

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Российский государственный аграрный университет –
МСХА имени К.А. Тимирязева»

На правах рукописи

Бородина Кира Сергеевна

**СОСТОЯНИЕ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА И СВОЙСТВА
ЧЕРНОЗЕМА ВЫЩЕЛОЧЕННОГО ТУЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ
ПРИ РАЗЛИЧНОМ ХАРАКТЕРЕ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ**

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. ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО ПОЧВ И ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ	10
1.1 Стабильные и лабильные органические вещества почв, их состав и свойства	10
1.2 Новые подходы к изучению лабильного органического вещества и состояния органического вещества почв	13
1.3 Секвестрация углерода почвой.....	18
1.4 Индекс SOC/CLAY	23
1.5 Оценка характера землепользования на основе индекса SOC/CLAY .	27
1.6 Исследования залежных земель	28
ГЛАВА 2. ХАРАКТЕРИСТИКА УСЛОВИЙ ПОЧВООБРАЗОВАНИЯ И ПОЧВЫ ПЛАВСКОГО РАЙОНА ТУЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ	35
2.1 Характеристика климата района исследований как фактора почвообразования.....	35
2.2 Характеристика рельефа и почвообразующих пород территории	40
2.3 Характеристика растительного покрова.....	41
2.4 Характеристика почв и почвенного покрова Тульской области.....	41
ГЛАВА 3. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	46
3.1 Схема проведенного исследования	46
3.2 Характеристика объекта исследования	49
3.3 Лабораторные методы исследования.....	61
ГЛАВА 4. СОСТОЯНИЕ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ПОЧВ В ЧЕРНОЗЕМЕ ВЫЩЕЛОЧЕННОМ ПРИ РАЗНОМ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИИ	62
4.1 Динамика содержания гумуса	62

4.2 Лабильное органическое вещество	65
4.3 Элементный состав ЛОВ	68
4.4 Перманганат-окисляемый углерод.....	75
4.5 Сравнительная характеристика содержания углерода разных форм органического вещества	81
ГЛАВА 5. СТРУКТУРНОЕ СОСТОЯНИЕ ЧЕРНОЗЕМА ВЫЩЕЛОЧЕННОГО ПРИ РАЗНОМ ХАРАКТЕРЕ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ	85
5.1 Агрегатный анализ по методу Н.И. Саввинова	85
5.2 Микроагрегатный анализ методом Н.А. Качинского.....	95
5.3 Анализ структурного состояния и секвестрационного потенциала на основе индексного показателя по соотношению SOC/CLAY	103
5.4 Оценка плотности, плотности твердой фазы и общей пористости ...	107
ГЛАВА 6. АГРОХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ.....	110
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	131
ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВУ.....	134
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	135
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	136
ПРИЛОЖЕНИЕ А	156
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	157
ПРИЛОЖЕНИЕ В	165

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы

В настоящее время, в России, в соответствии с «Государственной программой эффективного вовлечения в оборот земель сельскохозяйственного назначения и развития мелиоративного комплекса Российской Федерации» поставлена задача возврата залежных земель в пашню. Поскольку в составе залежных земель значительную долю занимают маргинальные земли, одним из важных вопросов, возникающих в процессе вовлечения постагrogenных земель в сельскохозяйственный оборот, является оценка их уровня плодородия. Многие исследователи отмечают нецелесообразность возврата залежей в пашню без предварительного анализа состояния почв и растительности, поскольку это может привести к возобновлению различных процессов деградации почв (Каштанов, Сизов, 2008; Хитров и др., 2008; Черкасов, Масютенко, 2008; Зыбалов и др., 2020; Екимовская и др., 2023 и др.). Важнейшим показателем почвенного плодородия является состояние системы органических веществ почвы, которая оказывает влияние почти на агрономически значимые свойства почв. Кроме того, исследование динамики органического углерода в почве в условиях возврата залежных земель в пашню имеет большое значение в связи с глобальной повесткой баланса углерода и изменения климата. В период с 1990 по 2005 гг. в почвах России за счет залежных земель накоплены запасы органического углерода порядка 252 ± 32 Мт для площади 14,80 млн. га, что представляет собой колоссальный долговременный резерв (Курганова, Лопес де Гереню, 2009).

Степень разработанности темы. Исследования органического вещества почв имеют долгую историю, усилиями зарубежных и отечественных ученых накоплен огромный материал по этой проблеме, в том числе во многих работах изучались изменения содержания и состава органического вещества почв в результате сельскохозяйственного использования (Тюрин, 1937; Waksman, 1938; Вильямс, 1950; Дюшофур Ф., 1970; Schnitzer, Khan, 1978; Орлов и др., 1996; Семенов, Когут, 2015, Артемьева и др., 2023 и др.). С 1990-х годов проведено

большое число исследований, посвященных изучению сукцессионных процессов на бывших пахотных участках, многие из которых отмечают тенденции к восстановлению состояния органического вещества под залежами. В относительно недавних работах по изучению залежных земель часто сравнивают текущее состояние почв, находящихся в залежном состоянии в течение разного времени. Современный этап активного возвращения залежных земель в пашню позволяет провести наблюдения по изменению состояния почв на таких участках непосредственно с момента их введения в оборот. При этом, как отмечают многие исследователи (Ганжара и др., 1993; Борисов, Ганжара, 2006; Tan et al., 2007; Борисов, 2008, Culman et al., 2013) лабильная часть органического вещества почвы наиболее чувствительна к изменениям характера землепользования. В зарубежной литературе все больше работ посвящены активному углероду, определяемому на основе метода перманганатного окисления органического вещества (Tripolskaja et al., 2024).

Цель и задачи исследования. Цель работы — дать оценку состояния органического вещества и свойств чернозема выщелоченного Тульской области при разном характере землепользования.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. дать морфолого-генетическую характеристику чернозема выщелоченного на исследуемых участках и подтвердить сопоставимость почвенных объектов с различным характером землепользования;
2. оценить содержание гумуса и лабильных форм органического вещества в верхней части гумусового горизонта чернозема выщелоченного при различных вариантах землепользования;
3. установить особенности изменения легкой фракции легкоразлагаемого органического вещества, ее элементного состава и перманганат-окисляемого углерода в зависимости от характера землепользования и продолжительности использования распаханной залежи;

4. сравнить информативность различных показателей органического вещества почвы и выявить наиболее чувствительные индикаторы трансформации чернозема выщелоченного при изменении характера землепользования;

5. дать комплексную оценку структурного и агрофизического состояния чернозема выщелоченного на основе агрегатного, микроагрегатного анализа, плотности сложения, плотности твердой фазы и общей пористости;

6. оценить применимость индексного показателя SOC/CLAY для характеристики структурного состояния и секвестрационного потенциала чернозема выщелоченного в условиях лесостепной зоны;

7. выявить направленность изменений органического вещества, структурного состояния и агрохимических свойств чернозема выщелоченного в течение трехлетнего периода после распашки залежного участка.

Научная новизна.

Впервые получено, что в условиях лесостепной зоны, в черноземе выщелоченном при возврате в пашню за 3-х летний период количество легкоразлагаемого органического вещества (легкой фракции) достоверно снижается. Содержание перманганат-окисляемого органического вещества при разном характере землепользования характеризовалось близкими величинами, и, таким образом, оказалось в данных условиях нечувствительным к изменению землепользования.

Показана динамика изменения основных показателей плодородия чернозема выщелоченного среднегумусного среднемощного тяжелосуглинистого на лессовидных тяжелых суглинках в течение 3-х лет, причем для залежного участка с первого года введения в оборот.

Теоретическая и практическая значимость. Теоретическая значимость работы заключается в том, что показано в динамике изменение свойств залежного выщелоченного чернозема в течение 3-х лет с момента возврата в пашню.

В практическом отношении исследование состояния органического вещества и показателей плодородия позволит оценивать целесообразность и очередность возвращения залежных участков в сельскохозяйственный оборот.

Полученные данные углубляют и раскрывают представления об особенностях изменения наиболее значимых свойствах черноземов выщелоченных под влиянием различного землепользования, и могут быть использованы при составлении прогностических моделей и преподавании дисциплин «Агрономического почвоведения» в учебных заведениях.

Методология и методы исследований. Основная методологическая концепция в работе базируется на изучении органического углерода почв на основе комплексного подхода, включающего количественную и качественную оценку содержания, состава и динамики органического вещества в почве с учётом природных и антропогенных факторов. В работе использован ряд классических методов, принятых в почвоведении. Характеристики почв определялись общепринятыми лабораторными методами. Часть работы выполнена на основе полевых описаний почвенных разрезов на территории пахотных угодий Тульского НИИСХ с целью выявления трансформации морфологических признаков, свойств органического вещества и некоторых показателей плодородия чернозема выщелоченного в меняющихся условиях агроландшафта Плавского района Тульской области. Основная часть работы посвящена углероду органического вещества почв в стабильной и лабильной его формах. Данные были проанализированы с использованием дисперсионного анализа и попарно оценивались различия между выборками с использованием критерия НСР(LSD) при уровне значимости 0,05. Статистическая обработка данных проводилась с использованием программ MS EXCEL 365 и STATISTICA.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Различия в характере землепользования чернозема выщелоченного (пашня, распаханная залежи, пашня после многолетних трав, целина) достоверно проявлялись в содержании лабильных форм органического вещества (легкой фракции).
2. Показатель содержания перманганат-окисляемого органического вещества во всех исследованных почвах с различным характером использования

характеризовался высокими величинами и оказался в данных условиях нечувствительным к изменению характера землепользования.

3. Чернозем выщелоченный под залежью имел отличное структурное состояние. Через 3 года после распашки содержание агрономически ценных агрегатов снижалось на 10%. Возделывание многолетних трав способствовало восстановлению структурного состояния.

Степень достоверности и апробация работы. При выборе подходов, методов и технологии исследований был выполнен подробный обзор литературы по изучаемой проблеме позволивший учесть имеющийся российский и зарубежный опыт. Выборки проверялись на нормальность, результаты исследования попарно сравнивались на достоверность различий с использованием критерия НСР(LSD) при уровне значимости 0,05. Статистическая обработка данных проводилась с использованием программных средств Excel и Statistica.

Основные положения были доложены на Международной научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 135-летию со дня рождения А.Н. Костякова (Москва, 2022); Всероссийской молодежной научной конференции с международным участием VIII Вильямсовские чтения, посвящённой 160-летию выдающегося ученого, одного из основоположников агрономического почвоведения В.Р. Вильямса (Москва, 2023); Международной научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённая 180-летию со дня рождения К.А. Тимирязева (Москва, 2023); Международной научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 150-летию со дня рождения А.Я. Миловича (Москва, 2024); Всероссийской молодежной научной конференции с международным участием IX Вильямсовские чтения (Москва, 2024); VIII Всероссийской конференции молодых ученых с международным участием «Почвоведение: Горизонты будущего. 2024» (Москва, 2024); IX Всероссийской конференции молодых ученых с международным участием «Почвоведение: Горизонты будущего. 2025» (Москва, 2025).

Личный вклад автора. Автором самостоятельно проведена работа на всех этапах диссертационного исследования, начиная от полевого описания почв и ежегодного отбора образцов почв до проведения комплекса лабораторных исследований, обработки и систематизации полученных данных, написания статей и текста работы.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 работ, в том числе 1 – в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 1 – в изданиях, входящих в МБД.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа изложена на 182 страницах машинописного текста и состоит из введения, обзора литературы (глава 1), материалы и методы исследований (глава 2), экспериментальной части (главы 3-6), заключения, списка литературы и 3 приложений. Диссертация иллюстрирована 20 таблицами и 37 рисунками. Библиографический список включает 158 литературных источников, в том числе 54 иностранных.

ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ. ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО ПОЧВ И ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ

Проблема органического вещества почв, которой посвящена данная работа, является весьма комплексной и изучается весьма длительное время. По этой причине необходимо посвятить базовую часть изучения органического вещества, на которой строятся многие работы современных авторов и область, связанную непосредственно с выбранной темой, по которой имеется ряд современных публикаций.

Изучение гумусовых веществ было начато задолго до того, как почвоведение сформировалось в качестве научной дисциплины. Появление работ В.В. Докучаева послужило началом для исследования гумуса с позиций генетического почвоведения. Изучению органического вещества почвы посвящены работы многих отечественных и зарубежных ученых — П.А. Костычева, В.Р. Вильямса, И.В. Тюрина, М.М. Кононовой, Л.Н. Александровой, В.В. Пономаревой, Д.С. Орлова, А.Д. Фокина, В.А. Черникова, С. Ваксмана, М. Шнитцера, В. Фляйга, Ф. Дюшофура, Р. Тейта и других. К настоящему времени накоплен огромный фактический материал, характеризующий состав и свойства органического вещества почвы, его роль в плодородии, однако, многие аспекты проблемы органического вещества почв требуют дальнейшего развития и углубления (Борисов, 2008).

1.1 Стабильные и лабильные органические вещества почв, их состав и свойства

Качественный состав органического вещества различных почв очень разнообразен, что связано с разным составом растительных и животных остатков, ежегодно поступающих в почву, с условиями их трансформации и взаимодействия с минеральной частью почв. По составу органические вещества почв можно разделить на 3 части (Борисов, 2008):

1) источники гумуса – свежие, неразложившиеся вещества растительного и животного происхождения, ежегодно поступающие в почву в виде наземного и корневого опада растений, остатков животного происхождения, в том числе микроорганизмов. Состоят из веществ неспецифической природы (белки, углеводы, лигнин и др.);

2) детрит — промежуточные продукты разложения и гумификации источников гумуса, не связанные с минеральной частью почвы. Содержат неспецифические вещества и новообразованные гумусовые вещества;

3) гумусовые вещества специфической природы: гуминовые кислоты, фульвокислоты, гумин, связанные с различной степенью прочности с минеральной частью почвы.

Состав источников гумуса определяется видом растительных и животных остатков; состав детрита — видом растительных и животных остатков и условиями их разложения и гумификации; состав гумусовых веществ — условиями гумификации и взаимодействия с минеральной частью почв.

Понятием «гумус» объединяются разнокачественные вещества, полностью утратившие черты анатомического строения организмов. Основную массу гумуса составляют гумусовые вещества, некоторая его часть (единицы и десятки процентов) представлена гумифицированным детритом и неспецифическими веществами. Разнокачественность включаемых в гумус веществ создает трудности в интерпретации ряда свойств и функций гумуса. Группа гумусовых веществ специфической природы (консервативных соединений) объединяет те компоненты органического вещества почвы, которые определяют типовые показатели почв, формирующиеся в течение длительного времени и сохраняющиеся в вековых циклах. Прежде всего, это зрелые гумусовые кислоты почвы, гуматы кальция, другие органо-минеральные вещества, гиматомелановые кислоты, гумин. Они существуют в почвах сотни и тысячи лет, слабо вовлекаются в минерализацию и обуславливают устойчивые свойства почвы, присущие ей типовые признаки.

Д.С. Орлов (Орлов, 1990) отмечал, что в результате работ И.В. Тюрина и его последователей стало возможным использование показателей группового и

фракционного состава гумуса в качестве наиболее обобщающих характеристик органического вещества почв на типовом и подтиповом уровне. Однако на более низких таксономических уровнях эти показатели не всегда удастся использовать, тем более для выявления конкретных изменений гумусового состояния почв при их сельскохозяйственном использовании.

Исходя из функциональных свойств и способности к трансформации, вполне логично в одну группу объединить две первые части органического вещества почв — источники гумуса и детрит — под общим названием легкоразлагаемое (лабильное) органическое вещество. Термин "легкоразлагаемое органическое вещество" (синоним — легкая фракция) встречался в классических работах И.В. Тюрина, М.М. Кононовой, Л.Н. Александровой (Борисов, 2008).

По данным зарубежных источников органическое вещество почвы (SOM — soil organic mater) является ключевым компонентом здоровых и функционирующих почв, поскольку оно связывает физические, химические и биологические свойства почвы и процессы в единую живую матрицу. Почвенный углерод (C) является основным компонентом органического вещества (~50%; Pribyl, 2010), и поэтому почвенный органический углерод (SOC — soil organic carbon) стал основной или даже универсальной валютой здоровья почвы. Количество SOC в каждой почве отражает чистый эффект поступления (т.е. поступление C растительного происхождения) минус выход (т.е. выделение CO₂), опосредованный взаимодействием микробных и минеральных комплексов (Cotrufo et al., 2013). Коммерческие лаборатории по оценке почвы обычно измеряют общий пул SOM, что делает его одним из наиболее важных показателей общего состояния почвы (Gregorich et al., 1994; Wander and Drinkwater, 2000; Blanco-Canqui and Benjamin, 2015; Byrnes et al., 2018; Олдфилд и др., 2019). Но SOM часто медленно реагирует или даже нечувствителен к новым методам управления почвой и растениеводством, и, таким образом, может потребоваться несколько лет, чтобы обнаружить изменения (Drinkwater et al., 1998, Robertson et al., 2000; Haynes, 2005; Culman et al., 2013). Кроме того, на общий объем SOM сильно влияет содержание глины (Schimel et al., 1994; Six et al., 2002) и минеральный состав почвы (Rasmussen

et al., 2018), что означает, что тип почвы может оказывать большее влияние на общий объем SOM, чем характер землепользования. Активный или биологически-активный пул SOM невелик, но чрезвычайно важен, поскольку он отражает относительно недавнее поступление углерода, а также размер и состав микробного сообщества (Wander 2004; McDaniel et al., 2014). Таким образом, биологически активный С более чувствителен к современным методам управления, чем общий SOM, и был определен как показатель, учитывающий динамику содержания С в почве. Такая кратковременная реакция сделала биологически активный С важным ранним индикатором потенциального накопления SOC и для оценки общего биологического состояния почвы.

1.2 Новые подходы к изучению лабильного органического вещества и состояния органического вещества почв

В зарубежной литературе все чаще встречаются работы по оценке лабильного органического вещества через так называемый перманганат-окисляемый углерод (РОХС). Перманганат-окисляемый углерод (РОХС; т.е. активный С) — это относительно новый метод, который позволяет быстро и недорого определить количество лабильного углерода в почве. Несмотря на ограниченные сообщения о положительных корреляциях с содержанием органических частиц углерода (РОС), микробной биомассы (МВС) и другими почвенными фракциями, содержащими углерод, мало что известно о том, какие почвенные фракции наиболее точно отражает РОХС. В работе Кульмана с соавторами (Culman et al., 2012) измерили РОХС в широком диапазоне почв, экосистем и географических районов (12 исследований, всего 53 объекта, $n = 1379$), чтобы: определить взаимосвязь между РОХС и РОС, МВС и фракции органического углерода в почве (SOC) и относительную чувствительность РОХС как показателя лабильного содержания углерода в почве в широком диапазоне условий окружающей среды и использования. Окисляемый перманганатом С был значительно связан с РОС, МВС и SOC, и эти взаимосвязи были наиболее сильными, когда данные анализировались в отдельных исследованиях. Окисляемый перманганатом С был более тесно связан

с фракциями РОС меньшего размера (53–250 мкм), чем с более крупными фракциями РОС (250–2000 мкм) и более тесно связаны с более тяжелыми ($>1,7$ г/см³), чем с более легкой фракцией РОС, это отражает относительно переработанный пул лабильного почвенного углерода. По сравнению с РОС, МВС или SOC, РОХС продемонстрировал большую чувствительность к изменениям в использовании земель или колебаниям окружающей среды в 42% значимых экспериментальных факторов. Проведенный анализ в статье (Culman et al., 2012) демонстрирует полезность РОХС для быстрой и недорогой оценки изменений в фонде лабильного углерода в почве.

Перманганат-окисляемый углерод является умеренно стабильным, вероятно, представляет пул углерода, связанного с минеральной частью почвы, который предположительно представляет собой микробные метаболиты, что делает его ранним индикатором потенциального накопления в почве органического углерода. Кроме того, РОХС быстро и недорого поддается количественному определению, связан с показателями микробной активности, чувствителен к изменениям в почве и управлении растениеводством и способен отражать продуктивность агроэкосистемы. Таким образом он может выступать в качестве надежного показателя состояния почвы, содержащего биологически активный С (Culman et al., 2021).

Впервые для характеристики лабильных фракций органического углерода (SOC) Loginow et al. (1987) предложили метод мокрого окисления SOC для количественного анализа перманганат-окисляемого углерода (РОХС). Эта реакция с перманганатом калия (KMnO_4) имитирует окислительную активность микробных ферментов. В своем первоначальном исследовании авторы использовали три разные концентрации раствора перманганата (33, 167 и 333 мМ) и встряхивали почву в течение одного часа, чтобы разделить SOC на четыре группы. Позже Lefroy et al. (1993) воспроизвели этот метод и обнаружили, что полученные фракции чувствительны к изменениям в землепользовании. Эффективность метода для определения воздействия землепользования была подтверждена в последующих исследованиях для различных типов почв (Moody et al., 1997; Bell et al., 1998).

Поскольку относительное снижение РОХС из-за изменений в землепользовании в каждой фракции было одинаковым, Blair et al. (1995) рекомендовали использовать одну концентрацию (333 мМ), что способствовало широкому распространению этого метода. Позднее Weil et al. (2003) провели исследование для оптимизации различных параметров процедуры, включая концентрацию перманганата, объем раствора, время встряхивания и отстаивания, а также длину волны поглощения. В результате был создан новый протокол, подходящий как для лабораторных, так и для полевых условий, который отличался практичностью, воспроизводимостью, чувствительностью к изменениям в землепользовании и корреляцией с другими показателями состояния почвы.

Метод, предложенный Weil et al. (2003), включает взаимодействие образца почвы с 20 ммоль/л раствором KMnO_4 , который встряхивают в течение 2 минут. После этого образец выдерживают в темноте в течение 10 минут, затем разбавляют и измеряют поглощение света при длине волны 550 нм. Оптическая плотность позволяет оценить количество перманганат-ионов, оставшихся в растворе, что, в свою очередь, служит для определения содержания РОХС в образце. Этот метод значительно сокращает время анализа по сравнению с часовым процессом, описанным в работе Blair et al. (1995). Концентрация 20 ммоль/л выбрана для обеспечения достаточного количества перманганата, что предотвращает его полное расходование во время реакции, при этом раствор остаётся достаточно разбавленным для использования в полевых условиях с помощью спектрофотометров низкой точности. Однако выбор этой концентрации требует дополнительного анализа и уточнения, как указано в исследовании Edward et al. (2023).

Активный почвенный углерод (РОХС) является важным показателем состояния почвы и его можно определить с помощью метода перманганатного окисления (Gasch et al., 2020). Количество РОХС, которое обычно рассматривается как углерод в почве, оценивается по снижению концентрации MnO_4 в растворах (превращение Mn^{7+} в Mn^{4+} и/или Mn^{2+}), что позволяет использовать этот метод как косвенный индикатор лабильности органического углерода, качества почвы и

активности микробиологического разложения (Gruver, 2021; Wadea et al., 2020; Oliveira et al., 2022).

В последнее время данный метод стал более востребованным (Tang et al., 2018; Jones et al., 2023; Wadea et al., 2020; Oliveira et al., 2022) благодаря своей экономической эффективности, быстрому анализу, независимости от температуры предварительной сушки образцов (Gasch et al., 2020), отсутствию требований к плотности образцов (Hurisso, Culman, Zhao, 2018) и высокой надежности благодаря стандартизированным методикам.

Этот подход позволяет оценить активный пул органического углерода в почве, что важно для выявления ранних изменений в круговороте углерода (Blair et al., 1995). Результаты анализа коррелируют с широко используемыми показателями качества почвы (Fine et al., 2017; Sá et al., 2018) и помогают разрабатывать стратегии управления, направленные на увеличение или снижение содержания органического углерода в почве (Hurisso et al., 2016), а также на улучшение биологической активности почвы (Jones et al., 2023; Wadea et al., 2020; Oliveira et al., 2022; Liptzin et al., 2022).

В исследовании Tripolskaja et al. (2024) выявлено, что уровень РОХС в почве типа Arenosol варьируется в зависимости от землепользования. В верхнем слое почвы (0–15 см) концентрация РОХС колеблется от 219 до 432 мг/кг, а в слое 15–25 см — от 217 до 382 мг/кг (рис. 1). Почва на пастбищах (GR, UAL) и под лесными массивами (PA) содержит значительно больше РОХС по сравнению с пашней (CL) в обоих изученных слоях. Кроме того, исследование показало, что применение минеральных удобрений оказывает различное влияние на содержание РОХС в почве. На пашне (CL) внесение удобрений в верхний слой почвы не привело к изменениям, однако в более глубоких слоях наблюдалось увеличение концентрации РОХС ($p < 0,05$). На пастбищах (GR) минеральные удобрения способствовали значительному повышению содержания РОХС в верхнем слое почвы.

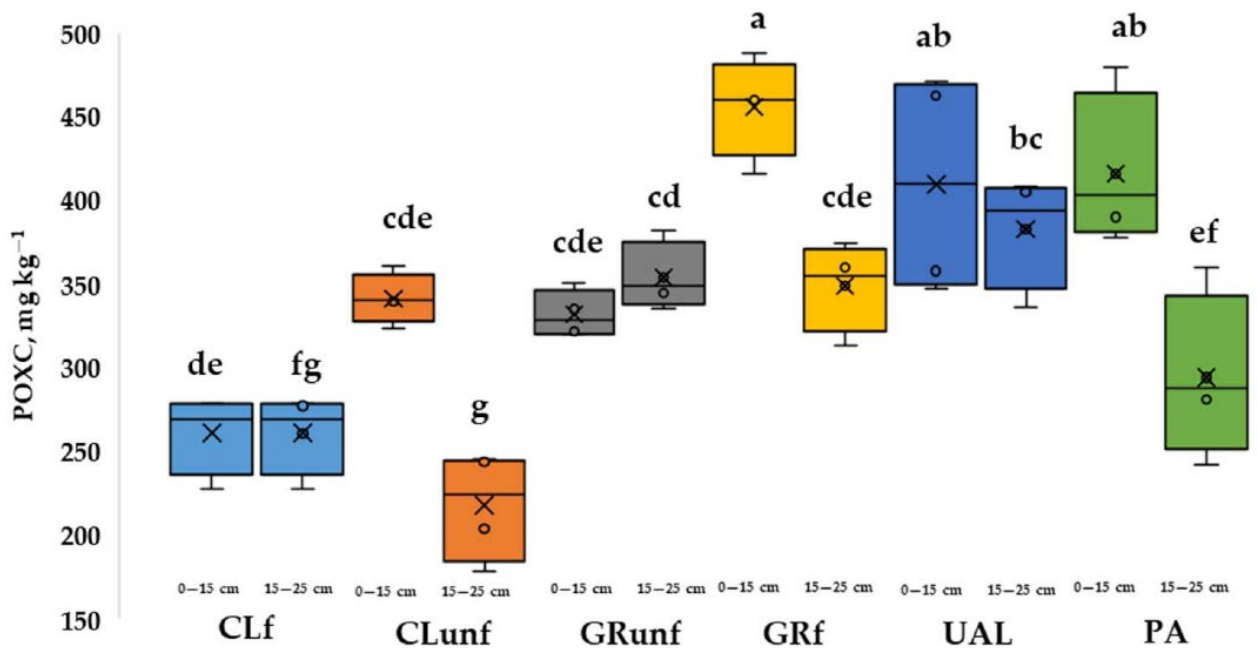


Рисунок 1 – Распределение активного углерода (POXC) в различных видах землепользования и слоях: CLf – возделывание сельскохозяйственных культур с удобрениями; CLunf – возделывание сельскохозяйственных культур без удобрений; GRunf – косимый луг без удобрений; GRf – косимый луг с удобрениями; UAL – необрабатываемая заброшенная земля; PA – бывший участок пашни, покрытый сосновым лесом. Буквами обозначены различия ($p < 0,05$) между вариантами землепользования в слоях 0–15 и 15–25 см. Отмечены стандартные ошибки. (Tripolskaja al., 2024).

Землепользование на пашне с применением удобрений (CLf) характеризовалось сходным распределением POXC в верхнем слое почвы. Значимые различия показателя POXC в слоях 0–15 и 15–25 см были обнаружены только между вариантами землепользования косимый луг с применением удобрений и почв под сосновым лесом (GRf и PA) и пашни без применения удобрений (CLunf).

Для данной работы является важным вопрос, какой уровень органического вещества является хорошим для землепользования и можно ли, быстро и точно определить качественное состояние органического вещества почвы через данный показатель. Такой вопрос задаётся и в иностранной литературе.

В работе (Prout и др., 2020) предлагается использовать индекс органического вещества почвы, основанный на соотношении органического углерода почвы (SOC) к глинистым частицам размером менее 0,002 мм (CLAY), определяемом пороговыми значениями соотношения SOC/CLAY для определенных уровней структурного качества почвы. На основе данных кадастра Англии и Уэльса, охватывающих 3809 участков под пахотными землями, лугопастбищными угодьями и лесными массивами показано, что землепользование, тип почвы, годовое количество осадков и pH почвы в совокупности объясняют 21% различий в соотношении SOC/CLAY в наборе данных, причем наиболее важной переменной является землепользование. Пороговые значения соотношения SOC/глины, равные 1/8, 1/10 и 1/13, указывают границы между “очень хорошим”, “удовлетворительным”, “умеренным” и “ухудшенным” уровнями структурного состояния. Индекс предоставляет метод оценки и мониторинг органического вещества почвы в национальном, региональном или субрегиональном масштабах на основе двух регулярно измеряемых свойств почвы.

Предполагается возможным использовать данный индекс и апробировать его для оценки выщелоченных черноземов лесостепной зоны на территории Плавского района Тульской области.

1.3 Секвестрация углерода почвой

В круговороте углерода почвы происходит ряд процессов, связанных как с аккумуляцией, так и с потерей углерода.

Важным при оценке потерь углерода почвы является процесс дегумусирования — это процесс уменьшения содержания органического вещества в почве, а также уменьшения мощности гумусового горизонта. Процесс дегумусирования включает в себя как биохимические, так и физические потери органического вещества почвы, при этом речь идет о всех частях органического вещества — лабильного и пассивного (гумус), который в свою очередь не поддается быстрому восполнению (Когут и др., 2021).

Биохимические потери — это минерализация органических соединений в верхнем слое почвы. Физические потери связаны с механическими воздействиями на почвенные структуры при антропогенном воздействии или эрозии, что приводит к уменьшению содержания и запасов почвенного органического вещества и гумуса (Когут и др., 2021).

