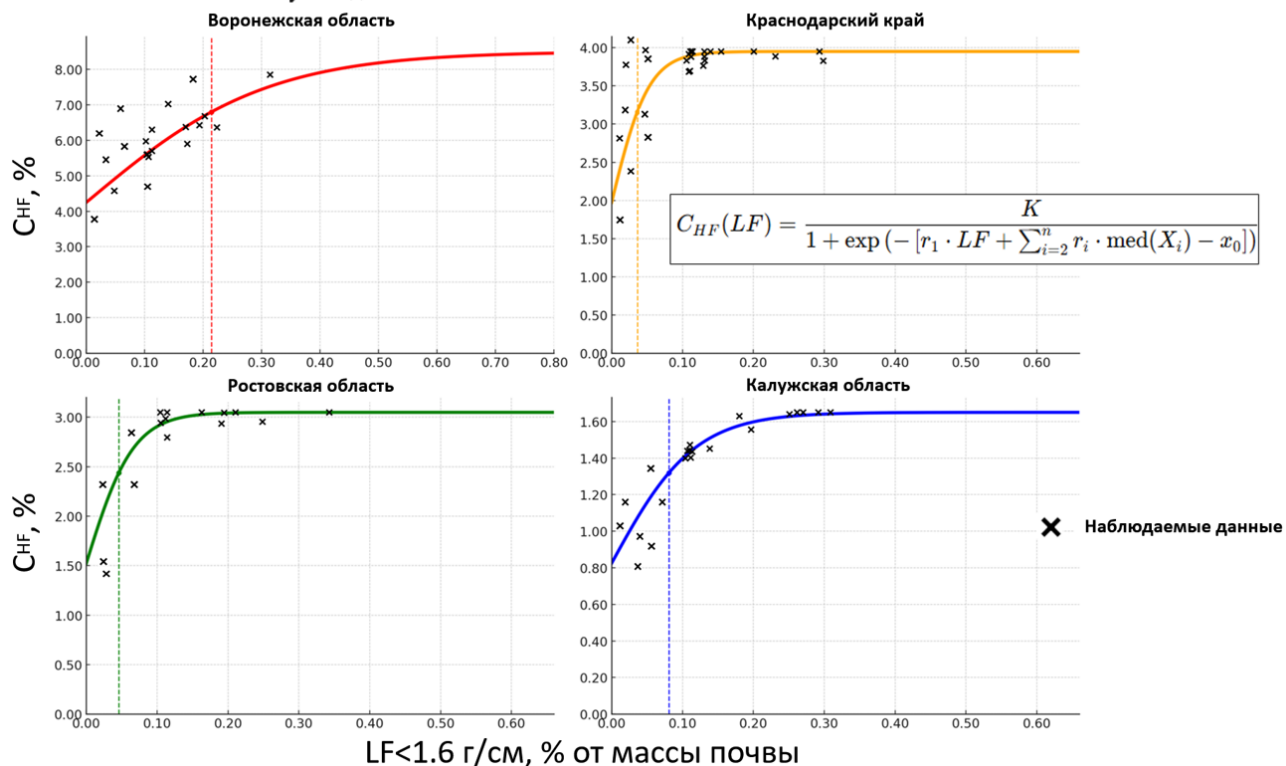


Рис.5 Визуализация порога насыщения 80% C_{HF} от доли LF при фиксации многомерной регрессии с учетом медиан значимых переменных x_i

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 0,10–0,15%, после чего наблюдается замедление прироста C_{HF} и приближение к плато. Модель продемонстрировала умеренную устойчивость оценки Ki при объёме выборки $n=21$.

Чернозёмы Воронежской области характеризуются наибольшими наблюдаемыми значениями C_{HF} в пределах анализируемой совокупности данных. Максимальные значения C_{HF} превышают 7,0% при выходе $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$ в диапазоне 0,2–0,4%. Для описания вариации C_{HF} оптимальная многомерная модель включала РОХС, $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$ и плотность почвы (ρ , г/см^3) ($R^2 = 0,68$; $n = 20$). 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%). 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 $LF < 1.6$ г/см³ 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.

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, $LF < 1.6$ г/см³, N_{HF} , N_{LF} и плотность почвы (ρ) ($R^2 = 0,75$; $n = 24$). Наблюдается группа точек с относительно высоким содержанием C_{HF} (4,0–4,2%), значения которых сопоставимы с оценкой Ki , уже при $LF < 1,6$ г/см³ 0,05–0,10. 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%). 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.

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%).