Потери органического вещества при водной эрозии или дефляции на одних территориях, также будут приводить к отложению этих органических веществ на других территориях, и, как следствие, данные физические процессы тут будут рассматриваться с точки зрения накопления органического вещества (Когут и др., 2021).

Важно понимать, что этот процесс не синонимичен термину дегумификации, суть которой заключается в распаде гуминовых веществ (Когут и др., 2021).

В ходе физических процессов, таких как иссушение и циклов заморозания–оттаивания почв образуются трещины, по которым под воздействием природных и/или антропогенных факторов, происходит перенос почвенного материала в нижележащие слои, в том числе и перенос гумусовых веществ. Также потери могут быть связаны с физико-химическими процессами, изменения реакции среды почвенных растворов могут приводить к растворению ряда соединений и, как следствие, к выносу органических веществ.

Также, одним из механизмов обогащения нижних горизонтов почвы органическим углеродом и его депонирования является нисходящая миграция растворенных органических соединений, которая относится к основным причинам и механизмам потерь органического вещества при сельскохозяйственном использовании почв (Когут и др., 2021).

Сохранение гумуса, почвенная секвестрация и почвенное депонирование органического углерода характеризуются сходными процессами и эффектами, но отличаются по смысловому наполнению терминов.

Биотическое и абиотическое преобразование органических материалов в почвенное органическое вещество и гумус есть гумусообразование. При этом образование нового почвенного органического вещества может происходить как

при дегумусировании, так и при гумусонакоплении или вообще не сопровождаться накоплением общего органического вещества в почве, при условии равновесного состояния потерь и накопления его.

Гумусонакопление — преобладания гумусообразования над дегумусированием или увеличение запасов почвенного органического вещества и гумуса в почве.

Сохранение гумуса — длительное поддержание содержания и запасов органического вещества и гумуса в почве на стационарном уровне при условиях уравниваемости гумусообразования и дегумусирования (Когут и др., 2021).

Среди глобальных процессов накопления органических веществ в почве особое внимание следует уделить секвестрации углерода. Этот процесс представляет собой перевод атмосферного углекислого газа в живое органическое вещество в ходе фотосинтеза, после чего мёртвая биомасса трансформируется в гумус. Время полной минерализации компонентов гумуса составляет от 10 до 100 лет. Органическое вещество считается секвестрированным в том случае, если оно не только поступает в почву, но и стабилизируется в ней, становясь устойчивым к быстрому разложению, и при этом способно к медленной минерализации.

Для оценки секвестрации углерода в почве наиболее часто используются методы определения изменений в содержании общего органического углерода или его запасов в слое почвы на глубине 0–20 (0–50, 100) сантиметров за определённый период, а также анализ содержания органического углерода в гранулометрических фракциях пыли и ила.

Долгосрочное накопление органического углерода в почве в виде гумуса, полное разложение которого занимает более 100 лет, а также захоронение неживого органического вещества на глубине до 50 (100) сантиметров, являются ключевыми аспектами почвенной секвестрации. В России Почвенным институтом им. В.В. Докучаева на типичном черноземе с бессменным чистым паром (Петринский опорный пункт) в 1964 году был заложен один из первых опытов по мониторингу состояния углерода в почве. В 1998 году этот опыт модифицирован:

30% участка отведены под залежь. По данным исследования равновесное состояние углерода установилось в течение 25 лет (рис. 2).

Важно подметить, что опыт был заложен на старопахотном черноземе, последняя обработка произведена около 200 лет назад и как следствие он уже имел некоторую выпаханность. В течение первых 14 лет чернозем потерял почти 31 т/га гумуса, ежегодная убыль была около 2,2 т/га. Для сравнения в режиме бессменного черного пара за 15 лет пребывания из верхнего слоя 0–30 см целинного типичного чернозема расположенного в Центрально–Черноземном государственном биосферном заповеднике им. В.В. Алехина, Курской области минерализовалось 33 т/га гумуса (Когут и др., 2021).

При такой выпаханности, поступление свежих растительных остатков активизирует работу микроорганизмов, которые, в свою очередь, начинают использовать в качестве основного источника питания инертный гумус, вызывая его минерализацию. С течением времени количество поступающей естественной растительности значительно возрастает: одна существенная ее часть минерализуется, а другая незначительная часть через ряд промежуточных процессов стабилизируется и переходит в гумус.

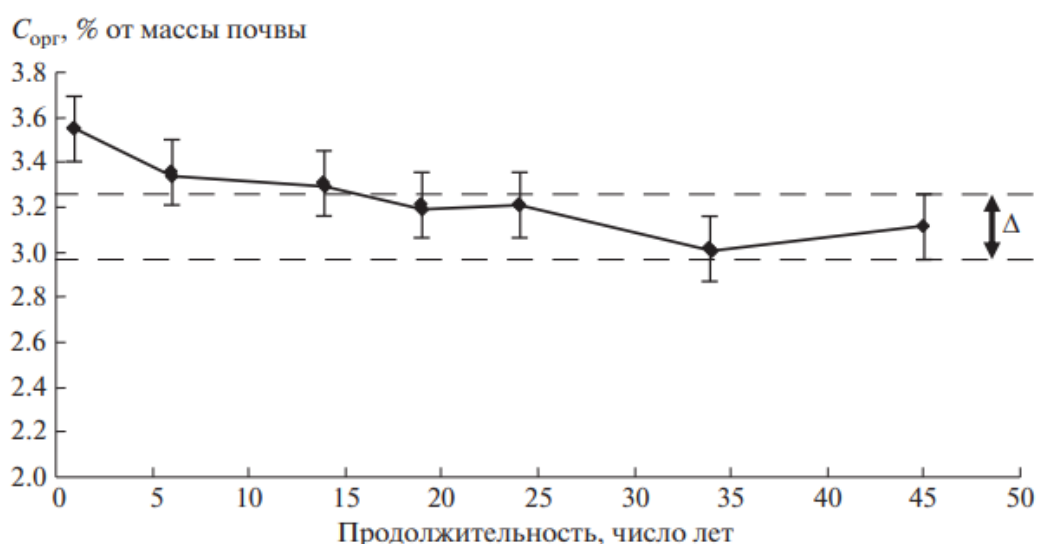


Рисунок 2 – Дегумусирование старопахотного типичного чернозема под бессменным чистым паром: Δ – максимальный размах многолетних изменений содержания $C_{\text{орг}}$ в пахотном слое 0–25 см после установления в почве квазиравновесного состояния (Когут и др., 2021).

Динамика процессов накопления и потери общего углерода почвой показана на схеме (рис. 3).

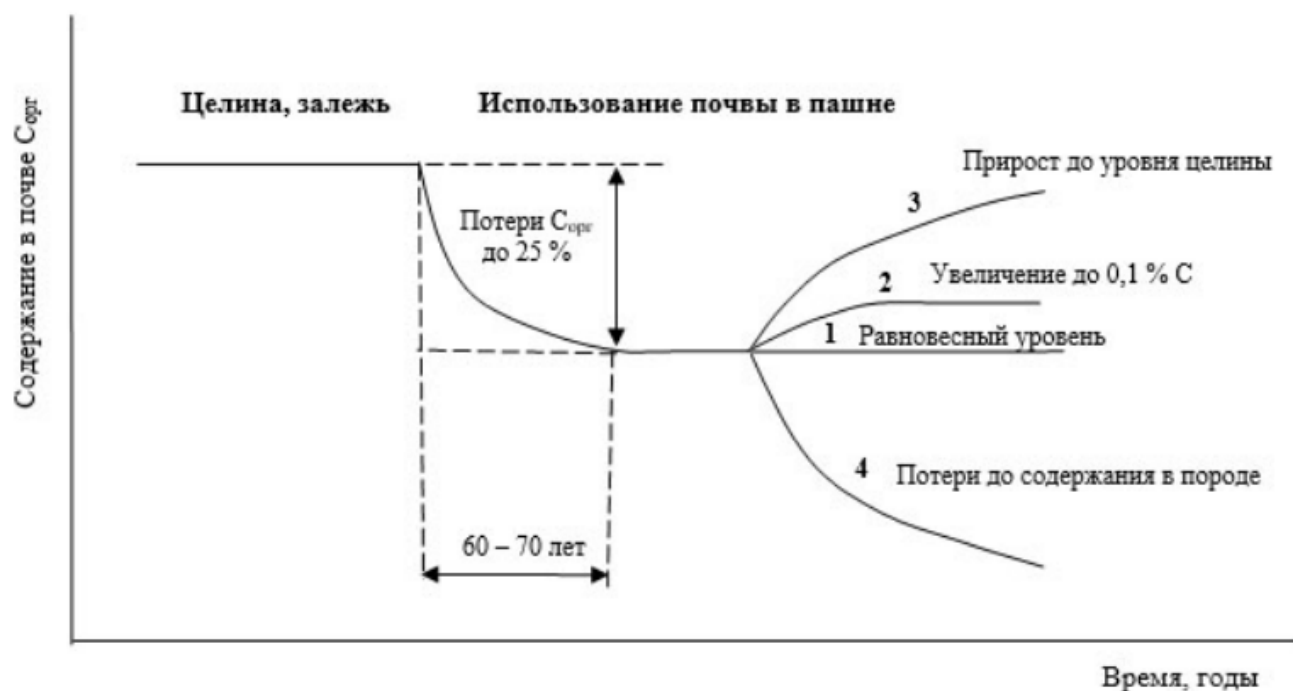


Рисунок 3 – Обобщенная схема основных изменений содержания органического вещества в пахотном слое в процессе освоения и использования черноземов. Цифрами обозначены вектора динамики изменения содержания органического углерода: 1 – при использовании почвы в пашне более 60–70 лет без значительного проявления эрозии; 2 – при применении минеральных удобрений и (или) минимизации обработки почвы; 3 – при переводе почвы в залежь; 4 – при прогрессирующей эрозии (Шарков, Антипина, 2022).

При сельскохозяйственном использовании земель повышение содержание органического углерода ограничено и в первую очередь обусловлено экономической эффективностью производства. Однако, одним из самых эффективных способов увеличения общего органического углерода почвы по-прежнему считается внесение органических удобрений.

Практический опыт длительных полевых исследований показывает эффективность таких агроприемов. По данным установлено, что в 30-ти летний

период ежегодное внесение 11 т/га навоза могут обеспечить по сравнению с контрольными вариантами повышение содержания органического углерода на 0,24%, на черноземах это значение достигает 0,5%. (Шарков, Антипина, 2022).

1.4 Индекс SOC/CLAY

На протяжении многих лет известно о значительном влиянии органических веществ на физические свойства почв. Изменяются такие характеристики как плотность почв, агрегатное состояние, устойчивость педов к разрушению в воде. Устанавливается прямая зависимость. Повышение содержания органического вещества способствует «улучшению» физических свойств почвы. (North, 1976; Lal R. et al., 2012)

Анализ базы данных RMQS показал, что для пахотного верхнего слоя почвы, удельный объем ($1/D$) как функция SOC и ила можно записать в виде уравнения:

$$1/D = a + b(C_{\text{орг}}) + c(\text{ил}). \quad (1)$$

Стоит обратить внимание, что в уравнении 1 используется $1/D$, а не D , так все используемые переменные взяты на одинаковой основе (на единицу массы сухой почвы). Значения коэффициентов уравнения (1) приведены в таблице 1, где можно увидеть, что для пахотных почв, имеющих сравнительно небольшие содержания органического углерода, $1/D$ достоверно коррелирует с содержанием органического углерода, но не с содержанием глины. В отличие, от пастбищных почв, которые имеют относительно большое содержание органического углерода, $1/D$ значимо коррелирует с содержанием глины, но не с содержанием органического углерода. Таким образом, в обоих случаях удельный объем зависит от наименьшего параметра.

Таблица 1 – Коэффициенты для расчёта $1/D$

Наименование	a	b	c
Пашня	0,7	0,1	–
Луг	0,6	–	0,1

Для согласования противоречивых данных в таблице 1 авторами предлагается концепция комплексного органического углерода (COC — complexed organic carbon). Согласно этой концепции, 1 грамм органического углерода связан с n граммами глинистого материала. Это иллюстрируется на рисунке 4, где на 4А (верхняя часть) видно, что в пахотных горизонтах почвы увеличение уровня органического углерода приводит к последовательному повышению уровня СОС, что представлено в виде СОС 1, СОС 2 и СОС 3. На рисунке 4В (нижняя часть) показывается ситуация в верхнем слое почвы на пастбищах, где увеличение доли глины приводит к соответствующему увеличению СОС, что выражено в виде СОС4, СОС5 и СОС6. (Dexter et al., 2008).

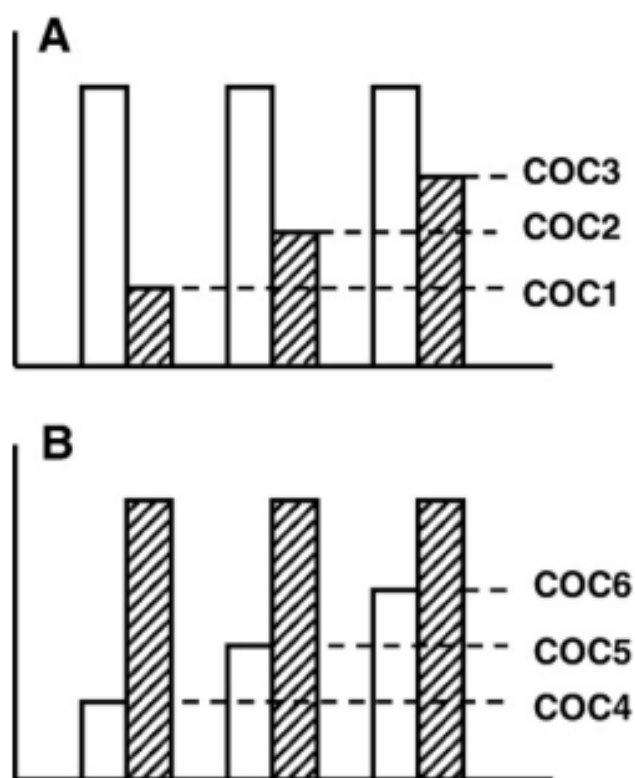


Рисунок 4 – Концепция комплексного органического вещества (COC).

Содержание глины (clay/n) показано столбиками без штриховки, а содержание органического углерода – заштрихованными столбиками. Ситуации, для которых $(\text{clay}/n) < \text{OC}$ показаны (вверху), где видно, что в этих случаях СОС пропорционален содержанию ОС. Ситуации, для которых (clay/n) значение СОС указано в таблице В (внизу), где видно, что в этих случаях значение СОС пропорционально содержанию глины (Dexter et al., 2008)

Авторы рассчитали значение n , определив коэффициент корреляции r между $1/D$ и COC . Этот коэффициент изменяется в зависимости от значения n . Данные для анализа были взяты из базы данных POLHYDRO. На рисунке 5 видно, что коэффициент корреляции достигает максимального значения при $n = 10$.

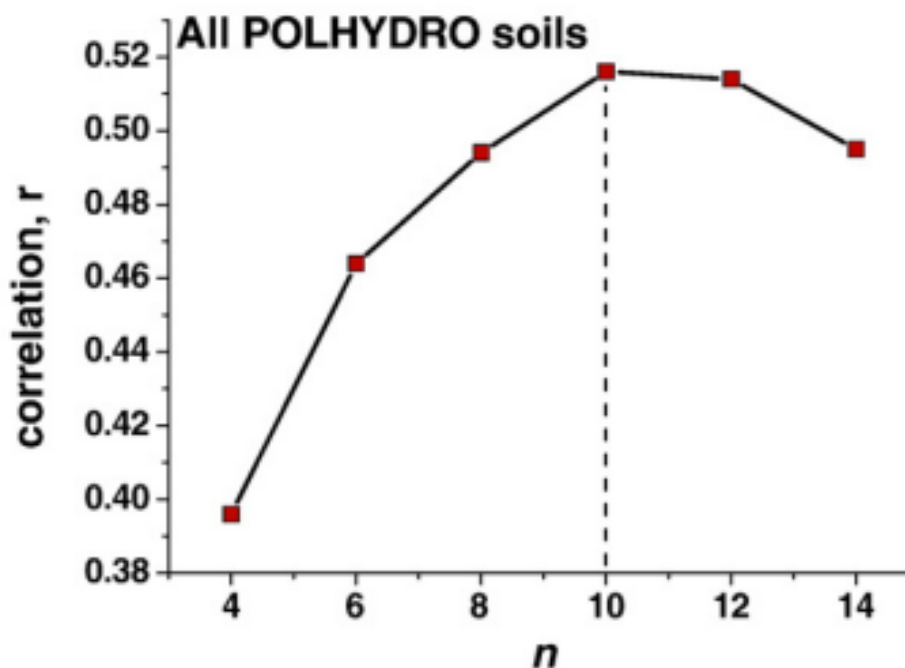


Рисунок 5 – Рассчитанные значения коэффициента корреляции r между $1/D$ и COC с разными n для пахотных почв Польши (Dexter et al., 2008)

Использование база данных POLHYDRO обусловлено наличием в ней более непрерывного распространения значения, тогда как данные RMQS и SOLHYDRO имеют тенденцию отражать либо небольшое содержание органического углерода (пахотный верхний слой почвы и все недра) или большое содержание органического углерода (почвы пастбищ). Тем не менее, данные RMQS дают максимальную корреляцию при $n = 11$, а данные SOLHYDRO дают максимум при $n = 8$. Для упрощения и последовательности действий используется значение n равное 10. Стоит отметить, что n положительное, натуральное число. И использование такого значения достаточно достоверно для большинства практических целей.

Если принять соотношение масс органического вещества (материала)/ органического углерода = 1,724, то найдем, что 1 грамм органического вещества почвы может связываться с 5,8 граммами глины. Следовательно, предполагая, что плотность органического вещества равна 1 Мг/м^3 и что плотность обычного глинистого минерала (иллит) равна $2,75 \text{ Мг/м}^3$, можно установить, что единица объема органического вещества участвует в комплексообразовании примерно с 2 единицами объема глины.

Для восприятия, предполагается, что в почве объемное соотношение 2:1. В наборы данных добавлена новая функция для удержания влаги в пахотных почвах. Регулируемые параметры в этой модели соответствуют пористости матрицы и структурной пористости. Показано, что комплексное органическое вещество коррелирует с пористостью матрицы, но не со структурной пористостью. Некомплексованное органическое вещество не коррелирует существенно ни с матрицей, ни со структурной пористостью, поскольку не имеет комплексов с органическим веществом (при оптимальном значении n равным 10) (Dexter et al., 2008).

Анализ способности почв образовывать комплексы с органическим веществом позволяет оценить их способность удерживать дополнительный органический углерод в стабильной форме. Однако это требует дальнейшей экспериментальной проверки (Dexter et al., 2008).

Содержание комплексного органического углерода в почвах, определенное простым алгоритмическим методом, лучше коррелирует с физическими свойствами почвы, такими как масса единицы объема, структурного состояния почвы, способностью удержания влаги и содержание легкодиспергируемой глины, чем общее количество углерода. Поэтому, для прогнозирования физических свойств почв, авторами рекомендуется оценивать комплексный органический углерод (Dexter et al., 2008).

1.5 Оценка характера землепользования на основе индекса SOC/CLAY

По данным North (1976), на примере пахотных почв Англии и Уэльса, полученные ориентировочные диапазоны содержания органического углерода в почве (SOC), в разных условиях и при различных типах управления. Исследования показали, что содержание глины, количество осадков, и глубина обработки почвы могут объяснить 25% вариации содержания органического углерода.

Почвы с наибольшим содержанием физической глины и во влажных условиях имеют более высокие значения, чем более легкие почвы с менее влажными условиями, при этом почвы под пастбищами имели более высокие значения чем пахотные при остальных равных условиях. Содержание глинистых частиц является ключевым фактором в виду его влияния на стабильность почвенного органического углерода, включая почвенные агрегаты и адсорбцию на поверхности минеральных частиц почвы (North, 1976).

Исследования, проведенные Dexter et al. (2008), показали, что физические свойства почв и их характеристики, такие как плотность, водоудерживающая способность и механический состав, могут быть более информативными при объяснении содержания органического углерода (SOC) и содержания глинистых частиц размером менее 0,002 мм в почве (CLAY), чем общее содержание этих компонентов. Авторы обнаружили, что соотношение SOC/CLAY в почве, равное 1/10, является хорошим индикатором состояния почвы и физических условий. Это соотношение также позволяет обобщенно разделять характер землепользования на виды.

Исследования в Дании и Англии так же подтверждают этот подход, в частности Йоханнес и др (Johannes et al., 2023), устанавливая пороговые значения индекса SOC/CLAY как индикатора различных уровней структурного состояния почвы, от "очень хорошего" до "плохого" (табл. 2). Результаты демонстрируют важность учета соотношения SOC/CLAY и его влияния на состояние почвы и управление землепользованием.

Таблица 2 – Пороговые значения коэффициента для различной характеристики структуры почвы (Johannes et al., 2023)

Значения SOC/CLAY	Характеристика структурного состояния почвы по CoreVESS	Предположительное землепользование
>0,125	Очень хорошее	Целина/залежь
0,125–0,1	Хорошее	Лес
0,1–0,077	Удовлетворительно	Пашня/пастбище
<0,077	Плохо	Пашня

Из работы «What is a good level of soil organic matter?» (Prout et al., 2021) известно, что среднее содержание органического углерода в почвах, увеличивается относительно вида земель, в следующем порядке пашни < пастбище < постоянные травы $\approx$ лесные почвы. Содержание глинистых частиц (меньше 0,002 мм) оставалось примерно одинаковым во всех вариантах землепользования, за исключением лесных участков, где оно было меньше. В данной работе рассматривался ряд разных типов почв. На большей части территории преобладали бурые почвы и поверхностно-глеевые почвы, но также встречались и другие типы почв. При этом отмечается, что пахотные участки были менее увлажнены по сравнению с участками при других типах землепользования.

Также, важно учесть, что у почв с более низким значением коэффициента, потенциал накопления углерода выше, так как есть свободная матрица для его накопления. В ряде работ (Körschens et al., 1998; Lozano-García et al., 2020; Prout et al., 2020, Prout et al., 2022) SOC/CLAY при значении 1/13 (0,077), обозначен как деградированная пашня, такой же уровень принят Европейской комиссией в законе о мониторинге углерода в почве (Rabot et al., 2024).

1.6 Исследования залежных земель

По оценкам учёных, в период с 1897–2007 гг. в России из сельскохозяйственного оборота выведено около 70 млн га угодий. Часть из

которых была выведена земли городского фонда, под объекты промышленности и инфраструктуры. Однако подавляющая часть неиспользуемых (брошенных) земель сельскохозяйственного назначения преобразовалась в залежные земли (залежи) — по разным данным от 30–45 до более 60 млн га. Главную роль на таких территориях стали занимать природные процессы, обуславливающие восстановление постагрогенных экосистем к естественным. Введу отсутствия официального учёта и мониторинга земель, в том числе возникших залежных земель, в кризисный период страны 90–х годов XX века сложно дать объективную оценку площади залежей и охарактеризовать их почвенно-агроэкологический потенциал. (Китов, Цапков, 2015; Куликова, Ефремова 2017; Нечаева, 2023)

Выведение из активного сельскохозяйственного использования некоторой площади земельных участков и переход их в залежное состояние связывают с разными причинами, как снижение плодородия почв и деградация земель; войны и различные кризисные ситуации; целенаправленный временный вывод для восстановления плодородия почв природными экосистемами (переложная система земледелия); использование земель сельхозугодий для строительства дорог, промышленных предприятий и жилищ, для создания рекреационных зон; целенаправленное восстановление природных экосистем на месте бывших сельхозугодий (Хитров и др., 2008; Люри и др., 2010; Сорокина и др., 2016).

Сукцессионные изменения на залежных землях является сложным процессом восстановления почв и растительности. При зарастании заброшенных сельхозугодий, особенно после долгого времени их использования, изменяются многие почвенные показатели, включая и состояние органического вещества почв, что отмечается в работах многих авторов (Романовская, 2006; Лопес де Гереню и др., 2009; Зинякова и др., 2013; Пуртова и др., 2019; Борисов и др., 2022).

В работе Д.И. Люри с соавторами (Люри и др., 2010), исследовались процессы восстановления природных экосистем на основе сравнения временных рядов почв залежей в различных природных зонах, сделан вывод, что «основное направление, принципиальный набор серийных стадий, примерную скорость постагрогенной сукцессии определяют зональная локализация и тип почв». Авторы

также отмечают, что восстановление естественной зональной растительности может быть изменено, заторможено или ускорено под воздействием других факторов, в первую очередь из-за наличия видов-блокираторов (борщевик Сосновского (*Heracleum sosnowskyi*), люпин многолистный (*Lupinus polyphyllus*) и др.) и/или особенностей местоположения и доступа к местам откуда могут быть принесены семена растений.

На протяжении многих лет исследований и наблюдений во многих работах, можно отметить, что многолетнее использование черноземов приводит к снижению запасов гумуса. В случае восстановления естественных условий должен наблюдаться процесс восстановления содержания гумуса и его запасов. Так в работе Ерёмина сделаны следующие выводы: «Использование чернозема выщелоченного в течение 25 лет под пашней привело к снижению гумуса в слое 0–22 см с 7,6% до 6,9–7% от массы почвы ($HCP_{0,5} = 0,3–0,4\%$). Перевод почвы на 5 лет в залежное состояние не восстановил данный показатель до первоначальных значений (1968 г.) В более глубоких слоях почвы процесс дегумификации продолжается вследствие дефицита растительных остатков. Восстановление содержания гумуса в пахотном слое чернозема выщелоченного, ухудшившегося за 25 лет пашни, происходит после 35 лет произрастания многолетней травянистой растительности. Однако до уровня целины (8,3–9,0%) данный показатель не поднялся — 7,5–8,0% от массы почвы. Скорость накопления гумуса в пахотном слое чернозема выщелоченного под действием многолетней травянистой растительности достигает 1,7–1,9 т/га в год без существенных изменений в течение 35 лет нахождения изучаемой почвы в залежном состоянии.» (Ерёмин, 2014).

В некоторых случаях рост содержания органического углерода отмечается довольно резко уже в первые 3 года залежного режима чернозема обыкновенного: «Благодаря бурному росту пионерных растений разница между пашней и участком молодой залежи на девятый месяц составляет 28% ($p < 0.05$) содержания органического углерода» (Казеев и др., 2020). Такой рост вероятно связан с поступлением большого объема ЛОВ.

В процессе постагрогенной эволюции изменяются и денситометрический фракционный состав органического вещества почв. В лесостепной зоне на черноземе под 60-летней залежью отмечается, что параметры близки к естественным условиям участка не подвергавшегося обработке. В зоне лесостепи постагрогенное восстановление содержания органического вещества и всех его фракций происходило значительно быстрее в черноземе, чем на темно-серой почве. Накопление углерода отмечается во всех денситометрических фракциях (Овсепян и др., 2020).

В условиях Ростовской области по данным авторов отмечается рост содержания органического вещества уже в первый год перехода в залежь на глубине 0–10 см, а на глубине 45–50 см через 1,5 года после окончания обработки (Трушков и др., 2019).

Также для определения динамики почвенного углерода в залежных землях при естественном зарастании пахотных почв на территории России за период с 1990 по 2002 г.г. использовалась методика математического моделирования (модель RothC) Общая площадь исследованных земель составляет 21,6 млн. га. Территория была разделена на 40 регионов, для которых определены усредненные базовые почвенные характеристики, количество поступающего в почвы органического вещества и климатические данные. Результаты показывают, что в среднем залежные земли потеряли 0,46 т углерода/га и общий баланс почвенного углерода за 13 лет составляет — 9,9 млн. т углерода (36,4 млн. т CO₂). По прогнозам в последующие годы ожидается увеличение скорости накопления углерода на данных землях. (Романовская, 2006)

В работе Кургановой и Лопес де Гереню дана общая оценка накопления запасов органического углерода, накопленных в почвах России за счет залежных земель в период с 1990–2005 гг. и составляет порядка 252±32 Мт для площади 14,8 млн. га, что представляет собой колоссальный долговременный резерв (Курганова, Лопес де Гереню, 2009).

Были и другие попытки оценки запасов органического вещества в залежных почвах, в том числе и с применением госстатистики. На серых лесных почвах

отмечается накопление за 15 лет в слое 0–15 см порядка 9,9 т/га, что соответствует 33% от общего его запаса в этом слое, а также отмечается высокая пространственная вариабельность накопления и содержания гумуса (Гиниятуллин и др., 2019).

Динамика и накопление органического углерода, особенно на длительных залежах более 100 лет связана с накоплением его в подстилке при формировании лесов на постагрогенных землях (Наквасина, Шумилова, 2021). На залежных землях в ходе постагрогенных сукцессий меняется видовой состав и структура фитоценоза (Миллер и др., 2017; Титлянова, Шибарева, 2022).

Помимо органического углерода на залежных землях ведется мониторинг и изучение агрохимического и фитосанитарного состояния. Так для схожей территории исследования, в условиях восточной части Орловской области, где имеют распространение черноземы выщелоченные и оподзолённые, проведено такое исследование на участках 20-летних залежей. В работе Амелина с соавторами: «Установлено, что за 20-летний период у выведенных из сельскохозяйственного оборота полей, содержание гумуса в почве снизилось в среднем на 0,9%, обменного калия — на 41,3, доступного фосфора — на 47,7%, а кислотность повысилась с 5,4 до 5,1 ед.» (Амелин и др., 2013).

Исследуются физические и физико-химические показатели постагрогенных почв Морковкин, Дёмина, 2011; Степанцова и др., 2014; Соколов, Соколова, 2020; Малышев, 2021; Телеснина, 2021; Попков, Сорокина, 2021а; и др.).

Доктрина продовольственной безопасности России выделяет стратегическим национальным приоритетом «...повышение качества жизни российских граждан путем гарантирования высоких стандартов жизнеобеспечения» (Доктрина продовольственной безопасности..., 2020). Ключевым в достижении поставленной цели является восстановление и повышение плодородия земель сельскохозяйственного назначения, предотвращение сокращения площадей земель сельскохозяйственного назначения, рациональное использование таких земель, защита и сохранение сельскохозяйственных угодий от водной и ветровой эрозии и опустынивания (Голубев и др., 2021).

Дискуссии по возврату залежных земель в сельскохозяйственный оборот достаточно давно идут в научных кругах, в том числе и в форме специализированных конференций (Агроэкологическое состояние и перспективы использования земель России..., 2008).

По анализу, проведенному в работе Нечаевой (Нечаева, 2023), отмечается, что «мониторинг почвенно-агроэкологического состояния постагрогенных экосистем в различных биоклиматических условиях позволяет рассматривать залежные земли России как стабилизирующий компонент агроландшафтов и резерв для повторного введения в активный сельхозоборот», согласно ряду работ (Куликова, Ефремова, 2017; Галеева, 2020; Иванов и др., 2020; Джабраилова, 2021; Курганова и др., 2021; Аксенова, Гиндемит, 2022; Бурдуковский, Перепелкина, 2022; Попков, Сорокина, 2023б; и др.). Ограничением возврата земель из залежного фонда в пашню может являться высокая степень распаханности территории, сильная дефляция почв, высокая крутизна склонов (более 7°), химическое загрязнение и прочее (Шпедт, Трубников, 2017; 2018)

Россия имеет огромные земельные ресурсы и занимает пятое место по площади пахотных угодий (Иванов, 2015). По данным Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии (далее — Росреестр) в докладе (Доклад ..., 2022), площадь земельного фонда страны на начало 2021 г. составила 1712,5 млн га, из которых сельскохозяйственных угодий — 197,8 млн га, в том числе: пашни — 116,2 млн га (58,7%); залежи — 4,4 млн га (2,2%) (Доклад..., 2022). Это огромные потенциальные ресурсы земель сельскохозяйственного назначения, возможность использования которого стала на повестку обеспечения продовольственной безопасности государства.

В настоящее время активно проводится возврат залежных земель в пашню. Каждый земельный участок или часть земельного участка, предполагаемые к возврату в оборот в соответствии с Постановлением Правительства РФ от 14 мая 2021 г. N 731 «О Государственной программе эффективного вовлечения в оборот земель сельскохозяйственного назначения и развития мелиоративного комплекса Российской Федерации» (с изменениями и дополнениями) и Постановления

Правительства РФ от 27 октября 2021 г. N 1832 «О внесении изменений в Государственную программу эффективного вовлечения в оборот земель сельскохозяйственного назначения и развития мелиоративного комплекса Российской Федерации», должны быть обеспечены материалами почвенного обследования, включающими отчет по почвенному обследованию, содержащий характеристику почв всего землепользования и рекомендации по их возможности возврата в сельскохозяйственный оборот. Многими учеными отмечается необходимость комплексного анализа состояния почвенного и растительного покрова и экономическая целесообразность возврата конкретного залежного участка, перед принятием решения о возврате его в пашню (Кирюшин, 2008; Каштанов, Сизов, 2008; Черкасов, Масютенко, 2008; Зыбалов и др., 2020), особенно с учетом того, что центры и станции Агрохимической службы России проводят обследование залежных земель лишь выборочно с периодичностью 15–20 лет (Сычёв и др., 2008).

ГЛАВА 2. ХАРАКТЕРИСТИКА УСЛОВИЙ ПОЧВООБРАЗОВАНИЯ И ПОЧВЫ ПЛАВСКОГО РАЙОНА ТУЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ

Исследования проводились на территории землепользования Тульского НИИСХ филиала ФИЦ «Немчиновка» в Плавском районе Тульской области. Участки расположены вблизи п. Молочные дворы в ~15 км от районного центра г. Плавска (рис. 6).



Рисунок 6 – Расположение объекта исследований на административной карте

2.1 Характеристика климата района исследований как фактора почвообразования

Климат района исследований можно охарактеризовать как умеренно континентальный. Зима здесь умеренно холодная, с частыми оттепелями, а лето тёплое. Среднегодовая температура составляет +5 °С с колебаниями в пределах

± 11 °C. В январе средняя температура опускается до -10 °C, а в июле поднимается до $+20$ °C. Период с положительными температурами длится 220–225 дней в году.

Климатические условия региона можно разделить на две зоны: северо-западную и юго-восточную. Северо-западная часть отличается более высокой влажностью, мягкой зимой и прохладным летом. В юго-восточной части наблюдается меньшая влажность, более жаркое лето и холодная зима. Годовое количество осадков варьируется от 600–650 мм на северо-западе до 450 мм на юго-востоке. Большая часть осадков (70%) выпадает в безморозный период, пик приходится на июль. К концу зимы снежный покров достигает толщины 0,3–0,7 м, а почва промерзает на глубину 0,6–0,9 м (Агроклиматический справочник..., 1966; Природа России: национальный портал..., 2025).

Радиационный баланс в Тульской области составляет около 40 ккал/см². Эта территория расположена в зоне, где солнечное тепло распределяется равномерно между испарением и нагреванием поверхности. На севере большая часть солнечной радиации идёт на испарение, тогда как на юге — на нагревание.

В течение года в регионе преобладают континентальные ветры, приносящие соответствующие воздушные массы (60 % случаев). Оставшиеся 40 % приходятся на морские воздушные массы. Воздушные потоки, сформировавшиеся над Атлантическим океаном, летом приносят пасмурную и дождливую погоду, а зимой — оттепели и снегопады. Арктические воздушные массы зимой усиливают морозы, а в переходные сезоны вызывают заморозки и возвраты холодов (Агроклиматический справочник..., 1966; Природа России: национальный портал..., 2025).

В Тульской области функционируют семь метеорологических станций, находящихся в ведении Росгидромета: Тула, Ефремов, Волово, Узловая, Суворов, Плавск и Алексин (Федеральная служба по гидрометеорологии..., 2024).

На основе метеонаблюдений (станция Плавск) (Погода и климат..., 2024) за период с 1986 по 2024 гг. были проанализированы средние температуры воздуха, ежемесячные суммы осадков, а также максимальные суточные осадки. В фокусе —

сравнение 2022, 2023 и 2024 годов со средними значениями за весь период наблюдений.

Годовая сумма осадков за каждый год с 1986 по 2024 год представлена в виде столбцов на рисунке 7. Красная пунктирная линия показывает среднее многолетнее значение — 617 мм.

Особенно выделяются годы с аномально высокими (например, 1991, 2006) и аномально низкими (2024) осадками. 2022 год оказался влажнее нормы — 677 мм (+9,7% к среднему). 2023 год — немного суше нормы (591 мм, –4,2%). 2024 год — аномально сухой: всего 383 мм, что на 38% меньше нормы. Снижение осадков в 2024 году может указывать на усиливающиеся засушливые тенденции или временную аномалию.

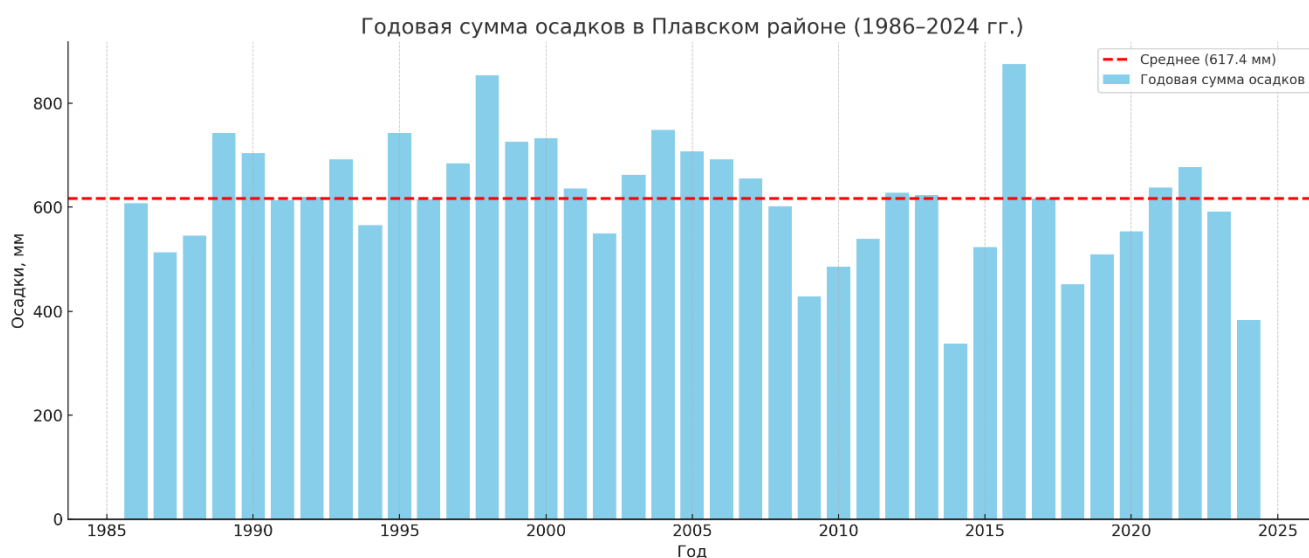


Рисунок 7 – Годовая сумма осадков в Плавском район Тульской области за период с 1986–2024 гг.

На рисунке 8 представлен график распределения осадков по месяцам за период 2022–2024 гг. Особенно сухими были сентябрь, октябрь и декабрь 2024 г., практически без осадков.

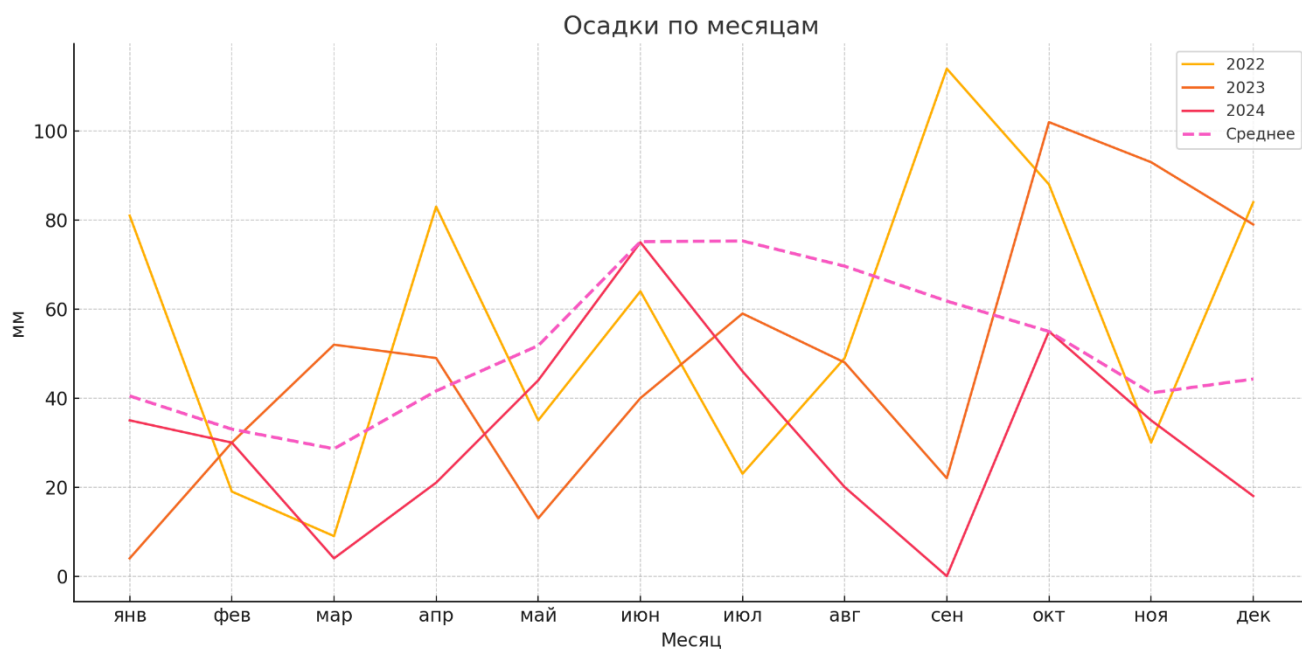


Рисунок 8 – Количество выпавших осадков по месяцам за период с 2022–2024 гг. в сравнении со средним многолетним показателем

Температура воздуха представлена на рисунке 9. Средняя годовая температура за исторический период составила 5,9 °С. Средняя годовая температура в 2022 составила 6,4 °С, в 2023 — 7,1 °С и в 2024 — 7,7 °С, что на почти 2 °С выше нормы, самый тёплый год за последние 40 лет наблюдений.

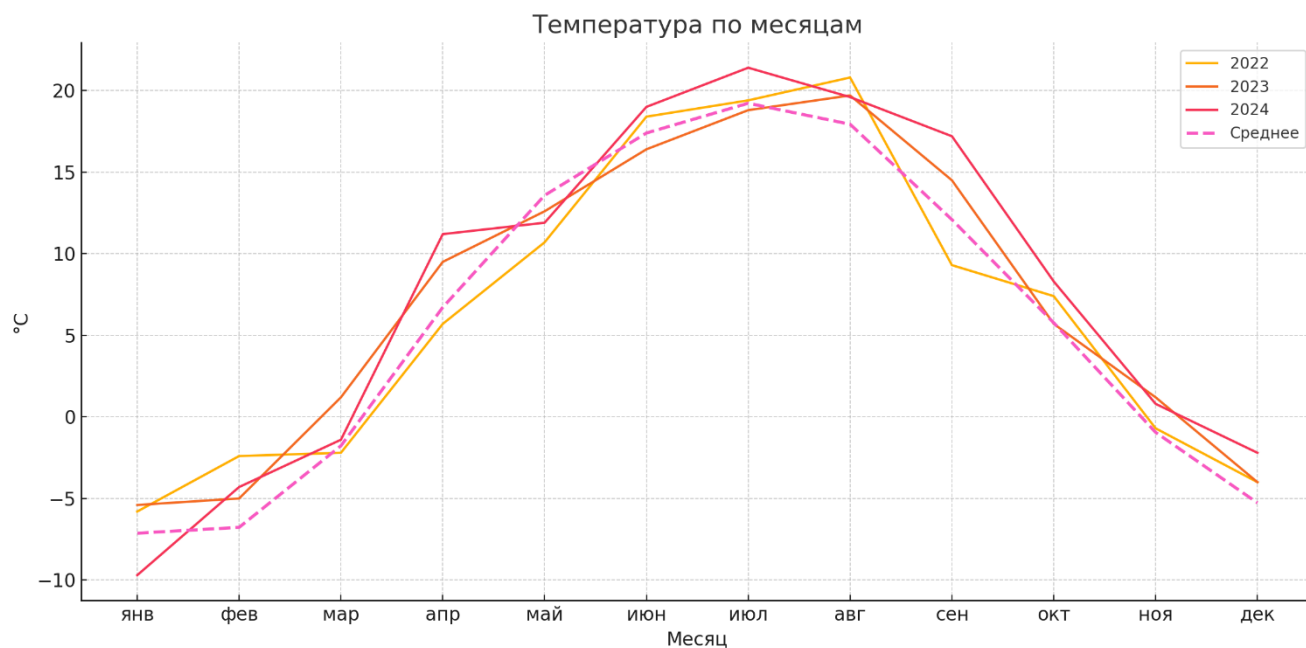


Рисунок 9 – Средняя температура по месяцам за период с 2022–2024 гг. в сравнении со средним многолетним показателем

Все три года — значительно теплее нормы, что подтверждает тренд на потепление. Особенно выделяются июль–сентябрь 2024 года.

На рисунке 10 представлены данные по максимальным суточным осадкам. Среднее значение: 40.4 мм (максимум в сутки).

2022: 28 мм.

2023: 26 мм.

2024: 20 мм.

Во всех трёх годах не наблюдалось экстремальных осадков — максимумы остаются существенно ниже исторических значений.

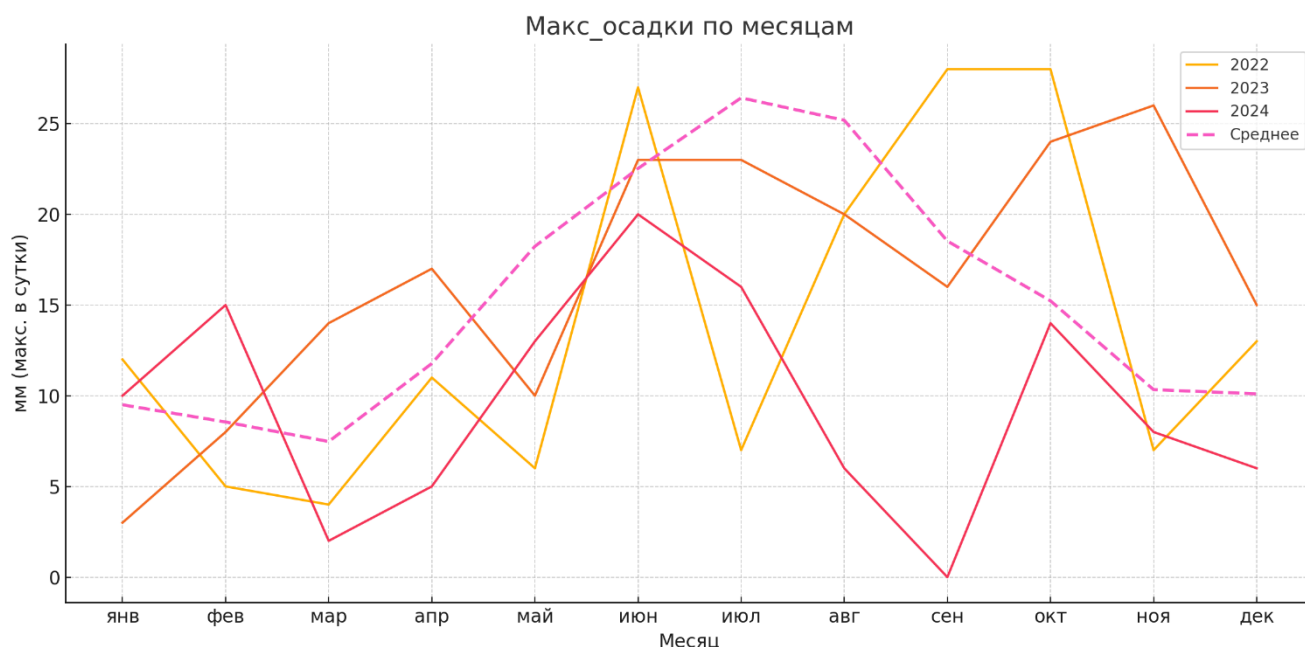


Рисунок 10 – Максимальное суточное количество выпавших осадков по месяцам за период с 2022–2024 гг. в сравнении со средним многолетним показателем

На основании проведенного анализа климатических данных за период с 1986–2024 гг. и в сравнении их с годами исследования можно сделать следующие выводы:

1. 2024 год стал рекордно тёплым и сухим, как по средней температуре, так и по общему количеству осадков. 2022 и 2023 — тоже теплее нормы, но климатические параметры ближе к средним.

2. Снижение экстремальных осадков может указывать на изменение характера осадков: меньше ливней, больше равномерных выпадений — либо общее уменьшение влажности.

3. Устойчивое потепление наблюдается уже третий год подряд.

2.2 Характеристика рельефа и почвообразующих пород территории

Тульская область находится в северо-восточной части Среднерусской возвышенности. Ее рельеф характеризуется глубоким расчленением поверхности гидрографической сетью, наличием холмов и выпуклой формой склонов. Это приводит к значительной эрозии почвы в некоторых районах и на сельскохозяйственных предприятиях (Ратников, 1960).

Почвообразующие породы в приокских районах представлены водно-ледниковыми и древнеаллювиальными песками, а также моренными суглинками. В центральных и северных районах преобладают тяжелые бескарбонатные покровные суглинки, в южных и восточных — карбонатные лёссовидные суглинки (Ратников, 1960).

В зависимости от геологического строения, залегания почвообразующих пород и степени расчлененности поверхности, Тульская область делится на четыре геоморфологических района (по Ратникову, 1960):

1. Окско-Упинский район включает северные и западные административные районы области.

2. Упско-Донской район охватывает восточные и центральные административные районы.

3. Упско-Непрядненский водораздельный район состоит из юго-восточных административных районов.

4. Красиво-Меченский район включает крайние юго-восточные и южные административные районы.

2.3 Характеристика растительного покрова

Отличительной особенностью растительного покрова области является разделение ее территории на два геоботанических района: первый — зона бывших в прошлом широколиственных лесов — занимает северные, центральные и западные административные районы, второй — бывшая лесостепь северного варианта — занимает южные и восточные административные районы. Во втором геоботаническом районе на юго-востоке области выделяется подрайон бывшей лесостепи южного вариант (Ратников, 1960).

По природно-сельскохозяйственному районированию область расположена в Среднерусской провинции лесостепной зоны (5–2А, Природно-сельскохозяйственное районирование..., 1984). Плавский район относится к западной подпровинции среднерусской провинции.

2.4 Характеристика почв и почвенного покрова Тульской области

Почвенный покров Тульской области характеризуется значительным разнообразием из-за неоднородных природных условий. В приокской полосе, где распространены водно-ледниковые и древнеаллювиальные пески, супеси и моренные суглинки, сформировались дерново-подзолистые почвы. В центральных и северных районах, в пределах первого геоботанического района, на бескарбонатных покровных суглинках под влиянием широколиственных осветлённых лесов и одновременного протекания подзолистого и дернового процессов образовались серые лесные почвы (Ратников, 1960).

Во втором геоботаническом районе благоприятные условия для развития дернового процесса были обусловлены наличием лугово-степной растительности, карбонатных лессовидных пород и меньшим количеством осадков. Это привело к формированию черноземов (Ратников, 1960). В пределах данного геоботанического района располагается Плавский район Тульской области.

Согласно почвенно-географическому районированию, Плавский район Тульской области относится к Окско-Донской провинции серых лесных почв и

черноземов (оподзоленных, выщелоченных, типичных) лесостепной зоны. (Карта почвенно-географического районирования..., 1986).

В Тульской области встречаются черноземы оподзоленные и выщелоченные.

По мощности гумусового горизонта наибольшее распространение в Тульской области имеют черноземы среднемощные (А+АВ 40–80 см), в меньшей степени маломощные (А+АВ 20–40 см) и еще менее распространены мощные виды (А+АВ свыше 80 см).

Структура пахотного горизонта порошистая, реже комковато-зернистая, непрочная; у черноземов оподзоленных тяжелосуглинистого механического состава структура менее выражена, что обуславливает в период весенних дождей образование на поверхности почвы корки; препятствующей появлению всходов сельскохозяйственных культур (Ратников, 1960).

Карбонатный горизонт, содержащий: углекислый кальций и магний в виде псевдомицелия, залегает у черноземов оподзоленных на глубине 140–200 см; у выщелоченных черноземов на глубине 90–140 см от поверхности почвы (Ратников, 1960).

Гранулометрический состав черноземов представлен тяжелыми и частично средними иловато-пылеватыми суглинками (Ратников, 1960).

Содержание гумуса в пахотном горизонте черноземов Тульской области по данным для подтипа оподзоленного 5,2–7,1 %, для выщелоченного 6,1–8,7% (Ратников, 1960).

По данным базы единого государственного реестра почвенных ресурсов (Единый государственный реестр почвенных ресурсов..., 2014) расположение объекта исследований приурочено к ареалу распространения преимущественно черноземов выщелоченных (КиДП, 1977), что показано на рисунке 11.



Рисунок 11 – Расположение объекта исследований на почвенной карте по данным единого государственного реестра почвенных ресурсов (ЕГРПР)

2.4.1 Крупномасштабное почвенное обследование территории землепользования Тульского НИИСХ филиал ФИЦ «Немчиновка» Плавского района Тульской области

На территории землепользования Тульского НИИСХ филиал ФИЦ «Немчиновка» Плавского района Тульской области в 2023 г. проведено почвенно-ландшафтное картографирование по методике, разработанной на кафедре почвоведения, геологии и ландшафтоведения РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (Агроэкологическая оценка...2005). Центральное место в обследовании отводится непосредственно почвенному покрову. В качестве методических указаний использовался ряд публикаций (Проведение почвенного

обследования...2022, Методология составления...2006, Общесоюзная инструкция...1973).

Для составления почвенной карты на территории хозяйства в ходе полевого почвенного обследования было заложено 307 точек почвенного опробования глубиной до 2 м. Из части разрезов отбирались пробы по почвенным горизонтам, в которых определяли: содержание гумуса по Тюрину, гидролитическую кислотность, величину рН водной вытяжки, величину рН солевой вытяжки, содержание подвижного фосфора и обменного калия (по Чирикову, а в карбонатных горизонтах по Мачигину), сумму поглощенных оснований, обменный натрий, гранулометрический состав (Минаев и др., 2024).

Карта почвенного покрова территории землепользования представлена на рисунке 12. Карта почвенного покрова отражает сложность и контрастность почвенного покрова, представленного преимущественно неконтрастными комбинациями (пятнистостями), реже — контрастными (комплексами и мозаиками). Пахотные земли представлены преимущественно черноземами выщелоченными маломощными и среднемощными малогумусными и среднегумусными тяжелосуглинистого гранулометрического состава сформированные на лессовидных суглинках (Минаев и др., 2024).

Черноземы оподзоленные, отмеченные на старой почвенной карте на территории пашни встречаются мало и в основном приурочены к переходным к ложбинам вогнутым элементам рельефа, где наблюдается повышенное увлажнение и формирование несколько повышенного промывания профиля почвы (Минаев и др., 2024).

В ложбинах встречается черноземно-луговые выщелоченные почвы с мощным гумусовым горизонтом, периодически намытая толща может достигать 2 метров. Грунтовые воды скапливаются и встречаются на глубине 1–3 метра (Минаев и др., 2024).

Почвы преимущественно имеют тяжелосуглинистый гранулометрический состав и сформированы на однородных лессовидных породах (Минаев и др., 2024).

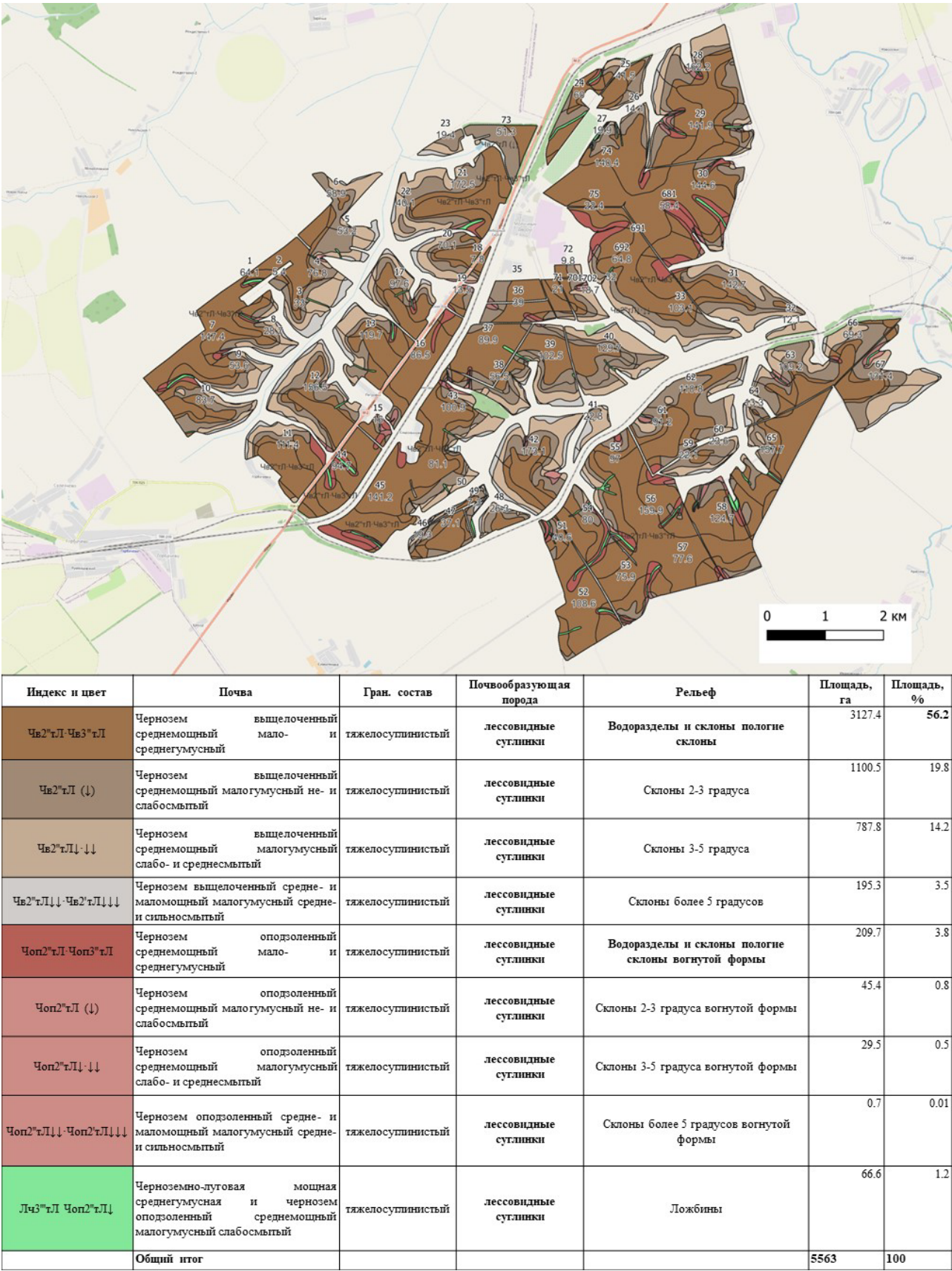


Рисунок 12 – Почвы землепользования Тульского НИИСХ филиал ФИЦ «Немчиновка» (Минаев и др., 2024)

ГЛАВА 3. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1 Схема проведенного исследования

Объектом исследования являлся чернозем выщелоченный среднегумусный среднесиловый тяжелосуглинистый на лессовидных тяжелых суглинках который располагался в пределах территории пахотных угодий и залежного участка Тульского НИИСХ филиал ФИЦ «Немчиновка» Плавского района Тульской области. Для отбора образцов были выбраны 4 участка с разным характером использования: **пашня** — участок с яровыми культурами за 3 года; **многолетние травы** — участок с многолетними травами в 2022 и 2023 году, которые осенью 2023 года были распаханы и посеяна озимая пшеница; **распаханная залежь** — участок, бывший в залежи более 40 лет и введенный в оборот в 2022 году с посевом яровых культур и **целина** — участок с разнотравно-злаковой растительностью, который не подвергался использованию (Бородина, 2023).