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:

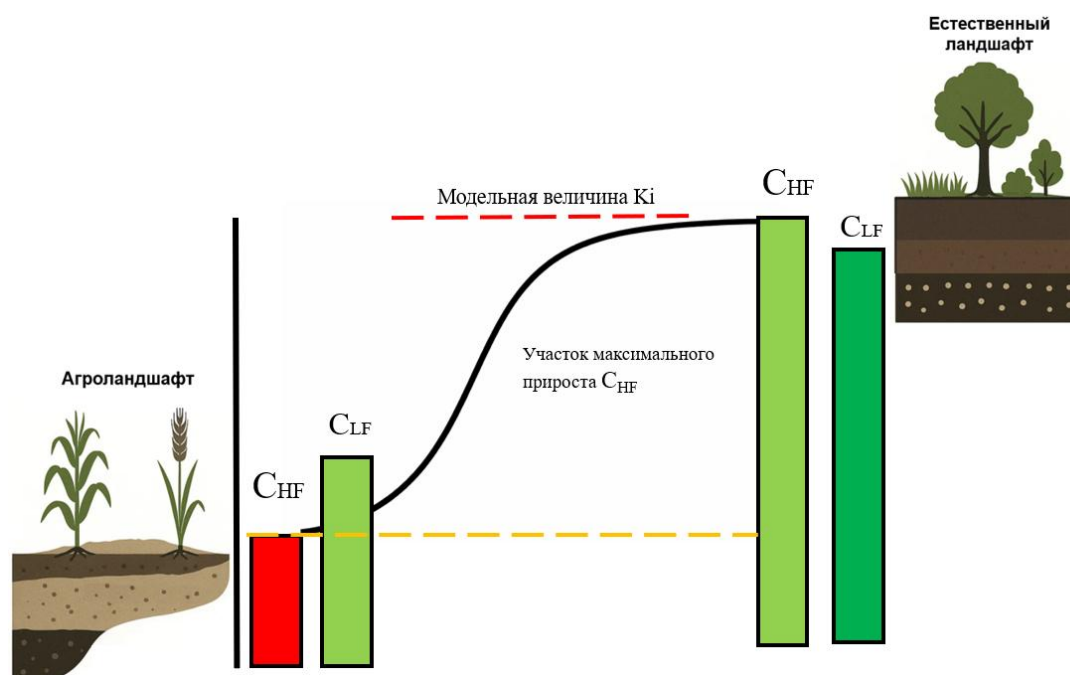


Рис. 6 Схематическая иллюстрация положения наблюдаемых значений C_{HF} в агроландшафтах и естественных ландшафтах относительно модельной асимптоты K_i логистической зависимости C_{HF} от $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$

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 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.

Заключение

В ходе проведенных научных исследований была проведена оценка провинциальных особенностей состояния почвенного органического вещества в агроландшафтах европейской части России. Были 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 $C_{орг}$ уменьшается на 15–30 %, на полугидроморфных участках отмечаются более широкие диапазоны отношений C:N во фракциях $LF < 1.6 \text{ г/см}^3$ и $HF > 1.6 \text{ г/см}^3$, и более высокие уровни содержания $C_{орг}$ 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 более выраженному 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 $C_{орг}$ 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 фракции РОХС при оценке разницы средних с использованием критерия Тьюки демонстрирует статистически достоверные различия ($\alpha = 0,05$) между фоновыми условно-референтными почвами и почвами агроландшафтов для всех участков с почвами черноземного типа. Для серых лесных почв содержание РОХС как в условно-референтных участках, так и в почвах агроландшафтов в среднем на 40–80% ниже, чем в черноземах, при этом статистически достоверных различий между вариантами землепользования не выявлено. На почвах черноземного типа фракция РОХС характеризуется высокой чувствительностью к типу землепользования и низкой к агроэкологическим факторам, таким как эрозия и повышенное увлажнение.

5. Для исследуемых почв с учётом провинциальных особенностей получены различающиеся модельные оценки асимптотического уровня C_{HF} (параметр K_i) логистической зависимости от $LF < 1.6$ г/см³. 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 $LF < 1.6$ г/см³. В рамках логистической модели значения $LF < 1.6$ г/см³, 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 $LF < 1.6$ г/см³, при котором предельный прирост C_{HF} по $LF < 1.6$ г/см³ (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 отношении C:N в $HF > 1.6$ г/см³ с заданным $\alpha = 0.05$. Содержание $C_{орг}$ увеличивается на 10–20% относительно зональных серых лесных почв, отношение C:N в $HF > 1.6$ г/см³ становится шире и происходит сдвиг в среднем с 10–15 до 25–30. Оценивая полугидроморфные почвы других

исследуемых участков статистически достоверных различий по содержанию $C_{орг}$ и отношению C:N во фракции HF > 1.6 г/см³ 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 деградации ПОВ при распахке 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 ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

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

2. Прохоров А. А., Борисов Б. А., Ефимов О. Е., Прокофьева К.Д., Кащенко Г.А. Оценка продуктивности плакорной агроэкологической группы земель на примере Краснодарского края // Агрохимический вестник. – 2024. – № 4. – С. 39–44. – DOI: 10.24412/1029-2551-2024-4-008.