Примем следующую схему нумерации и обозначения участков:

Номер участка	Условное название	Краткое описание	Номер разреза
1	Пашня	Участок пашни с яровыми культурами за 3 года	1
2	Мн. травы	Участок с многолетними травами в 2022 и 2023 году, которые в 2024 году были замещены озимой пшеницей	2
3	Распаханная залежь	Участок, бывший в залежи в течение длительного времени и введенный в оборот в 2022 году с посевом яровых культур	3
4	Целина	Участок с разнотравно-злаковой растительностью, который не подвергался использованию	4

Почва на всех участках представлена черноземом выщелоченным среднесиловым среднегумусным тяжелосуглинистым на лессовидных тяжелых

суглинках. На выбранных участках (рис. 13) были заложены разрезы и отобраны образцы из пахотного горизонта на глубину 0–20 см, для целины из верхней части гумусового горизонта на глубину 5–20 см и из нижней части гумусового горизонта на глубину 20–40 см. Образцы отбирались с этих же площадок в 2022, 2023 и 2024 гг. в мае. Образцы отбирались по треугольнику, вершина которого располагалась в точке заложения разреза и в 2 точках равностороннего треугольника на расстоянии 2 м. Для точной фиксации координат разреза использовался точный геодезический прибор GNSS STONEX Surf III.



Рисунок 13 – Схема размещения исследуемых участков в пределах территории Тульского НИИСХ

Для уточнения расположения залежного и целинного участков использовались данные ретроспективного анализа, проведенного в работе Королевой (Королева, 2023). В данной работе был проведен ретроспективный анализ частоты встречаемости открытой поверхности почвы (ОПП) по данным

дистанционного зондирования с 1985 г. Это позволяет оценить использование исследуемых участков в сельском хозяйстве.

На рисунке 14 видно частоту встречаемости открытой поверхности почвы за период с 1985 по 1994 гг. Участок № 2 характеризуется высокой вовлеченностью в пашню, о чем говорит высокий процент встречаемости ОПП (60–70%).

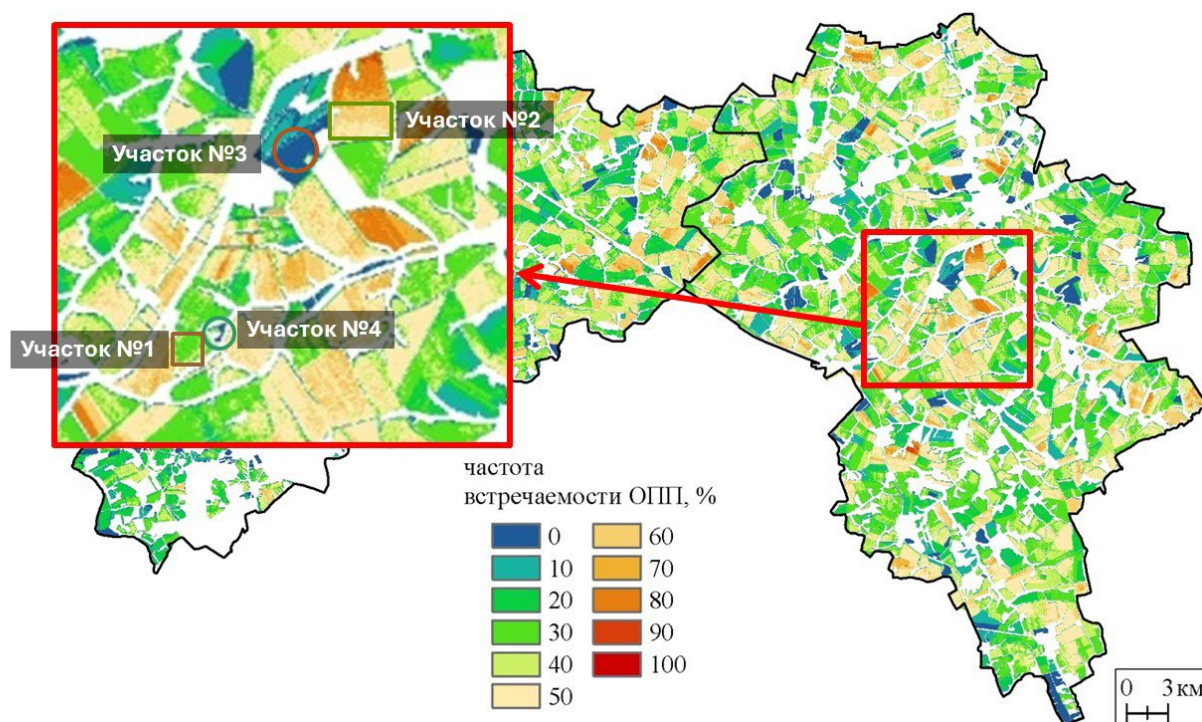


Рисунок 14 – Карта частоты встречаемости ОПП 1985–1994 гг. (Королева, 2023)

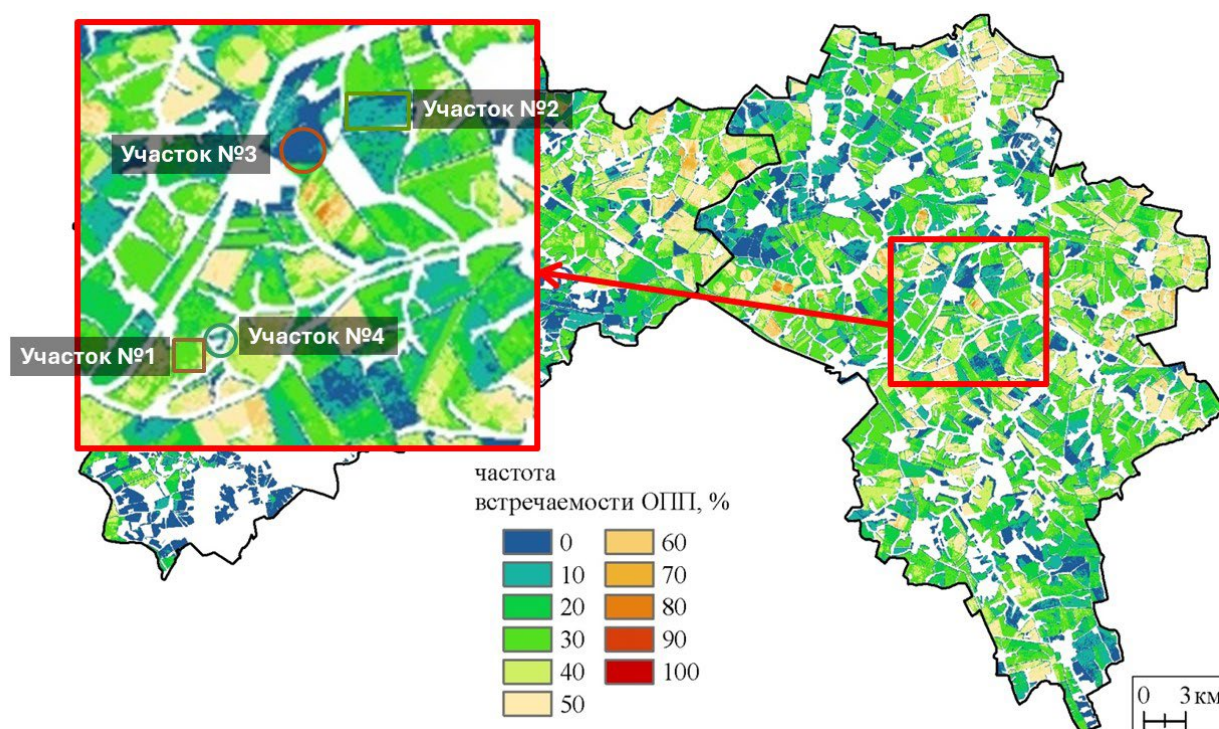


Рисунок 15 – Карта частоты встречаемости ОПП 2010–2020 гг. (Королева, 2023)

Также по картам на рисунках 14 и 15 видно, что участок №3, который введен в сельскохозяйственный оборот в 2022 году, с 1985 гг. имеет 0 частоту ОПП. Это подтверждает его залежность с 1985 г. Участок №4 также имеет 0 частоту ОПП и в оборот не вводился, что позволило его использовать как условно фоновый целинный участок.

Участок №1 за оба периода (рис. 14 и 15) имел схожую частоту ОПП, порядка 30–40%, что говорит о его активном сельскохозяйственном использовании, но на участке, вероятно, часто встречаются озимые культуры и многолетние травы.

Таким образом схема исследования предполагает комплекс наблюдений в первую очередь за состоянием органического вещества почв за 3-хлетний период в разных условиях землепользования, что позволит проследить динамику изменения состояния за этот период, используя новые методы, а также дать агроэкологическую оценку почвам, в том числе используя доступные дистанционные методы.

3.2 Характеристика объекта исследования

Как было обозначено выше, для исследования было выбрано 4 участка с разным характером землепользования. Для подробной характеристики почв на этих участках были заложены почвенные разрезы.

Почва на всех участках представлена подтипом выщелоченных черноземов, которые образуют группу широко распространенных фациальных подтипов, свойственных луговому разнотравно-злаковым степям лесостепной зоны и более увлажняемым частям зоны настоящих степей. Частично эти почвы могут формироваться и под парковыми редкостойными лесами (обычно по периферии лесных массивов или под небольшими колками степных дубрав) (Классификация и диагностика почв..., 1977 г.).

Основным отличительным признаком выщелоченных черноземов является вымытость карбонатов из гумусового горизонта и по крайней мере из верхней половины переходного горизонта (Классификация и диагностика почв..., 1977 г.).

Ниже приводится описание почвенного профиля разреза №1, заложенного на участке **пашни** (участок №1) (рис. 16). Местность: водораздельная поверхность, уклон до 1°.



Рисунок 16 – Фото профиля почвы в разрезе №1

Почва: чернозем выщелоченный среднегумусный среднесильногумусный тяжелосуглинистый на лессовидном тяжелом суглинке (Классификация и диагностика почв..., 1977 г.). Индекс: Ч^В₃"ТЛ.

По классификации почв России (Классификация почв России, 2004) агрочернозем глинисто-иллювиальный типичный среднесильногумусный сильно гумусированный тяжелосуглинистый на лессовидном тяжелом суглинке.

По международной системе классификации почв WRB: Luvic Chernic Phaeozems (Siltic, Aric, Pachic) (Мировая реферативная база почвенных ресурсов..., 2024).

А_{пах}. Глубина 0–20 см, общая мощность 20 см. Пахотный горизонт. Цвет темно-серый, по шкале Манселла 10YR 2/2. Структура глыбисто-комковато-зернистая, почва свежая, рыхлая. Гранулометрический состав тяжелосуглинистый. Пронизан корнями, в нижней части наблюдаются запаханные растительные остатки тонким слоем. Переход ясный по плотности.

А. Глубина 20–40 см, общая мощность 20 см. Гумусовый горизонт. Цвет темно-серый, по шкале Манселла 10YR 2/2. Структура комковато-глыбистая, почва свежая, тонкопористая, в верхней части горизонт имеет выраженное уплотнение, в нижней части горизонта почва менее уплотнена. Гранулометрический состав тяжелосуглинистый. Встречаются тонкие корни, наблюдаются обильно ходы червей. Переход к следующему горизонту постепенный по цвету.

АВ. Глубина 40–70 см. Общая мощность 30 см. Гумусовый горизонт. Окраска неоднородная, преимущественно темно-серая с коричневатым оттенком, встречаются мелкие пятна коричневого цвета, по шкале Манселла 10YR 3/2. Структура разнокомковатая, почва свежая, тонкопористая, горизонт уплотнен. Гранулометрический состав тяжелосуглинистый. Горизонт пронизан корнями, наблюдаются ходы червей. Переход к следующему горизонту ясный по изменению окраски.

В. Глубина 70–120 см. Общая мощность 50 см. Переходный горизонт желтовато-коричневого цвета, по шкале Манселла 10YR 6/8. Структура комковатая, почва свежая, сложение плотное. Гранулометрический состав тяжелосуглинистый. Горизонт пронизан тонкими корнями, тонкопористый, по граням структурных отдельностей имеются глино-гумусовые пленки. На всей протяженности горизонта имеются узкие глубокие гумусовые затеки. Переход в нижний горизонт ясный по наличию карбонатных выделений и вскипанию.

Ниже приводится описание почвенного профиля разреза №2, заложенного на участке **пашни с многолетними травами** (участок №2) (рис. 17). Местность: водораздельная поверхность, уклон до 1°.



Рисунок 17 – Фото профиля почвы в разрезе № 2

Почва: чернозем выщелоченный среднегумусный среднетощный тяжелосуглинистый на лессовидном тяжелом суглинке (Классификация и диагностика почв..., 1977 г.). Индекс: Ч^B₃"ТЛ.

По классификации почв России (Классификация почв России, 2004) агрочернозем глинисто-иллювиальный типичный среднетощный сильно гумусированный тяжелосуглинистый на лессовидном тяжелом суглинке.

По международной системе классификации почв WRB: Luvic Chernic Phaeozems (Siltic, Aric, Pachic) (Мировая реферативная база почвенных ресурсов..., 2024).

А_{пах}. Глубина 0–20 см, общая мощность 20 см. Пахотный горизонт. Цвет темно-серый, по шкале Манселла 10YR 2/1. Структура ярко выраженная, комковато-зернистая, почва свежая, рыхлая. Гранулометрический состав

тяжелосуглинистый. Обильно пронизан корнями. Переход ясный по плотности и сложению.

А. Глубина 20–39 см, общая мощность 19 см. Гумусовый горизонт. Цвет темно-серый, по шкале Манселла 10YR 2/1. Структура зернисто-комковатая, почва свежая, более уплотнен, но хорошо копается. Гранулометрический состав тяжелосуглинистый. Горизонт пронизан корнями, наблюдаются обильно ходы червей. Переход к следующему горизонту ясный по цвету.

АВ. Глубина 39–54 см. Общая мощность 15 см. Гумусовый горизонт. Цвет темно-серый с коричневатым оттенком, по шкале Манселла 10YR 3/2. Структура мелко-комковатая, почва свежая, горизонт уплотнен. Гранулометрический состав тяжелосуглинистый. Горизонт реже пронизан корнями, наблюдаются обильно ходы червей. Переход к следующему горизонту ясный по цвету.

В. Глубина 54–96 см. Общая мощность 42 см. Переходный горизонт желтовато-коричневого цвета, по шкале Манселла 10YR 6/8. Структура комковатая, почва свежая, сложение плотное. Гранулометрический состав тяжелосуглинистый. Горизонт редко пронизан тонкими корнями, очень пористый, по граням структурных отдельностей имеются глино-гумусовые пленки. На всей протяженности горизонта имеются узкие глубокие гумусовые затеки. Переход в нижний горизонт ясный по наличию карбонатных выделений и вскипанию.

Вск. Глубина в разрезе 96–106 см. Общая мощность более 10 см. Иллювиально-карбонатный горизонт. Окраска светло-коричневая, по шкале Манселла 10YR 6/8. Структура комковатая. Горизонт свежий, плотный, пористый. Гранулометрический состав тяжелосуглинистый. Встречаются единичные корни, пористый. Вскипает от 10% раствора соляной кислоты с глубины 96 см. присутствуют обильные новообразования карбонатов в виде псевдомицелия.

Ниже приводится описание почвенного профиля разреза №3, заложенного на участке **распаханной залежи** (участок №3) (рис. 18). Местность: водораздельная поверхность, уклон до 1°.



Рисунок 18 – Фото профиля почвы в разрезе №3

Почва: чернозем выщелоченный среднегумусный среднесильный тяжелосуглинистый на лессовидном тяжелом суглинке (Классификация и диагностика почв..., 1977 г.). Индекс: Ч^В₃"ТЛ.

По классификации почв России (Классификация почв России, 2004) агрочернозем глинисто-иллювиальный типичный среднесильный сильно гумусированный тяжелосуглинистый на лессовидном тяжелом суглинке.

По международной системе классификации почв WRB: Luvic Chernic Phaeozems (Siltic, Aric, Pachic) (Мировая реферативная база почвенных ресурсов..., 2024).

А_{пах}. Глубина 0–20 см, общая мощность 20 см. Пахотный горизонт. Цвет темно-серый, по шкале Манселла 10YR 2/1. Структура ярко выраженная, комковато-зернистая, почва свежая, рыхлая. Гранулометрический состав тяжелосуглинистый. Пронизан корнями, в нижней части наблюдаются запаханые растительные остатки тонким слоем. Переход ясный по плотности.

А. Глубина 20–44 см, общая мощность 24 см. Гумусовый горизонт. Цвет темно-серый, по шкале Манселла 10YR 2/1. Структура комковато-зернистая, хорошо выражена, почва свежая, уплотнена. Гранулометрический состав тяжелосуглинистый. Горизонт пронизан корнями, наблюдаются обильно ходы червей. Переход к следующему горизонту постепенный по цвету.

АВ. Глубина 44–67 см. Общая мощность 23 см. Гумусовый горизонт. Окраска неоднородная, преимущественно темно-серая с коричневатым оттенком, встречаются мелкие пятна коричневого цвета, по шкале Манселла 10YR 3/2. Структура комковатая, почва свежая, горизонт уплотнен. Гранулометрический состав тяжелосуглинистый. Горизонт реже пронизан корнями, наблюдаются обильно ходы червей. Переход к следующему горизонту постепенный по цвету.

В. Глубина 67–95 см. Общая мощность 30 см. Переходный горизонт желтовато-коричневого цвета, неоднородно окрашен за счет деятельности роющих животных, по шкале Манселла 10YR 5/4, темно-серые пятна по шкале Манселла 10YR 3/1. Структура комковатая, почва свежая, сложение плотное. Гранулометрический состав тяжелосуглинистый. Горизонт редко пронизан тонкими корнями, пористый, по граням структурных отдельностей наблюдаются кутаны. В горизонте имеются несколько кротовин вытянутой формы порядка 12–15 см по вытянутой стороне и 8–10 см в поперечнике, кротовины заполнены почвой разных горизонтов придают несколько более темный общий окрас всему горизонту. Переход в нижний горизонт ясный по наличию карбонатных выделений и вскипанию.

В_{ск}. Глубина в разрезе 95–105 см. Общая мощность более 10 см. Иллювиально-карбонатный горизонт. Окраска светло-коричневая, по шкале Манселла 10YR 6/6. Структура комковатая. Горизонт свежий, плотный, пористый.

Гранулометрический состав тяжелосуглинистый. Встречаются единичные корни, пористый. Вскипает от 10% раствора соляной кислоты с глубины 95 см. С глубины 95 см встречаются новообразования карбонатов в виде псевдомицелия.

Ниже приводится описание почвенного профиля разреза №4, заложенного на участке **целины** с разнотравно-злаковой растительной ассоциацией (участок №4) (рис. 19). Местность: водораздельная поверхность, уклон до 1°.



Рисунок 19 – Фото профиля почвы в разрезе №4

Основу растительного покрова составляют: райграс пастбищный (*Lolium perenne*), овсяница луговая (*Festuca pratensis*), костер безостый (*Bromus inermis*), репешок обыкновенный (*Agrimonia vulgaris*), пижма обыкновенная (*Tanacetum vulgare*), латук дикий (*Lactuca serriola*)

Почва: чернозем выщелоченный среднегумусный среднемощный тяжелосуглинистый на лессовидном тяжелом суглинке (Классификация и диагностика почв..., 1977 г.). Индекс: Ч^B₃"ТЛ.

По классификации почв России (Классификация почв России, 2004) чернозем глинисто-иллювиальный типичный среднемощный сильно гумусированный тяжелосуглинистый на лессовидном тяжелом суглинке.

По международной системе классификации почв WRB: Luvic Chernic Phaeozems (Siltic, Pachic) (Мировая реферативная база почвенных ресурсов..., 2024).

А₀. Глубина 0–4 см. Плотная дернина.

А. Глубина 4–38 см, общая мощность 34 см. Гумусовый горизонт. Цвет темно-серый, по шкале Манселла 10YR 2/1. Структура ярко выраженная, комковато-зернистая, почва свежая, рыхлая. Гранулометрический состав тяжелосуглинистый. Обильно пронизан корнями, наблюдаются обильно ходы червей. Переход ясный по цвету.

АВ. Глубина 38–62 см. Общая мощность 24 см. Гумусовый горизонт. Цвет темно-серый с коричневатым оттенком, по шкале Манселла 10YR 3/2. Структура зернисто-комковатая, почва свежая, горизонт плотный. Гранулометрический состав тяжелосуглинистый. Горизонт реже пронизан корнями, наблюдаются обильно ходы червей. Переход к следующему горизонту постепенный по цвету.

В. Глубина 62–104 см. Общая мощность 42 см. Переходный горизонт желтовато-коричневого цвета, по шкале Манселла 10YR 6/8. Структура комковатая, почва свежая, сложение плотное. Гранулометрический состав тяжелосуглинистый. Горизонт редко пронизан тонкими корнями, очень пористый, по граням структурных отдельностей имеются глино-гумусовые пленки. Горизонт имеет редкие узкие гумусовые затеки. Переход в нижний горизонт ясный по наличию карбонатных выделений и вскипанию.

В_{Ск}. Глубина в разрезе 104–114 см. Общая мощность более 10 см. Иллювиально-карбонатный горизонт. Окраска светло-коричневая, по шкале Манселла 10YR 6/8. Структура комковатая. Горизонт свежий, плотный, пористый.

Гранулометрический состав тяжелосуглинистый. Встречаются единичные корни, пористый. Вскипает от 10% раствора соляной кислоты с глубины 104 см. присутствуют новообразования карбонатов в виде псевдомицелия.

Почвы на всех 4 участках имеют очень близкие морфологические признаки и отличаются только в деталях как немного разные мощности горизонтов, глубина вскипание, наличие кротовин. В среднем общая мощность гумусового горизонта по всем профилям составляет порядка 60 см, что относит почвы во всех разрезах к виду среднемощных по мощности гумусового горизонта. Поскольку содержание гумуса во всех разрезах превышает 6%, то почвы относятся к виду среднегумусных по содержанию гумуса. Классификационные названия почв (Классификация и диагностика почв..., 1977 г.) идентичны. Это дает основание проводить сравнение этих почв в условиях разного землепользования.

В таблице 3 приведены основные аналитические показатели почв по разрезам.

По данным таблицы 3 в разрезе №1 верхний горизонт Апах (0–20 см) характеризуется высоким содержанием гумуса (6,1%), слабокислой реакцией среды ($pH_{\text{сол.}}$ 5,53) и достаточно высоким содержанием подвижных форм фосфора (158 мг/кг) и калия (103 мг/кг). Горизонт А (20–40 см) демонстрирует закономерное уменьшение гумуса (4,9%) и содержания питательных веществ.

Горизонты АВ и В показывают дальнейшее снижение гумуса (до 3,6% и отсутствие данных в горизонте В), а также постепенное увеличение pH до нейтральных значений (7,06). Уровень насыщенности основаниями по профилю высокий, достигает 92%.

По данным таблицы 3 в разрезе №2 горизонт Апах (0–20 см) содержит 6,9% гумуса — максимальное значение среди всех разрезов в этом горизонте. $pH_{\text{сол.}}$ — 5,45, $pH_{\text{водн.}}$ — 6,26, то есть среда слабокислая. В горизонте А (20–39 см) гумус снижается до 5,8%, но остаётся высоким. Подвижные формы фосфора (78 мг/кг) и калия (95 мг/кг) ниже, чем в верхнем горизонте, указывая более удобренный фон.

Таблица 3 – Аналитические характеристики почв на исследуемых участках

Горизонт	Глубина, см	Гумус, %	pH _{сол.}	pH _{водн.}	Гидро-литическая кислотность, мг-экв/100 г почвы	Сумма поглощенных оснований, мг-экв/100 г почвы	Емкость катионног о обмена, мг-экв/100 г почвы	Степень насыщенности основаниями, %	Содержание частиц, %		P2O5 по Чирикову, мг/кг почвы	K2O по Чирикову, мг/кг почвы
									<0,001 мм	<0,01 мм		
Чернозем выщелоченный среднегумусный среднемощный тяжелосуглинистый на лессовидном тяжелом суглинке, разрез 1												
Апах	0–20	6,1	5,53	6,96	5,5	32,4	37,9	85	17	41	158	103
А	20–40	4,9	5,51	6,83	5,7	32,6	38,3	85	17	43	78	112
АВ	40–70	3,6	5,52	6,89	3,2	28,9	32,1	90	17	42	–	–
В	70–120	–	5,56	7,06	2,1	23,7	25,8	92	19	45	–	–
Чернозем выщелоченный среднегумусный среднемощный тяжелосуглинистый на лессовидном тяжелом суглинке, разрез 2												
Апах	0–20	6,9	5,45	6,26	4,7	32,1	36,8	87	18	42	85	114
А	20–39	5,8	5,98	7,12	5,2	34,2	39,4	87	18	43	78	98
АВ	39–54	3,9	6,21	7,12	2,2	26,5	28,7	92	18	43	–	–
В	54–96	–	6,75	7,54	1,1	22,1	23,2	95	19	44	–	–
Чернозем выщелоченный среднегумусный среднемощный тяжелосуглинистый на лессовидном тяжелом суглинке, разрез 3												
Апах	0–20	7,4	5,84	6,99	3,6	38,9	42,5	92	19	41	65	71
А	20–44	5,7	6,02	6,71	3,5	34,4	37,9	91	20	43	59	93
АВ	44–67	4,0	6,12	6,8	2,8	32,1	34,9	92	20	42	–	–
В	67–95	–	5,64	7,15	1,8	25,7	27,5	93	22	45	–	–
Чернозем выщелоченный среднегумусный среднемощный тяжелосуглинистый на лессовидном тяжелом суглинке, разрез 4												
А	5–38	6,7	5,96	6,71	5,2	34,1	39,3	87	17	42	72	90
АВ	38–62	4,5	6,26	7,08	3,7	34,5	38,2	90	18	41	85	–85
В	62–104	–	6,36	7,24	0,7	31,6	32,3	98	21	44	–	–

В горизонтах АВ и В гумус не определялся, кислотность переходит в нейтральную и слабощелочную, насыщенность основаниями достигает 95%. Гранулометрический состав остаётся стабильным.

По данным таблицы 3 почва в разрезе №3 отличается самым высоким содержанием гумуса в Апах (7,4%) и значениями подвижного фосфора (65 мг/кг) и калия (71 мг/кг) — ниже по сравнению с уже используемым в пашне участками, возможно, отражающие влияние удобрений на пашне Горизонт А (20–44 см) всё ещё богат гумусом (5,7%) и питательными веществами (P_2O_5 – 59 мг/кг, K_2O – 93 мг/кг). В горизонте АВ (44–67 см) — гумус 4%, кислотность стабилизируется, насыщенность основаниями — 92%. В горизонте В (67–95 см) pH приближается к нейтральному/слабощелочному (7,15), степень насыщенности — 93%.

По данным таблицы 3 почва в разрезе №4 в горизонте А имеет содержание гумуса — 6,7%, кислотность низкая ($pH_{\text{сол.}}$ 5,96, $pH_{\text{водн.}}$ 6,71), показатели фосфора и калия умеренные. Горизонт АВ (38–62 см) содержит 4,5% гумуса, структура и pH соответствуют АВ в других разрезах. В горизонте В (62–104 см) гумуса не определялся, кислотность близка к нейтральной, насыщенность основаниями достигает 98% — самый высокий показатель среди всех разрезов. Этот профиль выглядит наиболее сбалансированным, с плавным переходом между горизонтами и без выраженных аномалий.

Разрез 2 имеет наивысшую насыщенность основаниями в нижнем горизонте (95%), при умеренной обеспеченности фосфором и калием.

Разрез 1 можно считать типичным для лесостепного чернозема: чёткое распределение гумуса по профилю, отсутствие пиков и аномалий.

Разрез 4 — наиболее сбалансирован и “ровный” по химическим характеристикам.

В целом, все разрезы укладываются в рамки одного почвенного подтипа, но отражают различия в агротехнике.

3.3 Лабораторные методы исследования

Определение органического углерода гумуса проводилось по методу И.В. Тюрина в модификации В.Н. Симакова (Практикум по почвоведению..., 2025).

В дополнение проводилось контрольное определение органического углерода в образцах почвы на анализаторе Elementar vario MICRO cube CHNS. Для определения лабильного органического углерода использовался метод определения перманганат окисляемого углерода (permanganate-oxidizable carbon — РОХС) описанный в (Culman et al., 2012) и метод определения легкоразлагаемого органического вещества (ЛОВ) по методу Н.Ф Ганжары и Б.А. Борисова (Борисов, 2008; Практикум по почвоведению..., 2025) в пересчете на содержание в нем углерода (СЛОВ).

Состав и структура лабильного органического вещества определилась на растровом электронном микроскопе Сохет EM-30AX PLUS (Республика Корея).

Анализ структуры почвы проводился на основе агрегатного анализа почв по методу Н.И. Саввинова.

Микроагрегатный анализ по Н.А. Качинскому.

Гранулометрический состав почв определялся методом пипетки (вариант Н.А. Качинского с подготовкой почвы к анализу пирофосфатным методом по С.И. Долгову и А.И. Личмановой).

Определение суммы обменных оснований методом Каппена-Гильковица.

Определение гидролитической кислотности по Каппену.

Емкость катионного обмена (ЕКО) и степень насыщенности почв основаниями вычислялась по показателям суммы обменных оснований и гидролитической кислотности.

Определение рН водной и солевой суспензии потенциометрическим методом.

Определение подвижного фосфора и обменного калия проводилось по методу Чирикова.

ГЛАВА 4. СОСТОЯНИЕ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ПОЧВ В ЧЕРНОЗЕМЕ ВЫЩЕЛОЧЕННОМ ПРИ РАЗНОМ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИИ

4.1 Динамика содержания гумуса

По мощности гумусового горизонта чернозем выщелоченный на участках относится к среднемощным, а по содержанию гумуса к малогумусным и среднегумусным, но содержание гумуса варьируется в почвах на границе этих двух видов в 6% (Бородина, Минаев, 2022). Развёрнутая статистическая оценка приведена в приложении В.

На рисунке 20 приведена диаграмма распределения содержания гумуса в пахотном горизонте по вариантам с разным характером землепользования на экспериментальных участках за 2022–2024 гг. В среднем содержание гумуса в верхнем горизонте профиля (0–20 см) выщелоченного чернозема составляло: для постоянной пашни — 6,06%, для распаханной залежи — 7,17%, для пашни после многолетних трав — 6,71%, для целины — 6,67%. По диаграмме и средним значениям содержания гумуса можно заметить, что содержание гумуса в пахотном горизонте участка под яровыми культурами за последние 3 года наблюдений находилось на относительно постоянном уровне 6%, то есть в условиях пашни установилось стабильное гумусовое состояние почвы (Бородина и др., 2025).

Также в течение трех лет наблюдалось относительно стабильное гумусовое состояние на целинном участке, где отмечено достоверно ($p > 0.05$) (приложение В) более высокое содержание гумуса в 6,68%, что на 0,6% выше по сравнению с пахотным аналогом. Отмечается только более высокая дисперсия по сравнению с пашней, что скорее всего обусловлено поступлением с отмершей растительностью свежего органического вещества и включением его в структуру гумуса на целинном участке. На участке с многолетними травами за 2 года (2022–2023 гг.) наблюдений содержание гумуса было более чем на 1,1% и 0,9% выше по сравнению с пахотным участком под яровыми культурами, что также можно связать с

поступлением свежего органического вещества с опадом и включением его в структуру гумуса. На 3 год наблюдений после распахки многолетних трав и посева озимой пшеницы отмечено резкое снижение содержания гумуса до уровня сопоставимого с пашней под яровыми культурами. Более высокая дисперсия обусловлена, по-видимому, процессами разложения и гумификации органических остатков, поступивших от многолетних трав в предыдущий период. Наблюдения за содержанием гумуса в почве на участке распаханной залежи за 3 года показали отчетливый тренд на снижение содержания гумуса, особенно в год последующий за введением в оборот. Среднее содержание гумуса снизилось с $7,42 \pm 0,19\%$ в целинной почве в первый год наблюдений до $7,11 \pm 0,16$ и $6,99 \pm 0,33\%$ во 2 и 3 год соответственно (Бородина и др., 2025).

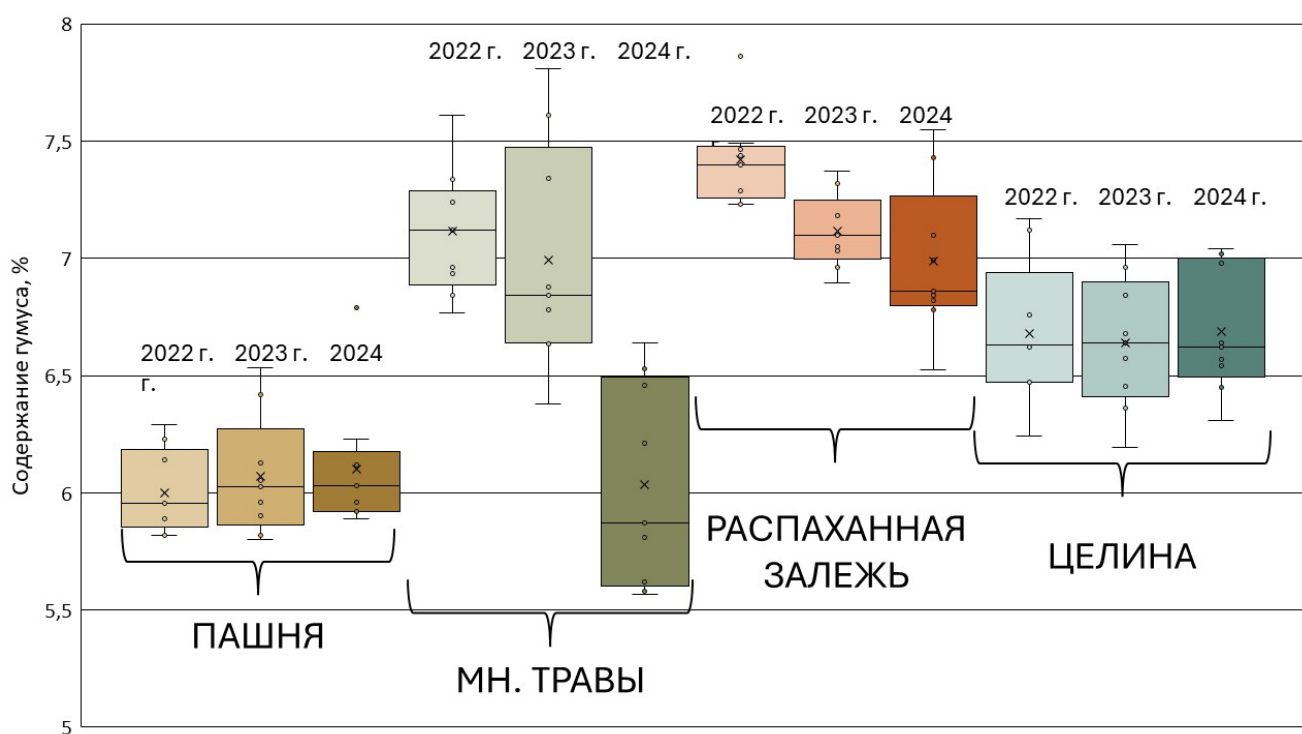


Рисунок 20 – Диаграмма распределения содержания гумуса (%) в верхней части гумусового горизонта (Апах 0–20 см, для целины А 5–20 см) по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

Кроме верхнего горизонта, подвергающегося наибольшему антропогенному воздействию за счет механических обработок, в исследуемых почвах изучали показатели состояния органического вещества залегающего ниже гумусового

горизонта А (20–40 см). Предполагалось, что данный горизонт будет иметь более стабильные показатели, близкие по всем вариантам землепользования (Бородина и др., 2025).

На рисунке 21 приведена диаграмма распределения содержания гумуса (%) в нижней части гумусового горизонта (А 20–40 см) по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

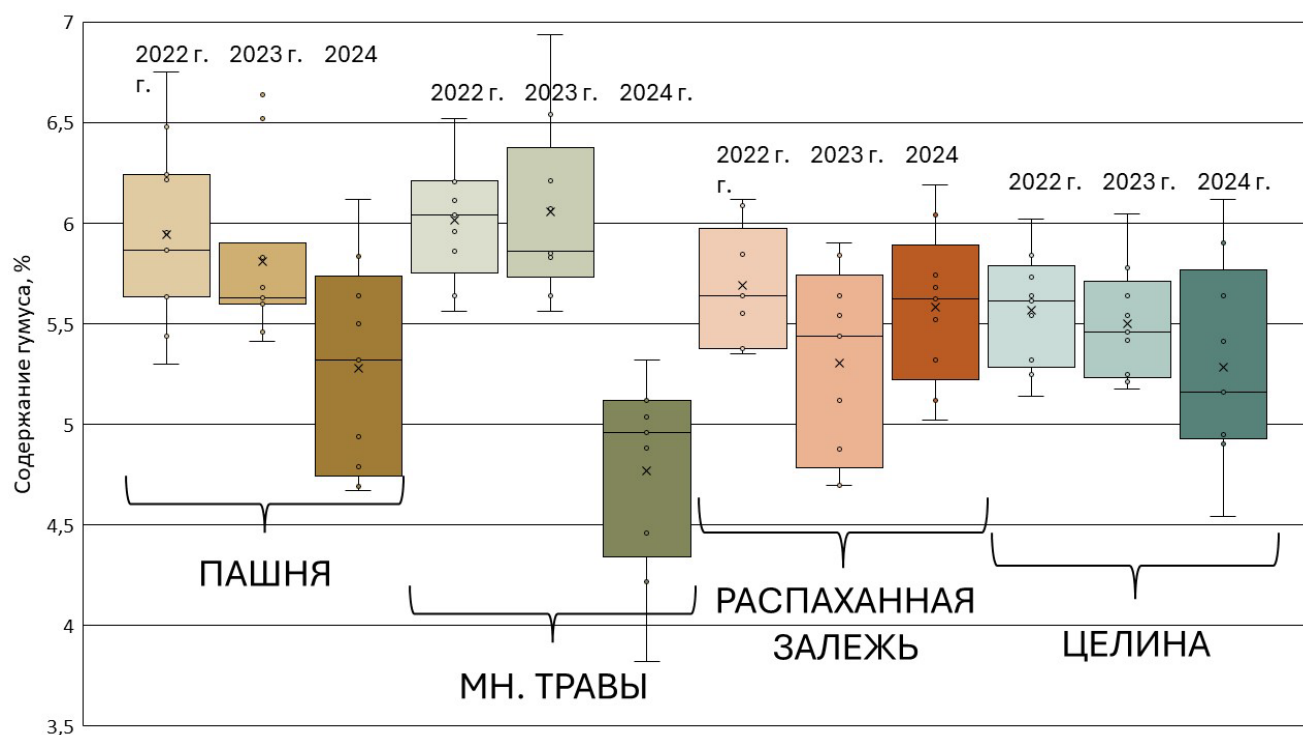


Рисунок 21 – Диаграмма распределения содержания гумуса (%) в нижней части гумусового горизонта (А 20–40 см) по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

В нижней части гумусового горизонта чернозема выщелоченного по полученным данным наблюдалась неоднозначная картина распределения содержания гумуса как по вариантам, так и по годам. Среднее содержания гумуса в почве пашни в 2022 и 2023 гг. составило $5,95 \pm 0,5$ и $5,83 \pm 0,45\%$, но в 3 год наблюдений содержание резко снизилось до $5,28 \pm 0,53\%$ при высокой дисперсии. Статистически это недостоверные изменения ($p > 0,05$). Причем медианные значения достаточно близки — 5,86%, 5,63% и 5,32% соответственно по годам. Это можно объяснить повышенной локальной вариабельностью содержания гумуса в

месте отбора проб. На участке многолетних трав за 2 года среднее содержание гумуса составляло $6,01 \pm 0,30\%$ и $6,06 \pm 0,45\%$, но на 3 год резко снизилось до $4,77 \pm 0,50\%$. Это коррелирует с изменениями в верхнем горизонте, но такое резкое изменение в нижнем слое гумусового горизонта, который не подвергался непосредственно механической обработке, сложно объяснить причинами изменения поступления органического материала из растительных остатков, где основной пул поступления органического вещества составляют корни растений (Бородина и др., 2025).

Картина распределения содержания гумуса в нижней части гумусового горизонта чернозема выщелоченного на распаханной залежи и целины близки. На распаханной залежи содержания гумуса составило $5,69 \pm 0,03\%$, $5,30 \pm 0,47\%$ и $5,58 \pm 0,39\%$ соответственно за период с 2022 по 2024 гг. На целинном участке за этот же период содержание гумуса составило $5,57 \pm 0,29\%$, $5,5 \pm 0,29\%$ и $5,29 \pm 0,52\%$. Это характеризует относительную близость экологических условий целинного участка и залежного, который только был введен в оборот (Бородина и др., 2025).

4.2 Лабильное органическое вещество

На рисунке 22 представлены результаты определения лабильного органического вещества (ЛОВ) в образцах чернозема выщелоченного по вариантам исследования (содержание ЛОВ по Ганжаре и Борисову).

В пахотном горизонте участка пашни под яровыми культурами устойчиво наблюдалось низкое содержание ЛОВ в пределах $0,38 \pm 0,09\%$ за 3 года наблюдения. Такой уровень, вероятно, являлся стабильным для чернозема выщелоченного под пашней, в условиях, сложившихся в данном хозяйстве. Возделывание многолетних трав резко увеличило поступление свежих растительных остатков в почву и величина содержания ЛОВ поднялась до $1,06 \pm 0,09\%$ что в 2,8 раза выше, чем на пашне с яровыми культурами (достоверные различия $p < 0,05$) (приложение В). На 3 год наблюдений после распашки многолетних трав и посева озимой пшеницы отмечено снижение содержания ЛОВ до уровня близкого к почве пашни под яровыми зерновыми ($0,46 \pm 0,08\%$), это снижение коррелировало со снижением

содержания гумуса в этот год. Такое изменение легкой фракции может говорить о быстрой стабилизации этой части органического вещества в условиях изменения характера возделываемой культуры. Примерно такая же картина отмечалась для участка с распаханной залежью, однако, снижение содержания ЛОВ на третий год после распашки было менее резким. На распаханной залежи содержание ЛОВ составляло $0,69 \pm 0,33\%$, $0,62 \pm 0,28\%$ и $0,39 \pm 0,12\%$ соответственно в 2022, 2023 и 2024 гг. Такое изменение может говорить о наступлении стабильного состояния по этому показателю уже на 2 год после возврата залежи в пашню. Это в свою очередь указывает на высокую чувствительность метода к различным изменениям в структуре землепользования и возделываемых культур (Бородина и др., 2025).

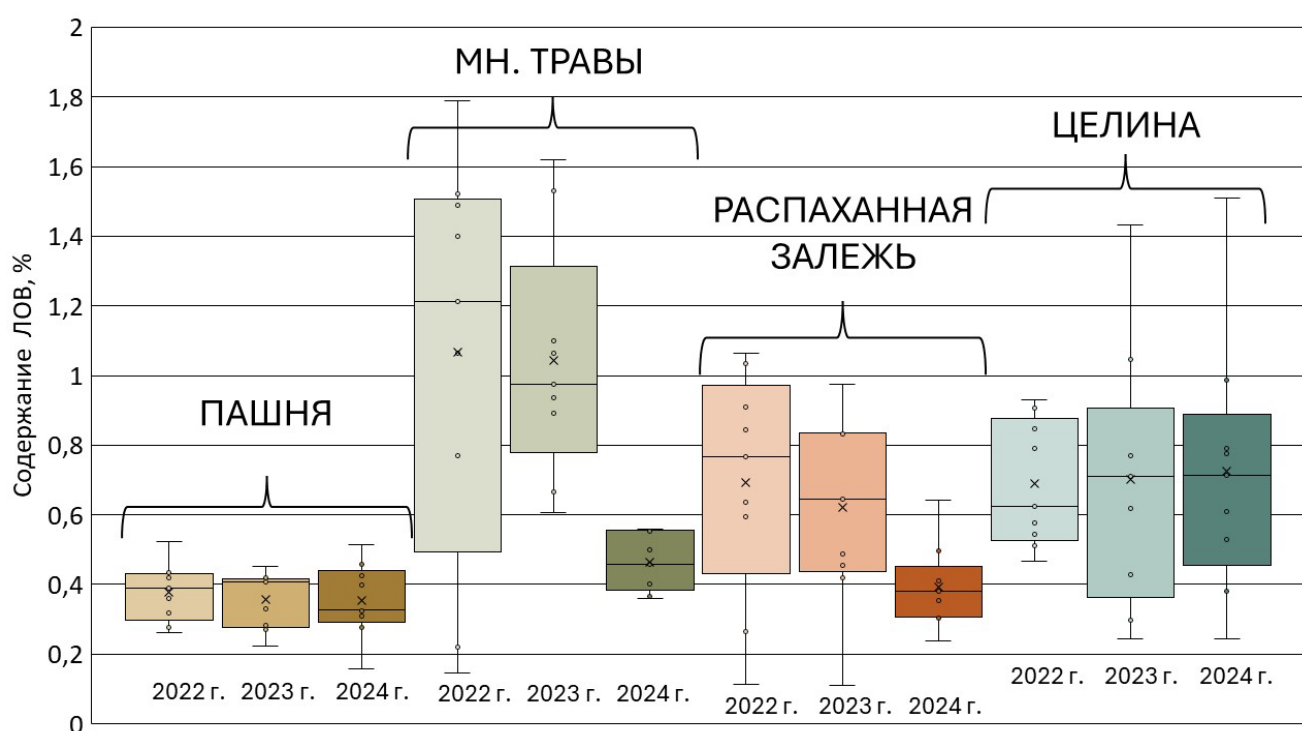


Рисунок 22 – Диаграмма распределения содержания ЛОВ (%) в верхней части гумусового горизонта (Апах 0–20 см, для целины А 5–20 см) по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

На целинном участке также наблюдалось стабильно более высокое содержание ЛОВ в течение 3 лет $0,71 \pm 0,31\%$, что в 1,9 раз выше, чем на участке пашни с яровыми зерновыми. При этом содержание ЛОВ в почве участка с многолетними травами было заметно выше, чем в целинной почве, это обусловлено

более высоким качеством травостоя сеяных многолетних трав по сравнению с разнотравным сообществом на целинном участке. Следует отметить, что при увеличении количества органических остатков, а соответственно и содержания ЛОВ, в черноземе выщелоченном отмечалось значительное повышение дисперсии этого показателя (Бородина и др., 2025).

На рисунке 23 представлены результаты определения ЛОВ в нижней части гумусового горизонта (горизонт А 20–40 см) чернозема выщелоченного по всем вариантам за 3 года наблюдений.

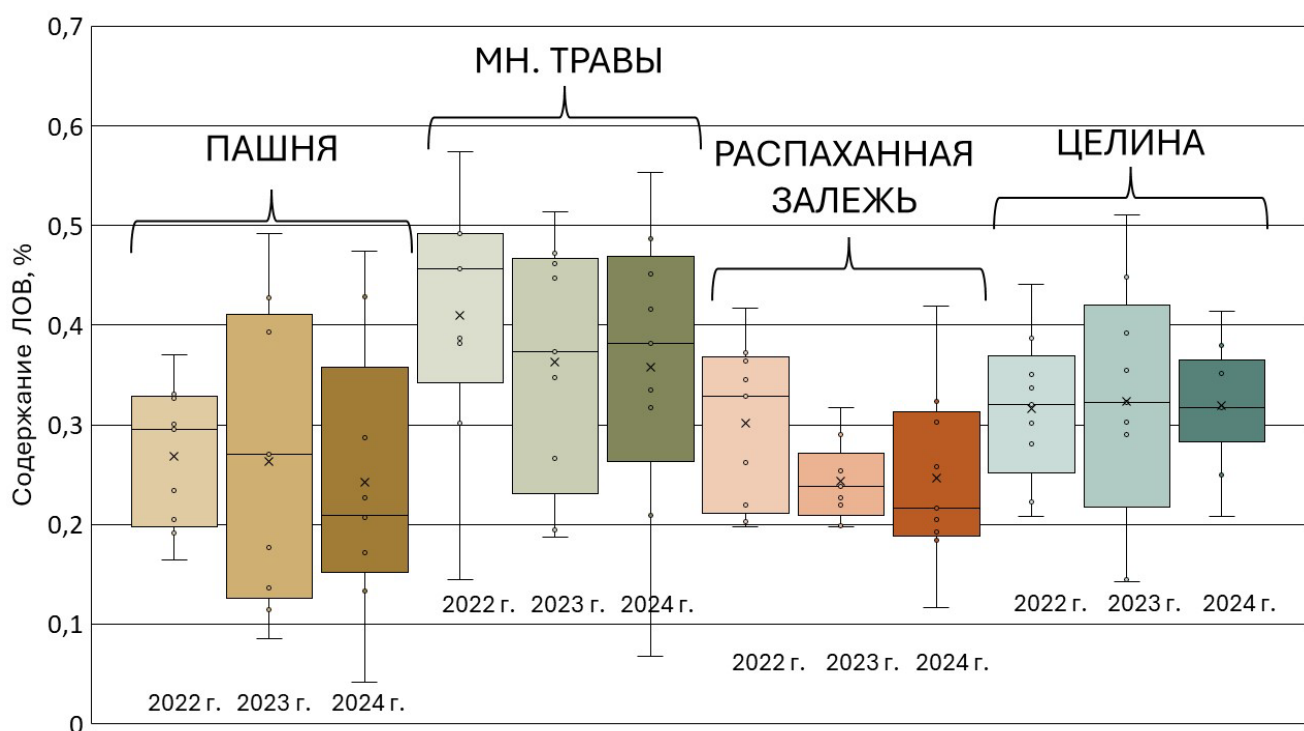


Рисунок 23 – Диаграмма распределения содержания ЛОВ (%) в нижней части гумусового горизонта (А 20–40 см) по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

Содержание ЛОВ в нижней части гумусового горизонта оказалось значительно менее чувствительным к изменению характера землепользования и за период наблюдения по вариантам не обнаружило существенных различий. Среднее содержание на пашне, участке многолетних трав, распаханной залежи и целине составило: $0,23 \pm 0,12\%$, $0,33 \pm 0,13\%$, $0,23 \pm 0,13\%$ и $0,27 \pm 0,09\%$ соответственно. По-видимому, близкие уровни накопления легкоразлагаемого органического вещества

по исследуемым вариантам землепользования обусловлены как сходным небольшим поступлением корневых остатков на таких глубинах, так и мало различающимися условиями их трансформации (Бородина и др., 2025).

4.3 Элементный состав ЛОВ

В связи с особенностью методики определения ЛОВ в образцах может обнаруживаться минеральная примесь. Поэтому для устойчивой оценки состояния лабильной фракции органического вещества почв, эффективнее перейти к содержанию углерода ЛОВ (СЛОВ). В ряде работ предлагается коэффициент пересчета ЛОВ в углерод ЛОВ 0,5, учитывая среднее содержание углерода ЛОВ в ~50% (Борисов, Ганжаоа, 2015). В работе проведено исследования образцов легкой фракции органического вещества почв после центрифугирования с помощью сканирующей микроскопии и результаты представлены в таблице 4. Графики, полученные с растрового микроскопа представлены в приложении Б.

В таблице 4 приведены массовые доли четырнадцати химических элементов (O, C, Si, Fe, Al, K, Ca, I, Ti, Na, Mg, Cl, S и P) в лабильном органическом веществе (ЛОВ) образцов почв, отобранных в 2022, 2023 и 2024 годах на четырёх участках с разным характером землепользования: пашня, распаханная залежь, участок с многолетними травами и не затронутая хозяйственной деятельностью целина. Для каждого варианта анализировали два генетических горизонта: пахотный $A_{\text{пах}}$ (0–20 см, для целины горизонт А 5–20 см) и нижняя часть гумусового горизонта А 20–40 см.

По составу ЛОВ ясно доминируют кислород и углерод: в сумме они дают до 70% массы, причём к 2024 году их доля растёт во всех вариантах, отражая возможное накопление органического вещества. Третьим по значимости элементом остаётся кремний (9,0–17,0%), более выраженный в верхней части гумусового горизонта. Железо и алюминий занимают промежуточное положение (соответственно около 5,0–8,0% и 2,4–4,0%), причём содержание железа постепенно увеличивается за три года, а алюминий остаётся неизменным. Кальций и калий держатся на уровне 1,7–5,5% и 2,0–3,0%; заметный рост кальция

фиксируется в нижней части гумусового горизонта на участке распаханной залежи и целины. Йод демонстрирует самую высокую вариабельность: от нулевых значений до всплеска в 13,3% в пахотном слое травяного участка в 2022 году. Такая вариабельность йода скорее всего связано с использованием при центрифугировании для выделения легкой фракции органического вещества тяжелой жидкости - раствора NaI и допускается, что в ряде случаев образцы могли быть недостаточно отмыты. Прочие элементы (Ti, Na, Mg, Cl, S, P) редко превышают 1,6%.

На участке пашни состав ЛОВ отличается наименьшей динамикой: массовые доли кислорода и углерода остаются стабильно высокими ($\approx 30\text{--}32\%$), а подпахотный слой лишь немного богаче кальцием. На залежи, где обработка прекращена, уже через год-два заметно увеличивается содержание кальция и железа, тогда как содержания кремния и титана демонстрируют колебания.

Участок с многолетними травами показывает наиболее резкие изменения: к 2024 году суммарная доля органогенных O + C подскочила примерно с 52% до 68%, а аномальный йодовый пик 2022 года исчез, что свидетельствует о стабилизации биогеохимических процессов под постоянным травостоем. В целине содержание O и C изначально высоко, но параллельно растут Fe и Si; в подпахотном горизонте 2024 года кальций достигает максимальных 5,5%, тогда как кремний проседает до 11,5%.

Сравнение состава ЛОВ двух горизонтов подтверждает, что в верхней части гумусового горизонта он обычно богаче кислородом и углеродом (O, C), тогда как в нижней части гумусового горизонта ЛОВ чаще обогащён кальцием, железом и частично кремнием, что объясняется вертикальной миграцией растворимых соединений. За три года наблюдений во всех вариантах проявляется общий тренд к увеличению доли органогенных элементов и относительному снижению или стабилизации минеральных компонентов, особенно на участках целины и многолетних трав.

Таблица 4 – Элементный состав лабильного органического вещества (легкой фракции)

Год	Горизонт	Содержание элемента в составе лабильного органического вещества (ЛОВ), %													
		O	C	Si	Fe	Al	K	Ca	I	Ti	Na	Mg	Cl	S	P
Пашня															
2022	A _{пах 0–20}	37,3±1,0	30,8±1,7	14,0±0,4	6,0±0,2	3,2±0,1	2,4±0,1	2,3±0,1	2,0±0,1	0,6±0,1	0,4±0,1	0,4±0,0	0,3±0,0	0,2±0,0	0,1±0,0
	A 20–40	37,5±1,1	31,7±1,9	12,8±0,4	5,9±0,2	3,0±0,1	2,4±0,1	3,3±0,1	1,5±0,1	0,6±0,1	0,4±0,1	0,3±0,0	0,3±0,0	0,2±0,0	0,1±0,0
2023	A _{пах 0–20}	36,3±1,0	30,8±1,7	15,5±0,4	6,5±0,2	3,2±0,1	2,6±0,1	2,1±0,1	1,0±0,1	0,6±0,1	0,3±0,1	0,4±0,0	0,2±0,0	0,2±0,0	0,2±0,0
	A 20–40	36,7±1,0	30,5±1,8	13,5±0,4	6,6±0,2	3,5±0,1	2,6±0,1	3,2±0,1	1,5±0,1	0,6±0,1	0,3±0,1	0,3±0,0	0,3±0,0	0,3±0,0	0,1±0,0
2024	A _{пах 0–20}	37,6±1,1	30,4±1,7	15,1±0,4	6,4±0,2	3,2±0,1	2,4±0,1	2,1±0,1	1,0±0,1	0,6±0,1	0,3±0,1	0,4±0,0	0,2±0,0	0,2±0,0	0,1±0,0
	A 20–40	38,1±1,1	28,8±1,8	13,7±0,4	6,3±0,2	3,2±0,1	3,2±0,1	3,2±0,1	0,9±0,1	0,5±0,1	0,5±0,1	0,4±0,0	0,8±0,1	0,3±0,0	0,1±0,0
Многолетние травы															
2022	A _{пах 0–20}	31,4±0,8	21,1±1,8	16,8±0,4	7,0±	4,0±0,1	2,5±0,1	1,7±0,1	13,3±0,4	–	1,0±0,1	0,4±0,1	0,2±0,0	0,2±0,0	0,2±0,0
	A 20–40	26,9±0,7	22,5±1,6	12,0±0,3	5,2±0,2	3,3±0,1	2,1±0,1	1,7±0,1	22,9±0,5	0,7±0,1	1,6±0,1	0,4±0,1	0,3±0,0	0,2±0,0	0,2±0,0
2023	A _{пах 0–20}	35,6±1,0	24,9±1,9	15,8±0,4	7,1±0,2	4,1±0,1	2,6±0,1	1,8±0,1	5,8±0,2	0,7±0,1	0,7±0,1	0,4±0,0	0,2±0,0	0,2±0,0	0,2±0,0
	A 20–40	35,0±0,9	28,7±1,6	12,9±0,3	6,3±0,2	3,4±0,1	2,9±0,1	2,4±0,1	5,6±0,2	0,7±0,1	0,7±0,1	0,4±0,0	0,6±0,0	0,2±0,0	0,2±0,0
2024	A _{пах 0–20}	38,8±1,0	29,2±1,8	13,9±0,4	7,3±0,2	3,7±0,1	2,3±0,1	2,7±0,1	0,6±0,1	0,7±0,1	0,2±0,0	0,4±0,0	0,1±0,0	0,2±0,0	0,2±0,0
	A 20–40	37,9±1,4	38,1±0,9	8,9±0,2	5,0±0,2	2,4±0,1	1,7±0,1	3,2±0,1	1,0±0,1	0,5±0,1	0,1±0,0	0,3±0,0	0,2±0,0	0,4±0,0	0,2±0,0
Распаханная залежь															
2022	A _{пах 0–20}	38,0±1,1	29,8±1,9	14,9±0,4	6,3±0,2	3,3±0,1	3,0±0,1	2,3±0,1	–	0,7±0,1	0,4±0,1	0,3±0,0	0,6±0,0	0,3±0,0	0,1±0,0
	A 20–40	36,1±1,0	27,0±1,9	14,1±0,4	6,9±0,2	3,4±0,1	2,3±0,1	4,2±0,1	3,9±0,2	0,6±0,1	0,5±0,1	0,3±0,0	0,1±0,0	0,3±0,0	0,5±0,0
2023	A _{пах 0–20}	34,8±0,9	24,2±1,9	16,3±0,4	7,0±0,2	4,0±0,1	2,6±0,1	2,2±0,1	6,5±0,2	0,7±0,1	0,7±0,1	0,4±0,0	0,2±0,0	0,2±0,0	0,1±0,0
	A 20–40	37,2±1,1	27,1±2,0	14,4±0,4	8,0±0,3	3,7±0,1	2,4±0,1	2,9±0,1	2,2±0,2	0,7±0,1	0,5±0,1	0,4±0,0	0,2±0,0	0,2±0,0	0,2±0,0
2024	A _{пах 0–20}	38,3±1,1	26,6±2,0	16,5±0,5	7,0±0,2	3,9±0,1	2,6±0,1	2,7±0,1	0,6±0,1	0,7±0,1	0,3±0,1	0,3±0,0	0,2±0,0	0,2±0,0	0,1±0,0
	A 20–40	37,3±1,1	25,0±2,0	16,3±0,5	7,8±0,3	3,9±0,1	2,8±0,1	3,4±0,1	1,4±0,1	0,7±0,1	0,4±0,1	0,4±0,0	0,1±0,0	0,3±0,0	0,3±0,0
Целина															
2022	A 5–20	31,7±0,3	26,0±0,7	11,8±0,1	5,4±0,1	3,2±0,0	2,9±0,0	2,3±0,0	13,2±0,4	0,6±0,1	1,3±0,1	0,4±0,0	0,7±0,0	0,3±0,0	0,2±0,0
	A 20–40	29,9±0,8	25,0±1,7	11,5±0,3	5,1±0,2	2,8±0,1	2,8±0,1	3,0±0,1	14,3±0,4	0,8±0,1	1,5±0,1	0,4±0,1	1,5±0,1	0,3±0,0	0,1±0,0
2023	A 5–20	38,8±1,1	25,4±1,9	15,1±0,4	8,1±0,3	4,0±0,1	2,7±0,1	2,5±0,1	1,4±0,1	0,7±0,1	0,3±0,1	0,4±0,0	0,2±0,0	0,2±0,0	0,2±0,0
	A 20–40	38,4±1,1	28,2±1,8	14,7±0,4	7,5±0,2	3,8±0,1	2,4±0,1	2,7±0,1	0,5±0,1	0,7±0,1	0,1±0,0	0,5±0,0	0,1±0,0	0,2±0,0	0,2±0,0
2024	A 5–20	37,5±1,0	28,6±1,8	14,7±0,4	7,0±0,2	3,5±0,1	2,7±0,1	3,0±0,1	0,9±0,1	0,8±0,1	0,3±0,1	0,5±0,0	0,2±0,0	0,2±0,0	0,2±0,0
	A 20–40	36,9±1,0	32,0±1,7	11,5±0,3	6,2±0,2	2,9±0,1	2,2±0,1	5,5±0,1	1,0±0,1	0,6±0,1	0,2±0,0	0,4±0,0	0,2±0,0	0,3±0,0	0,2±0,0

Таким образом, на основе полученных результатов растровой микроскопии образцов легкой фракции фиксируется чётко выраженное влияние характера землепользования на химический состав лабильного органического вещества: постоянная вспашка удерживает показатели на довольно стабильном уровне, тогда как в распаханной залежи, на многолетних травах или целине отмечается аккумуляция органогенных элементов и кальция, а также перераспределение кремния и железа. Эти данные можно использовать для количественной оценки деградации или восстановления ЛОВ почв, балансовых расчётов поступления элементов и построения моделей долгосрочного углеродного и минерального круговорота в агроландшафтах. Стоит отметить, что изменение состава ЛОВ скорее связано не с изменением характера землепользования, а изменением состава растительности в условиях исследуемых участков. Кремний в составе ЛОВ с одной стороны отражает его присутствие в составе органического вещества почв, с другой стороны может говорить о некоторых примесях минеральной части почвы при проведении анализа.