3. 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.

4. 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.

5. Прохоров А. А., Лосев А. И., Борисов Б. А., Ефимов О. Е. Оценка вариации агрохимических свойств на примере серых лесных почв агроландшафтов Среднерусской широколиственно-лесной провинции // Агрохимический вестник. – 2025. – № 4. – С. 3–8. – DOI: 10.24412/1029-2551-2025-4-001.

Работы, опубликованные в изданиях, индексируемых в международных цитатно-аналитических базах данных:

1. 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.

Авторские свидетельства, патенты, базы данных:

1. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2023622816. Гумусовое состояние черноземов Предкавказской провинции: № 2023622612: заявл. 09.08.2023: опублик. 16.08.2023 / **А. А. Прохоров**; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева».

Публикации в других научных изданиях

1. **Прохоров А. А.** Характеристика методов выделения фракций почвенного органического вещества и их использование для оценки гумусового состояния почв // АгроЭкоИнфо. – 2022. – № 6(54)

2. **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.

3. **Прохоров А. А.** Провинциальные особенности накопления почвенного органического вещества в целинных и пахотных почвах зонального ряда европейской части России // Наука будущего - наука молодых : Сборник тезисов докладов участников 6 Международной научной конференции и 10 Всероссийского молодежного научного форума, Саратов, 23–26 сентября 2025 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью «Инконсалт К», 2025. – С. 185.

4. **Прохоров А. А.** Разработка модели индексной оценки свойств почв на примере агроландшафтов Северо-Предкавказской провинции // Сборник тезисов докладов участников V Международной научной конференции «Наука будущего» и VIII Всероссийского молодежного научного форума «Наука будущего - наука молодых», Орел, 20–23 сентября 2023 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью «Инконсалт К», 2023. – С. 145.

5. **Прохоров А. А.** Провинциальные особенности насыщения почв углеродом // Международная научная конференция молодых учёных и специалистов, посвящённая 160-летию Тимирязевской академии: Сборник статей, Москва, 02–04 июня 2025 года. – Москва: Российский государственный аграрный университет, 2025. – С. 476–478.

6. Горячев П. С., **Прохоров А. А.** Агрохимическая характеристика почв агроландшафтов Терского района Р. Кабардино-Балкария // Почвоведение: горизонты будущего: Сборник тезисов докладов Восьмой Всероссийской открытой конференции с международным участием, Москва, 16–20 сентября 2024 г. – Москва: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2024. – С. 120–121.

7. **Прохоров А. А.** Чувствительность и устойчивость маркеров качества почв к изменениям в землепользовании // Почвоведение: горизонты будущего: Сборник тезисов докладов Восьмой Всероссийской открытой конференции с

международным участием, Москва, 16–20 сентября 2024 года. – Москва: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2024. – С. 136–137.

8. **Прохоров А. А.**, Горячев П. С., Горячев К. С. Индексная оценка качества почв агроландшафтов зонального ряда // Сборник трудов научной конференции с международным участием IX Вильямсовские чтения, Москва, 27–28 ноября 2024 г. – Москва: Российский государственный аграрный университет, 2024. – С. 174–177.

9. **Прохоров А. А.** Использование индексов в агроэкологической оценке земель // Материалы Международной научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 150-летию со дня рождения А.Я. Миловича: Сборник статей, Москва, 03–05 июня 2024 г. – Москва: Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, 2024. – С. 440–445.

10. **Прохоров А. А.** Свойства пахотных горизонтов черноземов Предкавказской провинции и концептуальная модель индексной оценки // Международная научная конференция молодых учёных и специалистов, посвящённая 180-летию со дня рождения К.А. Тимирязева: Сборник статей, 05–07 июня 2023 г. – Москва: Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, 2023. – С. 420–423.

11. **Прохоров А. А.** Оценка трансформации свойств пахотных горизонтов типичных и обыкновенных черноземов Предкавказской провинции при формировании агроландшафтов // Экологическая безопасность в условиях антропогенной трансформации природной среды : Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых, посвященной памяти Н.Ф. Реймерса и Ф.Р. Штильмарка, 20–21 апреля 2023 г. – Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2023. – С. 586–588.

12. **Прохоров А. А.**, Агеев К. Д. Использование Google Earth Engine для оценки агроклиматического потенциала // Агрометеорология XXI века: материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 90-летию кафедры метеорологии и климатологии, Москва, 19 декабря 2023 года. «Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных», 2023. – С. 30–33.

13. **Прохоров А. А.**, Котюн Д. Н., Борисов Б. А., Ефимов О. Е. Оксикинетический метод и генетическая оценка почв // Почвенный покров – фундамент агротехнологий будущего: Сборник трудов Молодежной научной конференции VII Вильямсовские чтения, 01–15 декабря 2022 г. – Москва: Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, 2022. – С. 45–47.