Как видно из таблицы 4, за 3 года в почве пахотного участка под яровыми культурами наблюдалось содержание углерода ЛОВ практически в $\sim 30\%$. Минимальное содержание углерода в ЛОВ составило $21,1 \pm 1,8\%$ на участке с многолетними травами в пахотном горизонте за 1-й год наблюдений, а максимальное в $38,1 \pm 1,4\%$ также на участке многолетних трав в 3-й год наблюдений в подпахотном горизонте. В среднем в верхней части профиля по всем вариантам содержание углерода в ЛОВ составило $27,3 \pm 3,1\%$, а в нижней части гумусового горизонта $28,7 \pm 4,1\%$. Таким образом имеется возможность перейти от содержания легкоразлагаемого органического вещества (ЛОВ) к содержанию собственной органического углерода в составе ЛОВ, что будет лучше отражать динамику органического материала почв.

Для уточнения пригодности растровой микроскопии для определения содержания углерода в легкой фракции органического вещества почв было проведено определение потерь при прокаливании, чтобы исключить зольные

элементы и возможную минеральную примесь в образцах органики. Результаты озоления представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Потеря при прокаливании ЛОВ по вариантам исследования

Вариант	Горизонт, глубина, см	2022 год	2023 год	2024 год
Пашня	А _{пах} 0–20	60,0%	55,2%	60,4%
	А 20–40	64,5%	31,4%	59,0%
Многолетние травы	А _{пах} 0–20	60,1%	58,4%	48,5%
	А 20–40	68,8%	63,1%	61,8%
Распаханная залежь	А _{пах} 0–20	77,0%	53,7%	57,6%
	А 20–40	57,2%	55,1%	31,0%
Целина	А 5–20	65,7%	54,7%	69,0%
	А 20–40	71,6%	65,5%	53,9%

В образцах ЛОВ участка пашни наблюдается следующая картина: в верхней части гумусового горизонта (0–20 см) показатели варьируются от 55,2% до 60,4%, демонстрируя относительно стабильную динамику с небольшим снижением в 2023 году. В нижней части гумусового горизонта (20–40 см) зафиксировано значительное колебание значений: от минимального 31,4% в 2023 году до максимального 64,5% в 2022 году.

Образцы ЛОВ участка с многолетними травами показывают постепенное снижение содержания органического вещества в верхней части гумусового горизонта: с 60,1% в 2022 году до 48,5% в 2024 году. В нижней части гумусового горизонта (20–40 см) значения остаются относительно стабильными в диапазоне 61,8–68,8%.

Образцы ЛОВ распаханной залежи демонстрируют наиболее высокие показатели в верхней части гумусового горизонта в 2022 году (77,0%), с последующим снижением до 57,6% к 2024 году. В нижней части гумусового горизонта наблюдается существенное падение содержания органического вещества в образцах ЛОВ с 57,2% до 31,0%.

Образцы ЛОВ почвы целинного участка характеризуются максимальными значениями содержания органического вещества в верхней части гумусового горизонта (5–20 см), где в 2024 году зафиксирован показатель 69,0%. В нижней

части гумусового горизонта (20–40 см) отмечается колебание значений от 53,9% до 71,6%, с пиком в 2022 году.

Общая тенденция показывает снижение содержания органического вещества в составе ЛОВ в верхней части гумусового горизонта почвы во всех исследуемых вариантах. Наиболее значительные колебания зафиксированы в образцах ЛОВ распаханной залежи и пашни. Образцы ЛОВ целины демонстрируют наибольшую вариабельность между годами исследования, особенно в верхнем горизонте. Примечательно, что во всех вариантах нижняя часть гумусового горизонта демонстрирует более стабильную динамику показателей по сравнению с верхним слоем.

После озоления образцов ЛОВ возможно перейти к содержанию углерода, принимая во внимание, что среднее содержание углерода, в потерянной органике ЛОВ после прокаливания образцов, составляет порядка 50% (Борисов, Ганжара, 2015).

После определения содержания углерода в образцах ЛОВ разными методами перейдем к сравнительной характеристике содержания углерода в образцах ЛОВ (табл. 6).

Таблица 6 – Сравнительная характеристика методики определения содержание углерода в образцах ЛОВ (%) по вариантам исследования

Горизонт (глубина, см)	2022 год			2023 год			2024 год		
	По потерям при прокалива нии	По растровой микроскоп ии	Разница по методам	По потерям при прокалива нии	По растровой микроскоп ии	Разница по методам	По потерям при прокалива нии	По растровой микроскоп ии	Разница по методам
Пашня									
A _{пах} (0–20)	0,11±0,03	0,12±0,03	0,01	0,10±0,02	0,11±0,02	0,01	0,11±0,03	0,11±0,03	0,00
A (20–40)	0,09±0,02	0,09±0,02	0,00	0,04±0,02	0,08±0,04	0,04	0,07±0,04	0,07±0,04	0,00
Многолетние травы									
A _{пах} (0–20)	0,32±0,17	0,23±0,12	0,09	0,30±0,10	0,26±0,09	0,04	0,11±0,02	0,14±0,02	0,02
A (20–40)	0,14±0,04	0,09±0,03	0,05	0,11±0,04	0,1±0,04	0,01	0,11±0,05	0,14±0,06	0,03
Распаханная залежь									
A _{пах} (0–20)	0,27±0,13	0,21±0,10	0,06	0,17±0,07	0,15±0,07	0,02	0,11±0,03	0,10±0,03	0,01
A (20–40)	0,09±0,02	0,11±0,03	0,02	0,07±0,01	0,09±0,01	0,02	0,04±0,01	0,09±0,03	0,05
Целина									
A (0–20)	0,23±0,06	0,18±0,05	0,05	0,19±0,1	0,18±0,09	0,01	0,25±0,13	0,21±0,11	0,04
A (20–40)	0,11±0,03	0,09±0,02	0,03	0,11±0,04	0,12±0,05	0,02	0,09±0,02	0,12±0,02	0,03

Представленные в таблице 6 данные отражают сравнительный анализ содержания углерода в образцах ЛОВ по вариантам исследования, определённый двумя методиками: по потере при прокаливании и по результатам растровой микроскопии.

В образцах ЛОВ пашни наблюдается относительно стабильная картина. В верхней части гумусового горизонта (0–20 см) содержание углерода по методу прокаливании варьировало от 0,10% до 0,11% с погрешностью 0,02–0,03%. Значения, полученные методом растровой микроскопии, находились в диапазоне 0,11–0,12% при схожей погрешности. Разница между методами составляла 0,00–0,01%. В нижней части гумусового горизонта (20–40 см) отмечалось более значительное колебание показателей: от 0,04% до 0,09% по методу прокаливании и от 0,07% до 0,09% по растровой микроскопии.

На участке под многолетними травами более высокие значения содержания углерода ЛОВ. В верхней части гумусового горизонта показатели по методу прокаливании варьировали от 0,11% до 0,32%, а по растровой микроскопии – от 0,14% до 0,23%. Разница между методами достигала 0,09%. В нижней части гумусового горизонта (20–40 см) содержание углерода составляло 0,11–0,14% по прокаливанию и 0,09–0,14% по микроскопии.

Образцы ЛОВ распаханной залежи характеризовались промежуточными значениями. В верхней части гумусового горизонта содержание углерода ЛОВ снижалось с 0,27% до 0,11% по методу прокаливании и с 0,21% до 0,10% по растровой микроскопии. В нижней части гумусового горизонта показатели варьировали от 0,04% до 0,09% по прокаливанию и от 0,09% до 0,11% по микроскопии.

Образцы ЛОВ целины демонстрировали следующую динамику. В верхней части гумусового горизонта содержание углерода по методу прокаливании варьировало от 0,19% до 0,25%, а по растровой микроскопии — от 0,18% до 0,21%. В нижней части гумусового горизонта показатели находились в диапазоне 0,09–0,12% по обоим методам.

Анализ различий в результатах, полученных сравнимыми, методами показывает, что наибольшие расхождения наблюдались в образцах многолетних трав (до 0,09%), тогда как для пахотных почв различия минимальны (0,00–0,01%). Во всех исследуемых вариантах прослеживается тенденция к снижению содержания углерода ЛОВ в верхней части гумусового горизонта почвы с 2022 по 2024 год, при этом в нижней части гумусового горизонта характерна более стабильная динамика углерода ЛОВ.

Стабильность показателей особенно характерна для почвы участка пашни. В целом переход к углероду ЛОВ показывает тренды, схожие с теми, которые были отмечены для содержания ЛОВ. Разница в полученных показателях по углероду ЛОВ по потерям при прокаливании и по растровой микроскопии в целом минимальна. Наибольшая разница в 0,09, которая наблюдается в образцах ЛОВ под с участка многолетних трав за 2022 год может быть связана в значительной степени с локальными особенностями образца. В остальном разница не превышает величин стандартного отклонения. Таким образом растровая микроскопия подходит для изучения ЛОВ, определения в ней содержания углерода и дает более развернутую картину по элементному составу. Однако необходимо уделить особое внимание тщательности отмывки органических остатков от тяжелой жидкости.

4.4 Перманганат-окисляемый углерод

Активный углерод (РОХС) является важным показателем состояния почвы. Его уровень определяется методом окисления перманганата, что позволяет оценить лабильность, качество и микробное разложение органического углерода (Oliveira et al., 2022; Курманбаев и Cyndet, 2023; Бородина и др., 2024; Бородина, 2024). Этот метод становится всё более популярным благодаря своей экономичности, быстрому проведению анализа и высокой надёжности благодаря стандартизации (Jones, 2023; Tripolskaja, 2024; Прохоров, 2024). Он помогает оценить активный пул почвенного органического углерода и разработать стратегии землепользования, направленные на сохранение или увеличение его содержания (Hurriso et al., 2016).

Для качественной оценки содержания перманганат-окисляемого углерода почв используем шкалу, приведённую в таблице 7 (Vanek, Fonte and Magonziwa, 2020).

Таблица 7 – Оценка почв по содержанию «активного углерода» или перманганат-окисляемого углерода (РОХС) (Vanek, Fonte and Magonziwa, 2020)

Диапазоны РОХС (мг/кг)	Уровень содержания РОХС
<250	Очень низкий
250–400	Низкий
400–600	Средний
600–1000	Высокий
>1000	Очень высокий

Очень низкий уровень перманганат-окисляемого углерода (<250 мг/кг) характеризует почвы, которые в течение многих лет не получали существенного количества органических остатков, или те, где из-за эрозии значительно обнажены нижние горизонты почв вплоть до почвообразующей породы. Эти значения также чаще встречаются в хорошо прогреваемых почвах с легким гранулометрическим составом (песчаных), где органические остатки быстро разлагаются и где имеется большое количество крупных механических элементов, которые разбавляют показания органического вещества.

Низкий уровень перманганат-окисляемого углерода (400–600 мг/кг) указывает, что почва нуждается в поступлении и переработке органического вещества для лучшей поддержки микробиоты, удержания воды и формирования структуры почвы. (Vanek, Fonte and Magonziwa, 2020)

Средний уровень перманганат-окисляемого углерода (400–600 мг/кг). Вероятно, доступное органическое вещество поддерживает хорошее функционирование микробиологического круговорота питательных веществ, способность удерживать воду и т.д. Эти показатели могут также наблюдаться в почвах с тяжелым гранулометрическим составом, которые накапливают больше углерода, даже если содержание органического вещества в почве не оптимально. Напротив, в песчаных почвах этот диапазон значений уже может указывать на

очень высокий уровень содержания органического углерода. (Vanek, Fonte and Magonziwa, 2020)

Высокий уровень перманганат-окисляемого углерода (600–1000 мг/кг). Почва либо содержит большое количество остаточного органического вещества, накопившегося в результате образования лесных подстилок, и/или были предприняты значительные усилия по внесению в эти почвы растительных остатков и органических удобрений. (Vanek, Fonte and Magonziwa, 2020)

Очень высокий уровень перманганат-окисляемого углерода (>1000 мг/кг). Такой уровень характерен для приусадебных участков и огородов с интенсивным удобрением или компостированием, на почвах, недавно перешедших из лесного хозяйства, или на торфяных почвах в горной местности. Такой уровень можно считать хорошим для многих видов сельскохозяйственных культур, но он редко может быть достигнут на более обширных пахотных угодьях, где поступление органических остатков в почву ограничено. (Vanek, Fonte and Magonziwa, 2020)

На рисунке 24 представлены результаты определения РОХС в верхней части почвы.

В образцах пашни зафиксировано постепенное увеличение содержания РОХС: с 954 ± 204 мг/кг в 2022 году до 1055 ± 220 мг/кг в 2024 году. При этом отмечается тенденция к стабилизации показателя с минимальным отклонением в 2023 году (1032 ± 163 мг/кг). Почвы под многолетними травами демонстрируют относительно стабильную динамику с незначительными колебаниями: от 1019 ± 164 мг/кг в 2022 году до 1046 ± 209 мг/кг в 2024 году. Значения 2023 года (1029 ± 230 мг/кг) находятся в пределах среднего диапазона. Образцы распаханной залежи характеризуются наиболее выраженной вариабельностью показателей. В 2022 году зафиксировано максимальное значение 1042 ± 180 мг/кг, которое снизилось до 984 ± 175 мг/кг в 2023 году, а затем увеличилось до 1110 ± 171 мг/кг в 2024 году. На целинном участке наблюдается снижение содержания РОХС с 1120 ± 189 мг/кг в 2022 году до 1008 ± 198 мг/кг в 2023 году, после чего наблюдается незначительное повышение до 1028 ± 140 мг/кг в 2024 году.

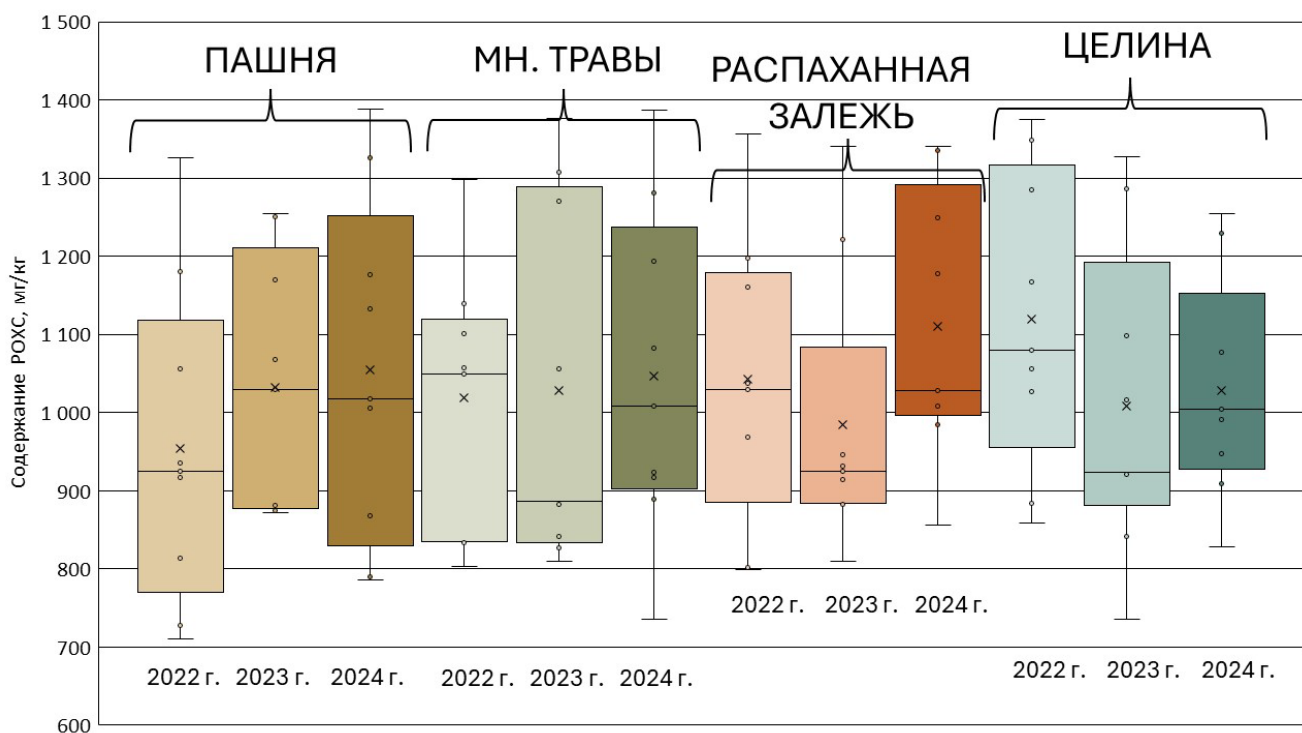


Рисунок 24 – Диаграмма распределения РОХС (мг/кг) в верхней части гумусового горизонта (Апах 0–20 см, для целины А 5–20 см) по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

Анализ погрешностей показывает, что наиболее стабильные результаты получены для целинных образцов в 2024 году (140 мг/кг), тогда как максимальные отклонения зафиксированы для пашни в 2022 году (204 мг/кг) и многолетних трав в 2023 году (230 мг/кг).

Общая тенденция свидетельствует о преобладании положительных изменений содержания РОХС во всех исследуемых типах почв, за исключением начального периода для целинных образцов. Наибольшая вариабельность показателей характерна для распаханной залежи, что может быть связано с особенностями агротехнического воздействия.

Значения «активного углерода» РОХС для верхней части гумусового горизонта по вариантам землепользования не имеют ярко выраженных различий. Нет достоверных различий ни по одному из вариантов. В отличие от проведенного анализа содержания ЛОВ по Ганжаре и Борисову, который показал достоверное снижение ЛОВ на 3-й год после распахки многолетних трав, метод перманганат-

окисляемого углерода не оказался чувствительным к изменению такого варианта землепользования. Также метод не показал чувствительности к уровням содержания «активного углерода» при возврате залежи в пашню за трёхлетний период. Таким образом уровень РОХС по всем вариантам за трёхлетний период был практически идентичным, а метод не показал чувствительности к вариантам землепользования.

Оценка по предложенной выше шкале говорит в основном об очень высоком и высоком уровнях содержания перманганат-окисляемого углерода во всех исследуемых вариантах почв, что свидетельствует о высоком уровне деятельности микробных сообществ и высоком содержании легкодоступного органического вещества на черноземах выщелоченных.

Рассмотрим результаты по определению РОХС, полученные для нижней части гумусового горизонта чернозема выщелоченного (рис. 25). В образцах пашни наблюдалась тенденция к снижению содержания РОХС: с 833 ± 81 мг/кг в 2022 году до 715 ± 51 мг/кг в 2024 году. При этом отмечается значительное снижение показателя в 2023 году (726 ± 45 мг/кг), что может свидетельствовать о временных изменениях в углеродном цикле почвы с участием микробиоты. Почвы под многолетними травами демонстрируют менее выраженную динамику. В 2022 году зафиксировано значение 813 ± 123 мг/кг, которое увеличилось до 852 ± 69 мг/кг в 2023 году, после чего снизилось до 760 ± 128 мг/кг в 2024 году. Здесь наблюдалась наибольшая вариабельность показателей среди всех исследуемых вариантов.

Образцы распаханной залежи характеризовались относительно стабильным РОХС с небольшими колебаниями: от 849 ± 103 мг/кг в 2022 году до 791 ± 95 мг/кг в 2024 году. Значения 2023 года (821 ± 110 мг/кг) находятся в пределах среднего диапазона.

Целинные образцы демонстрировали минимальную динамику показателей. В 2022 году зафиксировано 766 ± 85 мг/кг, в 2023 году отмечено незначительное снижение до 760 ± 95 мг/кг, после чего произошло небольшое повышение до 773 ± 107 мг/кг в 2024 году.

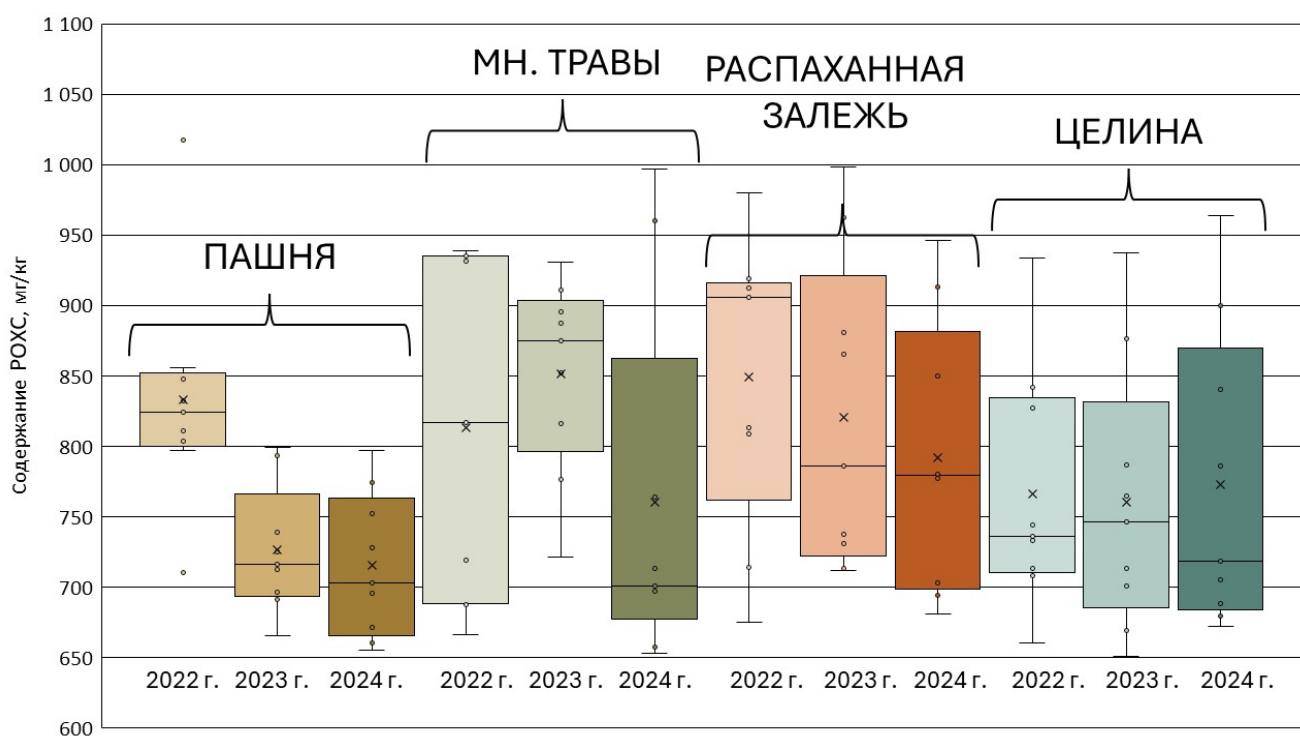


Рисунок 25 – Диаграмма распределения РОХС (мг/кг) в нижней части гумусового горизонта (А 20–40 см) по вариантам земледелия на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

Анализ погрешностей показывает, что наиболее стабильные результаты получены для пашни в 2023 году (45 мг/кг), тогда как максимальные отклонения зафиксированы для многолетних трав в 2024 году (128 мг/кг).

Общая тенденция свидетельствует о преобладании отрицательных изменений содержания РОХС во всех исследуемых типах почв, за исключением целинных образцов в 2024 году. Наибольшая стабильность показателей характерна для целинных участков, что подтверждает их более естественное состояние углеродного цикла.

Ожидаемо для нижележащей части гумусового горизонта также отсутствует статистически значимые различия в уровнях содержания РОХС по годам и вариантам. Нет разницы по уровням содержания активного углерода в нижней части гумусового горизонта чернозема выщелоченного при возврате залежи в пашню за трёхлетний период.

Однозначно можно отметить различия между содержанием РОХС в верхней и нижней частях гумусового горизонта, которые составили практически ~ 250 мг/кг. Для верхней части гумусового горизонта чернозема выщелоченного по всей совокупности определений содержание РОХС составило 1035 ± 183 мг/кг, а для нижней части 788 ± 99 мг/кг, что соответствует высокому уровню содержания перманганат-окисляемого углерода.

Таким образом, можно сделать вывод, что для чернозема выщелоченного тяжелосуглинистого лесостепной зоны в плакорных агроэкологических условиях, содержание РОХС в среднем составляло 1035 ± 183 мг/кг, что характеризует очень высокий уровень его содержания и хорошее качественное состояние почв по этому показателю. Метод определения РОХС в данных условиях оказался нечувствительным к вариантам землепользования. Можно предположить, что это связано либо с действительно отсутствием качественного различия между вариантами землепользования, в том числе при переходе чернозема выщелоченного из залежного состояния в пашню, и действительно качественно-высокий уровень содержания активного углерода в черноземах выщелоченных Тульской области или же действительно в принципе характерное для черноземов высокое содержание органического углерода при стандартном выполнении метода недостаточно чувствительно к его динамике. Первое предполагается менее вероятным, поскольку определение ЛОВ по Ганжаре и Борисову показало значимые результаты по вариантам землепользования. Для решения возможно второй, предполагаемой проблемы, необходимо стандартизировать метод для черноземных почв и использовать для идентификации различий, в зависимости от землепользования, более высокую концентрацию перманганата калия, как было сделано, например для австралийских почв (Edward и др., 2023).

4.5 Сравнительная характеристика содержания углерода разных форм органического вещества

Проведем обобщающий анализ состояния органического вещества с точки зрения содержания органического углерода, что является наиболее актуальным

вопросом в современных условиях глобального и национального мониторинга пулов и потоков климатически активных веществ, где важное место занимает вопрос динамики почвенного органического углерода (Бородина, Минаев, 2024).

В таблице 8 приведены данные по процентному содержанию углерода гумуса, перманганат-окисляемого углерода и углерода лабильного органического вещества по методу Н.Ф. Ганжары и Б.А. Борисова.

В верхней части гумусового горизонта пашни (0–20 см) наблюдается постепенное увеличение содержания углерода гумуса с $3,48 \pm 0,10\%$ в 2022 году до $3,54 \pm 0,16\%$ в 2024 году. При этом показатели перманганат-окисляемого углерода остаются стабильными на уровне 0,10–0,11%, а содержание углерода лёгкой фракции органического вещества демонстрирует незначительное снижение с 0,12% до 0,11%. В нижней части гумусового горизонта (20–40 см) отмечается тенденция к снижению содержания углерода гумуса с 3,45% до 3,06%, при относительно стабильных показателях перманганат-окисляемого углерода (0,07–0,08%) и углерода лёгкой фракции (0,07–0,09%).

В верхней части гумусового горизонта почв под многолетними травами (0–20 см) зафиксировано снижение содержания углерода гумуса с 4,13% до 3,5%, при стабильных показателях перманганат-окисляемого углерода (0,10%) и колебаниях содержания углерода лёгкой фракции от 0,23% до 0,14%. В нижней части гумусового горизонта (20–40 см) содержание углерода гумуса демонстрирует снижение с 3,49% до 2,77%, при относительно стабильных показателях перманганат-окисляемого углерода (0,08–0,09%) и некотором увеличении содержания углерода лёгкой фракции до 0,14% в 2024 году.

В верхней части гумусового горизонта почвы распаханной залежи (0–20 см) отмечается снижение содержания углерода гумуса с 4,31% до 4,05%, при стабильных показателях перманганат-окисляемого углерода (0,10–0,11%) и уменьшении содержания углерода лёгкой фракции с 0,21% до 0,10%. В нижней части гумусового горизонта (20–40 см) содержание углерода гумуса демонстрирует колебания в пределах 3,08–3,30%, при стабильных показателях перманганат-окисляемого углерода (0,08%) и углерода лёгкой фракции (0,09–0,11%).

Таблица – 8 Содержание различных форм органического углерода (%) в черноземе выщелоченном при разных типах землепользования за период с 2022 по 2024 годы

Горизонт (глубина, см)	2022 год			2023 год			2024 год		
	Углерод гумуса	Перманганат-окисляемый углерод	Углерод легкой фракции органического вещества	Углерод гумуса	Перманганат-окисляемый углерод	Углерод легкой фракции органического вещества	Углерод гумуса	Перманганат-окисляемый углерод	Углерод легкой фракции органического вещества
Пашня									
A _{пах} (0–20)	3,48±0,10	0,10±0,02	0,12±0,03	3,52±0,15	0,10±0,02	0,11±0,02	3,54±0,16	0,11±0,02	0,11±0,03
A (20–40)	3,45±0,29	0,08±0,01	0,09±0,02	3,38±0,26	0,07±0,01	0,08±0,04	3,06±0,31	0,07±0,01	0,07±0,04
Многолетние травы									
A _{пах} (0–20)	4,13±0,16	0,10±0,02	0,23±0,12	4,06±0,28	0,10±0,02	0,26±0,09	3,5±0,25	0,10±0,02	0,14±0,02
A (20–40)	3,49±0,17	0,08±0,01	0,09±0,03	3,51±0,26	0,09±0,01	0,10±0,04	2,77±0,29	0,08±0,01	0,14±0,06
Распаханная залежь									
A _{пах} (0–20)	4,31±0,11	0,10±0,02	0,21±0,10	4,13±0,09	0,10±0,02	0,15±0,07	4,05±0,19	0,11±0,02	0,10±0,03
A (20–40)	3,3±0,18	0,08±0,01	0,11±0,03	3,08±0,27	0,08±0,01	0,09±0,01	3,24±0,23	0,08±0,01	0,09±0,03
Целина									
A (0–20)	3,87±0,18	0,11±0,02	0,18±0,05	3,85±0,16	0,10±0,02	0,18±0,09	3,88±0,15	0,10±0,01	0,21±0,11
A (20–40)	3,23±0,17	0,08±0,01	0,09±0,02	3,19±0,17	0,08±0,01	0,12±0,05	3,07±0,30	0,08±0,01	0,12±0,02

В верхней части гумусового горизонта почвы целины (0–20 см) наблюдается высокая стабильность содержания углерода гумуса (3,85–3,88%), при стабильных показателях перманганат-окисляемого углерода (0,10–0,11%) и колебаниях содержания углерода лёгкой фракции от 0,18% до 0,21%. В нижней части гумусового горизонта (20–40 см) отмечается некоторое снижение содержания углерода гумуса с 3,23% до 3,07%, при стабильных показателях перманганат-окисляемого углерода (0,08%) и увеличении содержания углерода лёгкой фракции до 0,12% в 2024 году.

Анализ погрешностей показывает наибольшую стабильность показателей в целинной почве и распаханной залежи. Во всех почвенных разностях отмечается общая тенденция к снижению содержания углерода в нижней части гумусового горизонта, тогда как верхняя часть демонстрирует более стабильную динамику.

Наибольшие колебания показателей наблюдаются в почвах под многолетними травами, что может быть связано с особенностями их биологического круговорота.

Наибольшие потери лабильного углерода происходят в распаханых почвах, тогда как на целинном участке демонстрируется устойчивость или накопление. Перманганат-окисляемый углерод оставался стабильным независимо от типа землепользования. Углерод легкой фракции органического вещества наиболее чувствителен к антропогенному воздействию. Распашка приводит к значительному снижению углерода лабильного органического вещества. Многолетние травы и целина способствуют сохранению органического вещества.

Содержание перманганат окисляемого углерода и углерода легкой фракции имеют схожий порядок значений. В ряде вариантов углерод лёгкой фракции органического вещества почти в 2 раза выше перманганат окисляемого углерода. Очевидно, что это не тождественные показатели несмотря на свою близость, но часть углерода лабильного органического вещества определяется при определении перманганатным методом. С другой стороны, как уже отмечалось ранее, есть предположение, что ввиду особенности метода, перманганат за время экспозиции не успевает окислить всю легкую фракцию органического вещества, затрагивая наиболее активную ее часть и вероятно другую часть органического вещества почв с наиболее «активной» периферийной частью. Чувствительность метода при содержании перманганат-окисляемого углерода выше 1000 мг/кг почвы значительно снижается для почв богатых органическим веществом, которыми являются черноземы.

ГЛАВА 5. СТРУКТУРНОЕ СОСТОЯНИЕ ЧЕРНОЗЕМА ВЫЩЕЛОЧЕННОГО ПРИ РАЗНОМ ХАРАКТЕРЕ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ

5.1 Агрегатный анализ по методу Н.И. Саввинова

Для проведения оценки структуры почвы по методу Н.И. Саввинова образцы почвы отбирались из тех же точек. По каждому варианту отобрано по 3 образца массой по 2–2,5 кг, сводные результаты сухого и мокрого просеивания которых представлены далее (Бородина, Козюлина, 2023; Бородина и др., 2026).

Представленные в таблице 9 данные отражают результаты сухого агрегатного анализа верхней части гумусового горизонта чернозема выщелоченного при различных вариантах землепользования за период 2022–2024 гг. (Бородина и др., 2026).

Таблица 9 – Сухой агрегатный анализ верхней части гумусового горизонта (Апах 0–20 см, для целины А 5–20 см) чернозема выщелоченного по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

Год	Содержание агрегатов, % от массы воздушно-сухой почвы, размером, мм									Кстр.	Содержание агрегатов 0,25–10 мм, %	Оценка
	> 10	10–7	7–5	5–3	3–2	2–1	1–0,5	0,5–0,25	< 0,25			
Пашня												
2022	24,1	6,3	7,0	14,9	4,9	20,5	12,0	4,2	6,1	2,3	69,8	хорошее
2023	39,5	10,5	8,5	12,0	4,5	14,5	7,5	2,0	1,0	1,5	59,5	удовл,
2024	27,9	6,6	8,9	16,4	6,0	14,2	11,0	5,3	3,7	2,2	68,4	хорошее
Многолетние травы												
2022	13,5	10,4	12,1	20,6	5,5	18,1	9,0	4,9	5,9	4,2	80,6	отличное
2023	6,0	8,0	14,0	27,0	8,0	22,0	10,0	3,0	2,0	11,5	92,0	отличное
2024	29,3	8,5	10,1	17,7	4,5	18,1	7,2	2,8	1,8	2,2	68,9	хорошее
Распаханная залежь												
2022	21,8	10,5	10,4	18,6	7,1	20,6	7,3	2,0	1,7	3,3	76,5	хорошее
2023	9,8	7,5	9,7	21,5	6,7	21,9	13,2	6,7	3,0	6,8	87,2	отличное
2024	23,5	10,1	10,6	18,2	6,2	15,6	8,6	4,2	3,0	2,8	73,5	хорошее
Целина												
2022	15,6	14,5	17,2	23,4	6,2	12,6	5,0	2,8	2,7	4,5	81,7	отличное
2023	16,0	12,5	15,0	22,1	6,5	14,5	7,2	4,2	2,0	4,6	82,0	отличное
2024	13,7	10,6	16,8	26,3	7,4	14,5	6,2	2,5	2,0	5,4	84,3	отличное

На пашне наблюдалась следующая динамика распределения агрегатов: в 2022 году преобладали агрегаты размером 0,25–10 мм (69,8%), при этом доля крупных агрегатов (>10 мм) составляла 24,1%. К 2023 году произошло увеличение количества крупных агрегатов до 39,5%, однако общее содержание агрономически ценных агрегатов снизилось до 59,5% (оценка «удовлетворительно»). К 2024 году показатели стабилизировались: содержание крупных агрегатов снизилось до 27,9%, а доля ценных агрегатов возросла до 68,4% (оценка «хорошее»).

В верхней части гумусового горизонта под многолетними травами зафиксировано наиболее благоприятное распределение агрегатов. В 2022 году содержание агрономически ценных агрегатов достигало 80,6% (оценка «отличное»), с преобладанием средних фракций. В 2023 году показатели улучшились до 92,0% (оценка «отличное»), а к 2024 году произошло некоторое снижение до 68,9% (оценка «хорошее»), что связано с распашкой многолетних трав и заменой их на озимую пшеницу.

На распаханной залежи отмечалось относительно стабильное состояние структуры. В 2022 году содержание ценных агрегатов составляло 76,5% (оценка «хорошее»). В 2023 году зафиксирован максимум — 87,2% (оценка «отличное»), после чего к 2024 году показатель снизился до 73,5% (оценка «хорошее»).

На целинном участке наблюдалось наилучшее структурное состояние почвы. Во все годы исследования содержание агрономически ценных агрегатов находилось на уровне 81,7–84,3% (оценка «отличное»), с преобладанием средних и крупных фракций.

Анализ динамики показывает, что наиболее стабильное структурное состояние характерно для целинных участков, где сохраняется высокое содержание ценных агрегатов. На пашне наблюдается наибольшая вариабельность показателей, что связано с антропогенным воздействием. Почвы под многолетними травами демонстрируют высокую способность к восстановлению структуры, несмотря на колебания показателей.

Из приведенных данных (табл. 9) можно наблюдать, что в почве пашни коэффициент структурности с 2022 по 2024 г. имел наиболее низкие значения 2,3,

1,5 и 2,2 соответственно. Также коэффициент структурности в 2,2 составил на 3 год на участке с многолетними травами, где на 3 год была уже озимая пшеница, что наглядно показывает влияние механической обработки на структурное состояние. При рассмотрении участков с многолетними травами наблюдался высокий коэффициент структурности в период с 2022 по 2023 год, собственно под многолетними травами до их распашки, и составляет 4,2 и 11,5 соответственно, что говорит о значительном влиянии многолетних трав на поддержание хорошего структурного состояния почв в севообороте.

Стабильно высокий коэффициент структурности наблюдался на целинном участке, где он составил 4,5–5,4 за 3 года наблюдений. Также отмечается высокий процент агрономически ценных агрегатов и стабильно отличная оценка структурного состояния по данному критерию, что подтверждает качественное структурное состояние чернозема выщелоченного в этих условиях.

Участок, введенный в севооборот в 2022 году из залежного состояния, в этом году имел хорошее структурное состояние и более высокий коэффициент структурности, чем на пашне, но ниже, чем на целинном участке, что вероятно связано со спецификой отбора в 1 года — образцы были отобраны сразу после распашки целинного участка, где сформировался «свально–развальный» микрорельеф. На 2 год структурное состояние стабилизировалось и агрегатный анализ показал высокий коэффициент структурности в 6,8 и отличную оценку структурного состояния, даже выше, чем у целинного участка. На 3 год использования структурное состояние приблизилось к показателям пашни и коэффициент структурности был уже 2,2.

Таким образом можно сделать заключение, что при отсутствии обработки выщелоченного чернозема в верхней части гумусового горизонта складывалось отличное структурное состояние и содержание агрономически ценных агрегатов составило порядка 82–85%, а при введении его в сельскохозяйственное использование и распашки на 3 год происходит снижение содержания агрономически ценных агрегатов практически на 10% до уровня пашни. Однако использование многолетних трав в севообороте поднимает уровень структурного

состояния до целинного и таким образом позволяет поддерживать высокий уровень агрокультуры и стабильно хорошее структурное состояние.

Представленные в таблице 10 данные отражают результаты мокрого агрегатного анализа верхней части гумусового горизонта чернозема выщелоченного при различных вариантах землепользования за период 2022–2024 гг. (Бородина и др., 2026)

Таблица 10 – Мокрый агрегатный анализ верхней части гумусового горизонта (Апах 0–20 см, для целины А 5–20 см) чернозема выщелоченного по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

Год	Содержание агрегатов, % от массы воздушно-сухой почвы, размером, мм						Содержание агрегатов 0,25–10 мм, %	Оценка
	5–3	3–2	2–1	1–0,5	0,5–0,25	< 0,25		
Пашня								
2022	1,7	9,4	10,1	30,6	16,6	31,6	68,4	хорошее
2023	1,3	6,8	5,2	27,4	14,6	44,8	55,2	хорошее
2024	7,1	10,3	10,0	28,1	14,4	30,1	69,9	хорошее
Многолетние травы								
2022	9,8	7,5	7,0	26,6	21,9	27,2	72,8	отличное
2023	8,8	9,6	9,8	28,2	18,8	24,8	75,2	отличное
2024	10,8	9,4	8,1	37,1	13,5	21,1	78,9	отличное
Распаханная залежь								
2022	13,8	15,2	11,5	19,1	17,3	23,1	76,9	отличное
2023	13,7	15,0	10,4	22,1	16,5	22,3	77,7	отличное
2024	14,9	12,9	8,3	21,3	18,4	24,1	75,9	отличное
Целина								
2022	25,7	13,7	9,3	24,7	13,7	12,9	87,1	отличное
2023	27,1	16,7	15,1	19,6	9,5	12,0	88,0	отличное
2024	32,2	19,6	20,9	14,4	6,1	6,7	93,3	отличное

На пашне наблюдается следующая динамика распределения водопрочных агрегатов: в 2022 году доля агрегатов размером 0,25–10 мм составляла 68,4% (оценка «хорошее»). В 2023 году произошло снижение содержания ценных агрегатов до 55,2% за счёт увеличения фракции менее 0,25 мм до 44,8%. К 2024 году показатели улучшились: содержание агрегатов 0,25–10 мм возросло до 69,9% при снижении фракции менее 0,25 мм до 30,1%.

Под многолетними травами зафиксировано стабильно высокое содержание водопрочных агрегатов. В 2022 году доля агрегатов 0,25–10 мм составляла 72,8% (оценка «отличное»). В 2023 году показатель увеличился до 75,2%, а к 2024 году достиг максимума — 78,9% за счёт увеличения средних фракций 1–2 мм и 2–3 мм.

На распаханной залежи отмечалось относительно стабильное состояние водопрочной структуры. Во все годы исследования содержание агрегатов 0,25–10 мм находилось в пределах 75,9–77,7% (оценка «отличное»), с преобладанием средних и крупных фракций. Наблюдалась тенденция к увеличению доли крупных агрегатов 5–3 мм.

На целинном участке зафиксирован наивысший уровень водопрочности структуры. В 2022 году содержание агрегатов 0,25–10 мм составляло 87,1%, в 2023 году показатель увеличился до 88,0%, а к 2024 году достиг максимума — 93,3% (оценка «отличное») за счёт значительного роста доли крупных агрегатов 5–3 мм и 3–2 мм.

Оценка структурного состояния по водопрочным агрегатом оказалась более показательной. Более четко прослеживается качественно высокий уровень структуры почвы на целинном участке в верхней части гумусового горизонта. За 3 года содержание водопрочных агрономически ценных агрегатов составило порядка 87–94%. В условиях пашни водопрочные агрегаты составили менее 70%. На участке обработанной залежи уже в 1 год после распашки содержание водопрочных агрегатов ниже, чем на целинном участке, что вероятно связано с прямым разрушением структуры в целом под воздействием механической обработки почвы и минерализации органического вещества. На участке с многолетними травами также наблюдался отличный уровень содержания водопрочных агрегатов, в том числе и в 3-й год после распашки трав сохранялся отличный уровень содержания водопрочных агрегатов. Наиболее выражено наблюдалось различие во фракционном составе водопрочных агрегатов. Так на целинном участке наблюдалось высокое процентное содержание водопрочных агрегатов фракции 5–3 мм на уровне порядка 25–30% и в целом, соотношение было смещено в сторону более крупных фракций водопрочных агрегатов. В пашне,

напротив, несмотря на в целом хорошую оценку содержания водопрочных агрегатов, фракция 5–3 мм имела небольшое содержание и баланс фракционного состава был явно смещен в сторону более мелких водопрочных агрегатов. Возделывание многолетних трав позволяет несколько улучшить водопрочность более крупных агрегатов и соотношение фракций агрегатов несколько смещается в сторону средних размеров, увеличивается доля агрегатов размером 1,0–0,5 и 0,5–0,25 мм. Почва участка введенной в оборот залежи при мокром просеивании показала заметно более качественную структуру по сравнению с пашней и участком с многолетними травами. За 3-х летний период сохранялся высокий процент водопрочных агрегатов фракций 5–3 и 3–2 мм, несмотря на общее снижение фракции 5–3 мм в сравнении с целинным участком. Отмечается, что чернозем выщелоченный после введения в оборот из залежного состояния как минимум в течении 3-х лет сохраняет отличное структурное состояние по водопрочным агрегатам и соответственно большую устойчивость к механическому воздействию орудиями основной обработки почвы.

Использование почв в сельскохозяйственном обороте, особенно в пашне при постоянной обработке почвы должно оказывать влияние не только на пахотный горизонт, но и на нижележащий слой. Это воздействие наиболее часто выражается, например в формировании так называемой «плужной подошвы». Рассмотрим структурное состояние чернозема выщелоченного на исследуемых участка в подпахотном горизонте, который, как правило, при достаточной мощности составляет нижнюю часть гумусового горизонта.

Представленные данные в таблице 11 отражают результаты сухого агрегатного анализа нижней части гумусового горизонта чернозема выщелоченного при различных вариантах землепользования за период 2022–2024 гг. (Бородина и др., 2026)

На пашне наблюдалось относительно стабильное распределение агрегатов. В 2022 году доля агрегатов крупнее 10 мм составляла 36,2%, при этом содержание агрономически ценных агрегатов 0,25–10 мм достигало 61,3% (оценка «хорошее»). В 2023 году отмечено увеличение количества крупных агрегатов до 34,0%, а

содержание ценных агрегатов возросло до 65,0% (оценка «удовлетворительное»). К 2024 году показатели стабилизировались: доля крупных агрегатов снизилась до 31,9%, а содержание ценных агрегатов осталось на уровне 65,0% (оценка «хорошее»).

Таблица 11 – Сухой агрегатный анализ нижней части гумусового горизонта (А 20–40 см) чернозема выщелоченного по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

Год	Содержание агрегатов, % от массы воздушно-сухой почвы, размером, мм									Кстр.	Содержание агрегатов 0,25–10 мм, %	Оценка
	> 10	10–7	7–5	5–3	3–2	2–1	1–0,5	0,5–0,25	< 0,25			
Пашня												
2022	36,2	6,9	8,8	15,3	4,8	13,7	8,4	3,4	2,5	1,6	61,3	хорошее
2023	34,0	11,0	10,0	15,0	5,0	15,0	8,0	1,0	1,0	1,9	65,0	хорошее
2024	31,9	8,2	7,1	13,1	5,2	15,8	11,7	3,9	3,1	1,9	65,0	хорошее
Многолетние травы												
2022	27,2	9,1	7,9	16,5	4,0	17,1	10,1	4,2	3,9	2,2	68,9	хорошее
2023	19,2	8,6	12,8	18,3	6,9	17,3	9,5	5,0	2,4	3,6	78,4	хорошее
2024	30	9,9	8,6	14,2	4,9	13,7	8,5	4,4	5,8	1,8	64,2	хорошее
Распаханная залежь												
2022	15,7	9,1	9,7	20,3	8,7	22,6	9,9	1,6	2,4	4,5	81,9	отличное
2023	21,8	13,7	14,5	22,7	4,7	18,5	2,9	0,0	1,2	3,4	77,0	хорошее
2024	33,8	10,5	9,5	17,4	4,2	14,8	6,1	2,2	1,5	1,8	64,7	хорошее
Целина												
2022	19,7	10,4	12,8	18,4	4,8	18,3	9,8	3	2,8	3,4	77,5	хорошее
2023	19,0	12,0	14,0	22,0	5,0	17,0	8,0	2,0	1,0	4,0	80,0	хорошее
2024	23,2	11,4	18,7	22,6	3,9	11,7	4,8	1,7	2,0	3,0	74,8	хорошее

В нижней части гумусового горизонта на участке с многолетними травами зафиксировано наиболее благоприятное распределение агрегатов. В 2022 году содержание агрономически ценных агрегатов достигало 68,9% (оценка «отличное»). В 2023 году показатели достигли максимума — 78,4% (оценка «отличное»), после чего к 2024 году произошло некоторое снижение до 64,2% (оценка «хорошее»).

На распаханной залежи отмечалась неоднородная динамика структурного состояния. В 2022 году содержание ценных агрегатов составляло 81,9% (оценка

«хорошее»). В 2023 году зафиксирован рост до 77,0% (оценка «отличное»), а к 2024 году показатель снизился до 64,7% (оценка «хорошее»).

На целинном участке наблюдалось стабильно высокое качество структуры. Во все годы исследования содержание агрономически ценных агрегатов находилось в пределах 74,8–80,0% (оценка «отличное»), с преобладанием средних и крупных фракций.

Анализ динамики показывает, что наиболее стабильное структурное состояние характерно для целинных участков. На пашне отмечается умеренная вариабельность показателей. Почвы под многолетними травами демонстрируют высокую способность к поддержанию хорошей структурной организации, несмотря на сезонные колебания. Распаханная залежь характеризуется наиболее контрастной динамикой структурных показателей.

В целом во всех вариантах отмечается хорошее структурное состояние нижней части гумусового горизонта. Заметна разница в структурном состоянии нижней части гумусового горизонта пашни и целинного участка, на целинном участке отмечается на 10–15% более высокое содержание агрономически ценных агрегатов. Коэффициент структурности для нижней части гумусового горизонта чернозема выщелоченного на целинном участке почти в 2 раза выше и составляет 3–4, а для пашни 1,6–1,9. Снижение структурности подпахотного горизонта показывает себя немаловажным мониторинговым показателем и требует применения агротехнических мероприятий по улучшению структуры нижней части гумусового горизонта, например, глубокое рыхление. Можно отметить, что многолетние травы в севообороте способствуют рыхлению подпахотного горизонта за счет распространения корневой системы, но в условиях данного наблюдения на 3 год после распашки многолетних трав отмечается ухудшения структурного состояния до уровня сравнимого с участком пашни. На участке введенной в оборот залежи структурное состояние по показателям сухого просеивания было неоднозначным. В целом, в год введения в оборот структура была сравнима с целинным участком, но на 3 год структурное состояние становится близким к уровню постоянной пашни.

В таблице 12 представлены результаты мокрого агрегатного анализа нижней части гумусового горизонта (20–40 см) чернозема выщелоченного при различных вариантах землепользования за период 2022–2024 гг. (Бородина и др., 2026).

Таблица 12 – Мокрый агрегатный анализ подпахотного горизонта (А 20–40 см) чернозема выщелоченного по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

Год	Содержание агрегатов, % от массы воздушно-сухой почвы, размером, мм						Содержание агрегатов 0,25–10 мм, %	Оценка
	5–3	3–2	2–1	1–0,5	0,5–0,25	< 0,25		
Пашня								
2022	2,1	4,6	5,9	23,0	28,8	35,6	64,4	хорошее
2023	2,7	6,8	5,4	27,7	25,6	31,8	68,2	хорошее
2024	8,7	12,1	8,2	26,7	11,0	33,3	66,7	хорошее
Многолетние травы								
2022	1,6	4,1	10,7	26,9	28,9	27,9	72,1	отличное
2023	0,6	9,4	5,6	23,2	41,9	19,2	80,8	отличное
2024	8,9	2,6	10,6	17,2	21,7	39,0	61,0	хорошее
Распаханная залежь								
2022	5,4	5,8	8,0	24,2	23,8	32,9	67,1	хорошее
2023	1,5	7,8	5,8	15,7	25,2	44,0	56,0	хорошее
2024	8,3	11,3	8,1	34,2	9,9	28,2	71,8	отличное
Целина								
2022	7,4	11,3	11,3	29,3	20,7	20,0	80,0	отличное
2023	2,9	14,9	10,8	26,9	32,1	12,4	87,6	отличное
2024	31,8	15,7	10,2	21,7	7,4	13,1	86,9	отличное

В почве пашни наблюдалась относительно стабильная динамика водопрочных агрегатов. В 2022 году доля агрегатов размером 0,25–10 мм составляла 64,4% (оценка «хорошее»), при этом преобладали фракции 0,5–0,25 мм (28,8%) и менее 0,25 мм (35,6%). В 2023 году произошло увеличение содержания ценных агрегатов до 68,2% за счёт роста доли средних фракций 1–0,5 мм (27,7%). К 2024 году отмечено значительное увеличение крупных агрегатов 5–3 мм (8,7%), при общем содержании водопрочных агрегатов 66,7%.

В почве под многолетними травами зафиксировано неоднородное распределение водопрочных агрегатов. В 2022 году содержание агрегатов 0,25–10 мм достигало 72,1% (оценка «отличное»). В 2023 году показатель увеличился до

80,8% за счёт роста средних фракций, однако к 2024 году произошло снижение до 61,0% (оценка «хорошее») при увеличении доли фракции менее 0,25 мм до 39,0%.

Почва распаханной залежи характеризовалась контрастной динамикой структурного состояния. В 2022 году содержание водопрочных агрегатов составляло 67,1% (оценка «хорошее»). В 2023 году зафиксировано снижение до 56,0% (оценка «хорошее») при максимальном содержании фракции менее 0,25 мм (44,0%), после чего к 2024 году показатель улучшился до 71,8% (оценка «отличное»).

На целине наблюдалось наиболее высокое качество водопрочной структуры. В 2022 году содержание агрегатов 0,25–10 мм составляло 80,0% (оценка «отличное»), в 2023 году показатель увеличился до 87,6%, а к 2024 году достиг максимума — 86,9% при значительном росте доли крупных агрегатов 5–3 мм (31,8%).

Анализ динамики показал, что наиболее стабильное состояние водопрочной структуры характерно для целинных участков. На пашне сохраняется относительно высокий уровень водопрочности при умеренных колебаниях показателей. Почвы под многолетними травами демонстрировали значительную вариабельность структурных характеристик, а распаханная залежь характеризовалась наиболее контрастной динамикой с тенденцией к улучшению к 2024 году.

Оценка структурного состояния по водопрочным агрегатам в нижележащей части гумусового горизонта имела очевидные различия для почв пашни и целинного участка. Так в подпахотном горизонте на участке пашни содержание водопрочных агрономически ценных агрегатов составило 64–68%, что сопоставимо с пахотным горизонтом и общее агрегатное состояние по водопрочной структуре оценивалось как хорошее. Целинный участок имел также высокий показатель содержания водопрочных агрегатов крупнее 0,25 мм 80–88%, что сопоставимо с верхней частью гумусового горизонта чернозема выщелоченного на целинном участке. На участке с многолетними травами высокий показатель водопрочной структуры также наблюдается в период пребывания на участке трав и падает на 3 год после распашки трав практически на 10–20%.

5.2 Микроагрегатный анализ методом Н.А. Качинского

Для более полного представления о структурном состоянии почвы необходимо определять агрегаты размером менее 0,25 мм. Наряду с макроструктурой благоприятное влияние на водно-физические свойства почв оказывает водопрочная, пористая микроструктура размером 0,25–0,01 мм.

Сопоставление результатов микроагрегатного и гранулометрического анализов позволяет судить о степени дисперсности почвы, прочности ее микроструктуры.

В таблице 13 представлены результаты определения гранулометрического состава верхней части гумусового горизонта чернозема выщелоченного по исследуемым участкам.

На пашне наблюдалась следующая динамика гранулометрического состава. В 2022 году преобладали фракции 0,05–0,01 мм (44,8%) при низком содержании крупной фракции 1–0,25 мм (0,5%). В 2024 году фракция 0,25–0,05 мм возросла до 17,7%, при снижении содержания ила (фракция <0,001 мм) до 17,7%. Показатель структурности по А.Ф. Вадюниной увеличился с 0,56 до 0,64.

Под многолетними травами зафиксировано относительно стабильное распределение фракций. В 2022 году преобладали частицы 0,05–0,01 мм (42,3%), к 2024 году их содержание снизилось до 42,0%. Содержание физической глины (<0,01 мм) оставалось стабильным на уровне 42–43%. Показатель структурности варьировал в пределах 0,59–0,61.

На распаханной залежи отмечалась умеренная вариабельность гранулометрического состава. В 2022 году доля фракции 0,05–0,01 мм составляла 43,9%, к 2024 году снизилась до 43,1%. Содержание физической глины варьировало от 41,1% до 41,6%. Показатель структурности оставался стабильным на уровне 0,59–0,60.

На целинном участке наблюдалось наиболее стабильное распределение гранулометрических фракций. В 2022 году преобладали частицы 0,05–0,01 мм (42,8%), к 2024 году их содержание снизилось до 43,8%. Содержание физической

глины варьировало в пределах 41,3–42,3%. Показатель структурности оставался относительно стабильным (0,56–0,58).

Таблица 13 – Результаты гранулометрического анализа методом пипетки верхней части гумусового горизонта (Апах 0–20 см, для целины А 5–20 см) чернозема выщелоченного по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

Год	Размер фракций (мм) и их содержание (в % от массы сухой почвы)							Гранулометрический показатель структурности по А.Ф. Вадюниной
	1–0,25	0,25– 0,05	0,05– 0,01	0,01– 0,005	0,005– 0,001	<0,001	физ.глина <0,01	
Пашня								
2022	0,5	13,7	44,8	10,2	14,0	16,8	41,0	0,56
2023	0,5	10,4	45,8	10,6	14,2	18,6	43,4	0,58
2024	0,5	17,7	39,7	10,4	14,1	17,7	42,2	0,64
Многолетние травы								
2022	0,4	15,2	42,3	10,4	13,7	18,0	42,1	0,60
2023	0,5	12,3	44,1	10,7	14,5	17,9	43,1	0,59
2024	0,5	15,1	42,0	10,5	14,1	17,9	42,5	0,61
Распаханная залежь								
2022	0,6	14,3	43,9	9,3	12,4	19,6	41,3	0,60
2023	0,3	15,2	43,4	9,8	12,7	18,6	41,1	0,59
2024	0,5	14,9	43,1	9,9	13,1	18,7	41,6	0,60
Целина								
2022	0,8	14,4	42,8	10,9	13,9	17,5	42,3	0,58
2023	0,6	14,3	44,8	10,5	12,6	18,2	41,3	0,56
2024	0,5	14,2	43,8	10,7	12,9	17,9	41,5	0,56

Как можно наблюдать, в целом гранулометрический состав по всем вариантам и годам достаточно однороден, что показывает однородность почвообразующих пород на данных участках и подтверждает их единообразное литологическое происхождение. Исследуемый чернозем, как было обозначено в описании объекта исследования, имеет тяжелосуглинистый гранулометрический состав, поскольку процентное содержание физической глины находится в пределах 40–50%. По полному наименованию почву можно охарактеризовать как тяжелосуглинистую пылевато-крупнопылеватую.

Для микроагрегатного анализа почв при подготовке пробы на анализ не используется химическое разрушение агрегатов пирофосфатом натрия.

Результаты определения микроагрегатов в верхней части гумусового горизонта чернозема выщелоченного по вариантам исследования представлены в таблице 14.

Таблица 14 – Результаты микроагрегатного анализа методом пипетки пахотного горизонта (Апах 0–20 см, для целины А 5–20 см) чернозема выщелоченного по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

Год	Размер фракций (мм) и их содержание (в % от массы сухой почвы)					
	1–0,25	0,25–0,05	0,05–0,01	0,01–0,005	0,005–0,001	<0,001
Пашня						
2022	22,9	50,8	21,9	2,5	1,9	0,1
2023	9,5	46,5	39,2	3,6	1,2	0,0
2024	18,9	55,7	23,3	1,8	0,0	0,1
Многолетние травы						
2022	24,8	47,6	24,1	1,8	1,7	0,0
2023	38,1	48,8	11,6	1,2	0,2	0,1
2024	12,0	64,0	21,1	1,7	1,1	0,2
Распаханная залежь						
2022	37,2	41,1	19,9	1,7	0,1	0,1
2023	38,2	47,2	13,2	1,0	0,2	0,1
2024	20,4	53,8	22,1	2,5	1,2	0,0
Целина						
2022	29,4	37,1	27,6	3,3	2,3	0,3
2023	30,6	37,2	27,3	3,0	1,8	0,0
2024	25,9	37,7	29,8	3,7	2,9	0,0

На пашне наблюдалась неоднородная динамика распределения микроагрегатов. В 2022 году преобладали фракции 0,25–0,05 мм (50,8%), при этом доля крупных микроагрегатов 1–0,25 мм составляла 22,9%. К 2023 году произошло значительное перераспределение: содержание крупных микроагрегатов снизилось до 9,5%, а фракции 0,05–0,01 мм возросло до 39,2%. К 2024 году отмечено восстановление содержания крупных микроагрегатов до 18,9%, при доминировании фракции 0,25–0,05 мм (55,7%).

Под многолетними травами зафиксировано относительно стабильное распределение микроагрегатов. В 2022 году преобладали фракции 0,25–0,05 мм (47,6%) при высоком содержании крупных микроагрегатов (24,8%). В 2023 году отмечено увеличение доли крупных микроагрегатов до 38,1%, после чего к 2024 году произошло снижение до 12,0%, при росте фракции 0,25–0,05 мм до 64,0%.

На распаханной залежи отмечалась умеренная вариабельность распределения микроагрегатов. В 2022 году преобладали крупные микроагрегатов (37,2%), к 2023 году их содержание увеличилось до 38,2%. К 2024 году произошло снижение доли крупных микроагрегатов до 20,4%, при росте фракции 0,25–0,05 мм до 53,8%.

На целинном участке наблюдалось наиболее стабильное распределение микроагрегатов. Во все годы исследования преобладали фракции 0,25–0,05 мм (37,1–37,7%), при относительно высоком содержании крупных микроагрегатов (25,9–30,6%).

По результатам анализа четко просматривалось минимальное содержание микроагрегатов менее 0,01 мм на долю которых приходится менее 5%. Основная доля микроагрегатов приходится на размер 0,25–0,05 мм. Из достаточно явных можно отметить некоторые различия в перераспределении микроагрегатов между фракциями 1–0,25 и 0,25–0,05 мм. Для чернозема выщелоченного на целинном участке отмечалось несколько более высокое, порядка 10%, содержание фракции 1–0,25 по сравнению с пахотным аналогом, что коррелирует с содержанием макроагрегатов водопрочной структуры. В целом, чернозем выщелоченный в условиях исследования обладает очень высокой прочностью микроструктуры.

Результаты гранулометрического анализа методом пипетки нижней части гумусового горизонта (20–40 см) чернозема выщелоченного при различных вариантах землепользования за период 2022–2024 гг. представлены в таблице 15.

На пашне наблюдалась относительно стабильная картина гранулометрического состава. В 2022 году преобладали фракции 0,05–0,01 мм (43,8%) при низком содержании фракции крупного и среднего песка 1–0,25 мм (0,6%). К 2024 году наблюдалось увеличение доли фракции мелкого песка 0,25–

0,05 мм до 13,2%, при незначительном снижении содержания ила (<0,001 мм) до 17,1%. Показатель структурности по А. Ф. Вадюниной варьировал в пределах 0,54–0,59.

Таблица 15 – Результаты гранулометрического анализа методом пипетки н горизонта (А 20–40 см) чернозема выщелоченного по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

Год	Размер фракций (мм) и их содержание (в % от массы сухой почвы)							Гранулометрический показатель структурности по А.Ф. Вадюниной
	1–0,25	0,25– 0,05	0,05– 0,01	0,01– 0,005	0,005– 0,001	<0,001	физ.глина <0,01	
Пашня								
2022	0,6	12,8	43,8	12,4	13,5	16,9	42,8	0,54
2023	1,7	13,5	44,4	9,1	14,1	17,2	40,4	0,59
2024	1,2	13,2	44,1	10,8	13,8	17,1	41,6	0,56
Многолетние травы								
2022	0,2	14,0	42,6	13,7	11,9	17,6	43,2	0,52
2023	0,4	14,8	41,8	13,9	11,2	17,9	43,0	0,52
2024	0,6	14,0	42,8	12,8	12,3	17,5	42,6	0,54
Распаханная залежь								
2022	0,1	10,7	45,5	9,7	12,0	22,0	43,7	0,62
2023	0,5	10,7	45,9	9,9	11,8	21,2	42,9	0,59
2024	0,4	12,8	43,7	12,0	11,8	19,2	43,1	0,56
Целина								
2022	0,7	21,5	37,2	9,8	12,4	18,4	40,6	0,66
2023	0,3	13,1	43,8	10,9	13,5	18,4	42,8	0,58
2024	0,5	17,3	40,5	10,4	13,0	18,4	41,7	0,62

В почве под многолетними травами зафиксировано относительно равномерное распределение фракций. В 2022 году преобладали частицы 0,05–0,01 мм (42,6%), к 2024 году их содержание снизилось до 42,8%. Содержание физической глины (<0,01 мм) оставалось стабильным на уровне 42–43%. Показатель структурности сохранялся на уровне 0,52–0,54.

На распаханной залежи отмечалась умеренная вариабельность гранулометрического состава. В 2022 году доля фракции 0,05–0,01 мм составляла 45,5%, к 2024 году снизилась до 43,7%. Содержание физической глины

варьировало от 42,9% до 43,7%. Показатель структурности оставался относительно стабильным (0,59–0,62).

На целине наблюдается наиболее контрастная динамика гранулометрических фракций. В 2022 году преобладали частицы 0,05–0,01 мм (37,2%), к 2024 году их содержание увеличилось до 40,5%. Содержание физической глины варьировало в пределах 40,6–42,8%. Показатель структурности демонстрировал колебания от 0,58 до 0,66.

Анализ гранулометрического состава нижней части гумусового горизонта, приведенный в таблице 15, показал схожий гранулометрический состав с верхней частью гумусового горизонта. Здесь также наблюдалось высокое содержание крупнопылеватых частиц. Нижняя часть гумусового горизонта также имела тяжелосуглинистый гранулометрический состав, поскольку процентное содержание физической глины находилось в пределах 40–50%. По полному наименованию почву можно охарактеризовать как тяжелосуглинистую пылевато-крупнопылеватую.

Микроагрегатный анализ нижней части гумусового горизонта по вариантам исследования представлен в таблице 16.

В 2022 году на пашне наблюдалось наибольшее содержание фракции размером 0,25–0,05 мм (49,6%), а также значительное содержание фракций 1–0,25 мм (13,3%) и 0,05–0,01 мм (31,6%). Менее 1% приходилось на фракции с размерами меньше 0,005 мм. В 2023 году наблюдалось увеличение доли фракции 1–0,25 мм до 27,2%, при этом доля фракции 0,25–0,05 мм снижается до 42,3%. Количество фракций меньше 0,005 мм почти исчезает. В 2024 году снова наблюдался возврат к более высокой доле фракции 0,25–0,05 мм (53,2%), а также рост доли фракции 1–0,25 мм до 17,5%.

В 2022 году участок с многолетними травами имел схожий микроагрегатный состав с пашней: наибольшее содержание фракции 0,25–0,05 мм (41,5%), затем фракция 1–0,25 мм (19,7%) и 0,05–0,01 мм (31,9%). В 2023 году наблюдалось увеличение доли фракции 0,25–0,05 мм до 56,4%, а доля более крупных фракций (1–0,25 мм) уменьшилась до 16,3%. В 2024 году доля фракции 0,25–0,05 мм

оставалась высокой (53,4%), но доля фракции 1–0,25 мм снизилась еще больше (12,3%). Фракция 0,05–0,01 мм увеличилась до 28,6%.

Таблица 16 – Результаты микроагрегатного анализа методом пипетки нижней части гумусового горизонта (А 20–40 см) чернозема выщелоченного по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

Год	Размер фракций (мм) и их содержание (в % от массы сухой почвы)					
	1–0,25	0,25–0,05	0,05–0,01	0,01–0,005	0,005–0,001	<0,001
Пашня						
2022	13,3	49,6	31,6	3,5	1,8	0,2
2023	27,2	42,3	25,7	2,6	2,2	0,0
2024	17,5	53,2	25,6	2,2	1,6	0,0
Многолетние травы						
2022	19,7	41,5	31,9	3,8	3,1	0,0
2023	16,3	56,4	23,7	2,4	1,2	0,0
2024	12,3	53,4	28,6	3,5	2,2	0,1
Распаханная залежь						
2022	15,0	41,7	35,8	5,4	1,5	0,5
2023	22,0	60,4	16,2	0,9	0,5	0,1
2024	16,4	57,9	22,4	1,6	1,5	0,3
Целина						
2022	28,7	36,0	29,6	3,1	2,6	0,0
2023	29,5	39,6	25,5	2,9	2,1	0,4
2024	14,7	50,4	28,6	4,1	2,1	0,1

Почв обработанной залежи в 2022 году имела значительную долю фракции 0,05–0,01 мм (35,8%), а также 41,7% фракции 0,25–0,05 мм. Меньше всего была представлена фракция <0,001 мм (0,5%). В 2023 году доля фракции 0,25–0,05 мм увеличилась до 60,4%, в то время как доля фракции 0,05–0,01 мм значительно снизилась до 16,2%. В 2024 году доля фракции 0,25–0,05 мм все еще была высока (57,9%), а доля фракции 0,05–0,01 мм снова увеличилась (22,4%).

Почва на целинном участке в 2022 году имела достаточно высокий процент фракции 1–0,25 мм (28,7%), а также 36,0% фракции 0,25–0,05 мм. Почва содержала минимальные доли фракции меньше 0,001 мм. В 2023 году наблюдался рост доли фракции 1–0,25 мм (29,5%) и фракции 0,25–0,05 мм (39,6%). Однако доля фракций

с размерами меньше 0,005 мм по-прежнему оставалась очень низкой. В 2024 году был замечен значительный рост доли фракции 0,25–0,05 мм до 50,4%, а доля фракции 1–0,25 мм снизилась до 14,7%. Количество фракций менее 0,001 мм немного увеличилось (0,1%).

Если провести сравнительный анализ по годам, то можно отметить некоторые моменты:

В 2022 году для почв всех типов участков была характерна высокая доля фракции 0,25–0,05 мм. На пашне и участке с многолетними травами доминировали фракции средней крупности (0,25–0,05 мм), в то время как на обработанной залежи — более мелкие фракции (0,05–0,01 мм). Целина и пашня имеют некоторые различия по соотношению крупных фракций, чем другие участки.

В 2023 году на всех участках наблюдалась тенденция к увеличению доли фракции 0,25–0,05 мм. Участок с многолетними травами и пашня демонстрировали значительное снижение доли фракции 1–0,25 мм.

В 2024 году сохранялась тенденция к повышению доли фракций с размерами от 0,25 до 0,05 мм на большинстве участков. В обработанной залежи наблюдалось возрастание доли более мелких фракций (0,05–0,01 мм), в то время как на целине и пашне отмечено снижение содержания более крупных фракций.

На основе анализа видно, что в течение трех лет наблюдаются различные изменения в распределении фракций почвы на разных типах участков, однако степень различий не дает четких оснований к разделению характеристик микроагрегатного анализа по вариантам землепользования, что связано с отсутствием вовлечения нижней части гумусового горизонта в обработку, а другие факторы как климатические и характер растительности не оказывают существенного влияния на изменение микроструктуры, а горизонт в целом по всем вариантам исследования для чернозема выщелоченного Тульской области характеризуется отличным микроагрегатным составом с высокой прочностью и устойчивостью микроагрегатов, что влияет на формирование хорошей водопрочной структуры.

5.3 Анализ структурного состояния и секвестрационного потенциала на основе индексного показателя по соотношению SOC/CLAY

Как отмечалось в обзоре литературы, в зарубежной литературе и при оценке качества землепользования имеет распространение индексный подход на основе отношения SOC/CLAY. Были установлены (Hoffland E. et al., 2020) пороговые значения индекса SOC/CLAY как индикатора различных уровней структурного состояния почвы, от "очень хорошего" до "плохого" (Табл. 2, стр. 27). Эти результаты демонстрируют важность учета соотношения SOC/CLAY и его влияния на состояние почвы и управление землепользованием. Использование индексного подхода к такой оценке позволяет отойти от непосредственного определения почвы и имеет связь с характером землепользования и примерно оцениваются в порядке пашни << пастбище < постоянные травы $\approx$ лесные почв. Таким образом в однородных условиях качественное состояние почв в зависимости от землепользования будет четко прослеживаться по этому показателю. Однако очевидно, что условия формирования почв в черноземных зоне, явно будут сильно отличаться от условий в Англии и Уэльсе. Тем не менее, этот подход реализуется в европейских странах, например, в Польше, где в почвенном покрове встречаются лесостепные черноземы.

Поскольку в зарубежной литературе и практике используется понятие CLAY, которое обозначает гранулометрическую фракцию менее 0,002 мм. В классическом же методе пипетки определялись фракции 0,005 и 0,001 мм. Для перехода к фракции размером 0,002 мм использовалась модель, предложенная Е.В. Шеиным (Шеин, 2009):

$$\Phi_{<0,002} = -1,148 + 0,43\Phi_{<0,005} + 0,53\Phi_{<0,001}, \quad (1)$$

где

$\Phi_{<0,005}$ — содержание частиц меньше 0,005 мм, %;

$\Phi_{<0,001}$ — содержание частиц меньше 0,001 мм, %;

$\Phi_{<0,002}$ — содержание частиц меньше 0,002 мм, %.

Результаты пересчета по формуле (1) и расчет индекса SOC/CLAY показаны в таблицах 18–19.

Таблица 18 – SOC/CLAY индекс для пахотного горизонта (Апах 0–20 см, для целины А 5–20 см) чернозема выщелоченного по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

Вариант	Содержание углерода, %	Размер фракций (мм) и их содержание (в % от массы сухой почвы)			SOC/CLAY
		< 0,005	< 0,001	< 0,002	
Пашня 2022 г.	3,48	30,8	16,8	21,0	0,166
Пашня 2023 г.	3,52	32,8	18,6	22,8	0,154
Пашня 2024 г.	3,54	31,8	17,7	21,9	0,162
Мн. травы 2022 г.	4,13	31,7	18,0	22,0	0,188
Мн. травы 2023 г.	4,05	32,4	17,9	22,3	0,182
Мн. травы 2024 г.	3,50	32,0	17,9	22,1	0,158
Распаханная залежь (1 год)	4,31	32,0	19,6	23,0	0,187
Распаханная залежь (2 год)	4,13	31,3	18,6	22,2	0,186
Распаханная залежь (3 год)	4,05	31,8	18,7	22,4	0,181
Целина 2022 г.	3,87	31,4	17,5	21,6	0,179
Целина 2023 г.	3,85	30,8	18,2	21,7	0,177
Целина 2024 г.	3,88	30,8	17,8	21,5	0,180

Анализ полученных данных по пахотному горизонту чернозема выщелоченного (табл. 18) показывает, что во всех исследуемых участках индекс SOC/CLAY находится в пределах 0,154–0,188, что соответствует очень хорошему структурному состоянию почвы. Наиболее высокие значения наблюдаются на участках с многолетними травами (до 0,188) и обработанной залежи (до 0,187), что подтверждает положительное влияние устойчивого растительного покрова и отказа от интенсивной обработки на качество почвенной структуры.

Пашня демонстрирует более низкие значения индекса (0,154–0,166), что, несмотря на сохранение хорошего уровня структурности, указывает на потенциальную угрозу деградации почвы при отсутствии мероприятий по органическому обогащению и агротехнической защите.

Целина характеризуется стабильным уровнем SOC/CLAY в диапазоне 0,177–0,180, что отражает естественное равновесие между органическим веществом и глинистой фракцией.

Анализируя полученный результат по верхней части гумусового горизонта, можно сделать некоторые общие выводы. Основываясь на оценке почв по SOC/CLAY индексу в законе о мониторинге углерода в почве, принятого Европейской комиссией, в черноземе выщелоченном тяжелосуглинистом в плакорных агроэкологических условиях Плавского района Тульской области структурное состояние оценивается как очень хорошее. Однако такое высокое соотношение почвенного органического углерода и глинистых частиц, говорит о высокой заполненности матрицы и, соответственно, о низком потенциале секвестрации углерода. Следует отметить, что в предложенной оценке, описанной в обзоре литературы (стр. 26) (Prout et al., 2020) наблюдается закономерная связь характера землепользования и показателя SOC/CLAY. Так пахотные угодья как правило характеризуются плохим структурным состоянием при SOC/CLAY менее 0,077, а почвы на целинных и залежных участках характеризуются очень хорошим структурным состоянием при SOC/CLAY более 0,125. Таким образом в условиях Плавского района Тульской области, пользуясь этой оценкой, нельзя однозначно охарактеризовать тип землепользования, поскольку в исследованиях пахотные угодья при использовании многолетних трав в севообороте имеют SOC/CLAY идентичный целинным участкам.

Таблица 19 представляет результаты анализа содержания органического углерода (SOC), глинистой фракции ($< 0,002$ мм) и соответствующего индекса SOC/CLAY в нижней части гумусового горизонта при различных вариантах землепользования: пашня, участок с многолетними травами, распаханная залежь и целина за период с 2022 по 2024 годы.

Содержание органического углерода (%), ожидаемо демонстрировало снижение по большинству участков по сравнению с верхней частью гумусового горизонта. Особенно заметно это было для пашни (с 3,45% до 3,06%) и участка с многолетними травами (с 3,49–3,51% до 2,77%). Содержание глинистой фракции

варьируется от 20,9% до 25,1%, оставаясь достаточно стабильным по большинству участков.

Несмотря на некоторое снижение содержания органического углерода, структурное состояние почв оставалось на высоком уровне благодаря достаточному количеству глинистых частиц и их способности удерживать органическое вещество. Наиболее стабильные значения наблюдаются на целине и распаханной залежи.

Таблица 19 – SOC/CLAY индекс для подпахотного горизонта (А 20–40 см) чернозема выщелоченного по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

Вариант	Содержание углерода, %	Размер фракций (мм) и их содержание (в % от массы сухой почвы)			SOC/CLAY
		< 0,005	< 0,001	< 0,002	
Пашня 2022 г.	3,45	30,4	16,9	20,9	0,165
Пашня 2023 г.	3,38	31,3	17,2	21,4	0,158
Пашня 2024 г.	3,06	30,9	17,1	21,2	0,144
Мн. травы 2022 г.	3,49	29,5	17,6	20,9	0,167
Мн. травы 2023 г.	3,51	29,1	17,9	20,9	0,168
Мн. травы 2024 г.	2,77	29,8	17,5	20,9	0,132
Распаханная залежь (1 год)	3,30	34,0	22,0	25,1	0,131
Распаханная залежь (2 год)	3,08	33,0	21,2	24,3	0,127
Распаханная залежь (3 год)	3,24	31,1	19,2	22,4	0,145
Целина 2022 г.	3,23	30,8	18,4	21,8	0,148
Целина 2023 г.	3,19	31,9	18,4	22,3	0,143
Целина 2024 г.	3,07	31,4	18,4	22,1	0,139

Средний уровень значений индекса по всем исследованным вариантам землепользования SOC/CLAY составил 0,175 и не опускался ниже 0,125, что характеризует порог оценки структурного состояния как «очень хорошая», однако индекс не показал существенной разницы между разными вариантами землепользования и в условиях лесостепной зоны на черноземных почвах не может служить индикатором условий землепользования.

5.4 Оценка плотности, плотности твердой фазы и общей пористости

Плодородие почв в значительной степени определяется их генезисом и эволюцией, а также взаимосвязями между различными свойствами почв. Кроме того, важным аспектом является информационно-энергетическая оценка этих процессов, которая помогает глубже понять механизмы формирования и поддержания плодородия (Савич и др., 2023).

Уплотнение почвы выше нормы вызывает изменения в энергетическом состоянии воды и биофильных элементов, что приводит к изменениям в газовом составе почвы, миграции элементов, ухудшению поступления питательных веществ в растения, увеличению энергетических затрат на рост корней и изменению интенсивности электрических, магнитных и других физических полей. В результате снижается биопродуктивность угодий и возрастают затраты энергии на сельскохозяйственное производство. Причины этих явлений включают динамические напряжения, работу сельскохозяйственной техники, несбалансированное использование удобрений, деградацию почв, чрезмерную антропогенную нагрузку и промораживание (Ефимов, Сорокин, Балабко и др., 2021).

Ранее было рассмотрено уплотнение почв под влиянием работы сельскохозяйственной техники, при деградации, осолонцевании, вытаптывании, развитии оглеения, оподзоливания. Необходимым изучение процессов уплотнения нижних горизонтов почв под влиянием массы верхних слоев с 1,1 до 1,8 г/см³, при развитии полей динамических напряжений. Показано изменение уплотнения почв в сезонной динамике и под отдельными культурами. Установлено, что окультуривание дерново-подзолистых почв от ОК1 к ОК3 приводит к увеличению числа частиц > 0,25 мм от 46,7 до 51,5% на слабоокультуренной почве и от 58,9 до 61,6% на хорошо окультуренной. Внесение навоза на черноземах и запашка соломы при чередовании отвальных и безотвальных обработок приводят к увеличению коэффициента структурности с 1,6 до 3,1 (Ефимов, Савич, Гукалов и др., 2021).

Представленные в таблице 19 данные отражают показатели плотности, плотности твёрдой фазы и общей пористости чернозема выщелоченного при различных вариантах землепользования за период 2022–2024 гг.

Таблица 19 – Плотность, плотность твердой фазы и общая пористость чернозема выщелоченного по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

Год	Горизонт (глубина, см)	Плотность почвы, г/см ³	Плотность твердой фазы, г/см ³	Общая пористость, %
Пашня				
2022	Апах (0–20)	0,88±0,04	2,42±0,03	63,4
	А (20–40)	1,10±0,03	2,35±0,06	53,3
2023	Апах (0–20)	0,89±0,05	2,38±0,14	62,8
	А (20–40)	1,11±0,04	2,35±0,09	52,6
2024	Апах (0–20)	0,86±0,02	2,37±0,04	64,0
	А (20–40)	1,09±0,03	2,37±0,11	53,9
Многолетние травы				
2022	Апах (0–20)	1,03±0,07	2,39±0,05	57,1
	А (20–40)	1,08±0,02	2,39±0,03	54,9
2023	Апах (0–20)	1,00±0,04	2,44±0,09	58,3
	А (20–40)	1,06±0,04	2,40±0,03	55,9
2024	Апах (0–20)	0,92±0,05	2,38±0,03	61,4
	А (20–40)	1,03±0,05	2,37±0,06	56,6
Распаханная залежь				
2022	Апах (0–20)	1,03±0,06	2,4±0,02	57,0
	А (20–40)	0,98±0,03	2,39±0,13	57,0
2023	Апах (0–20)	0,95±0,04	2,38±0,03	60,1
	А (20–40)	0,98±0,03	2,40±0,06	58,1
2024	Апах (0–20)	0,94±0,03	2,40±0,08	60,8
	А (20–40)	0,98±0,03	2,43±0,07	59,6
Целина				
2022	А (5–20)	1,01±0,04	2,45±0,02	58,7
	А (20–40)	1,15±0,03	2,39±0,08	51,9
2023	А (5–20)	1,05±0,04	2,37±0,09	55,5
	А (20–40)	1,15±0,02	2,39±0,05	51,8
2024	А (5–20)	1,03±0,05	2,44±0,11	57,6
	А (20–40)	1,14±0,03	2,43±0,05	53,0

На пашне наблюдается следующая динамика: в верхней части гумусового горизонта (0–20 см) плотность почвы варьирует от 0,86 до 0,89 г/см³ при плотности твёрдой фазы 2,37–2,42 г/см³ и общей пористости 62,8–64,0%. В нижней части гумусового горизонта (20–40 см) плотность составляет 1,09–1,11 г/см³, плотность твёрдой фазы — 2,35–2,37 г/см³, пористость — 52,6–53,9%.

Под многолетними травами отмечается более высокая плотность: в верхней части гумусового горизонта (0–20 см) показатель колеблется от 0,92 до 1,03 г/см³ при плотности твёрдой фазы 2,38–2,44 г/см³ и пористости 57,1–61,4%. В нижней части гумусового горизонта (20–40 см) плотность составляет 1,03–1,08 г/см³, плотность твёрдой фазы — 2,37–2,40 г/см³, пористость — 54,9–56,6%.

На распаханной залежи зафиксированы промежуточные значения: в верхней части гумусового горизонта (0–20 см) плотность варьировалась от 0,94 до 1,03 г/см³ при плотности твёрдой фазы 2,38–2,40 г/см³ и пористости 60,1–60,8%. В нижней части гумусового горизонта (20–40 см) плотность составляла 0,98 г/см³, плотность твёрдой фазы — 2,39–2,43 г/см³, пористость — 57,0–59,6%.

На целинном участке показатели демонстрировали следующую картину: в верхней части гумусового горизонта (5–20 см) плотность изменялась от 1,01 до 1,05 г/см³ при плотности твёрдой фазы 2,37–2,45 г/см³ и пористости 55,5–58,7%. В нижней части гумусового горизонта (20–40 см) плотность составляла 1,14–1,15 г/см³, плотность твёрдой фазы — 2,39–2,43 г/см³, пористость — 51,8–53,0%.

Плотность почвы менее 1 г/см³ говорит, что почва вспушена. Это состояние нормально для участка пашни, поскольку образцы отбирались в мае по свежеподготовленной почве. С распаханной залежи также образцы отбирались уже после обработки, для нее характерно несколько больше плотность, что связано с постепенной стабилизацией физических показателей после распашки залежного участка. Плотность под многолетними травами соответствует равновесной и типична для хорошей пашни. Для целины отмечается наиболее высокий показатель плотности, но почва не уплотнена. Общая пористость во всех вариантах находится в пределах 55–65%, что характеризует отличную пористость для пахотных почв. Во всех вариантах землепользования наблюдается закономерное увеличение плотности и снижение пористости с глубиной. Плотность твердой фазы отражает среднюю плотность входящих в ее состав органических и минеральных компонентов и схожие значения отражают сходство условий формирования чернозема выщелоченного на исследуемых участках.

ГЛАВА 6. АГРОХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Представленные данные на рисунке 26 отражают динамику обменной кислотности ($pH_{\text{сол.}}$) в верхней части гумусового горизонта чернозема выщелоченного при различных вариантах землепользования за период 2022–2024 гг. Развёрнутая статистическая оценка приведена в приложении В.

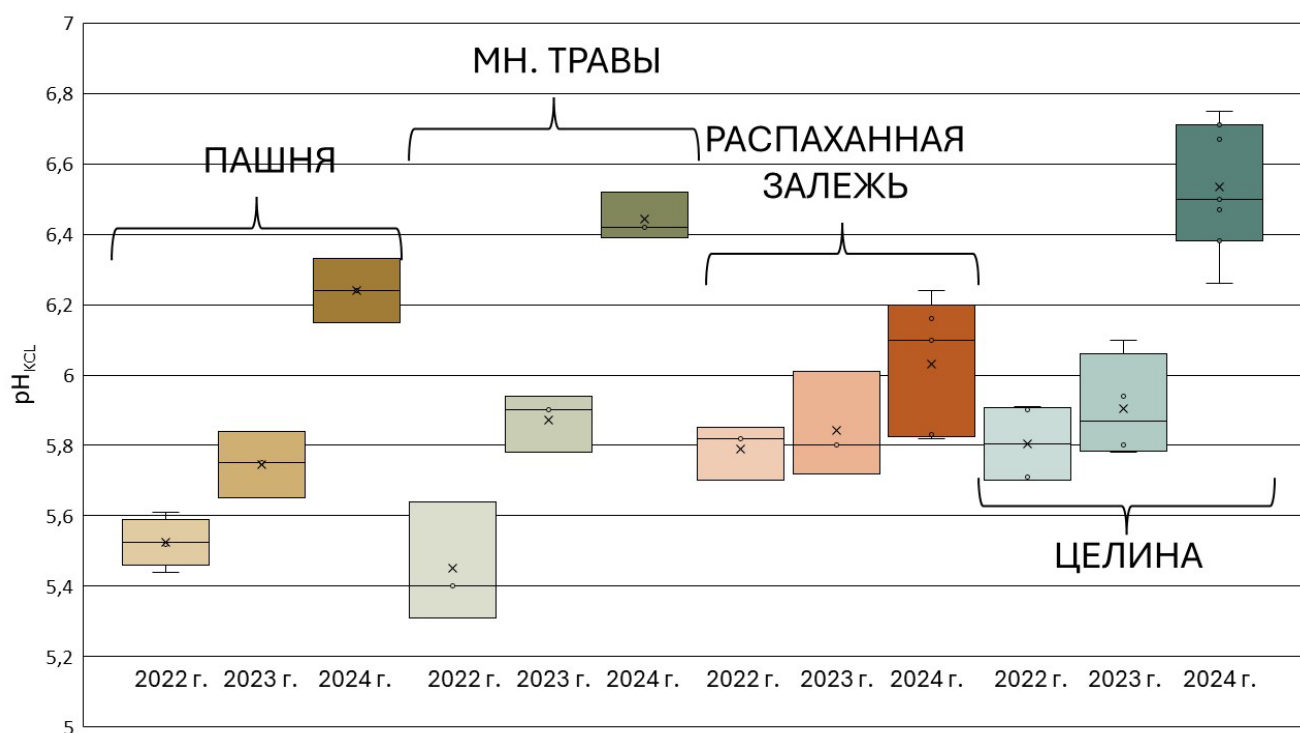


Рисунок 26 – Обменная кислотность ($pH_{\text{сол.}}$) чернозема выщелоченного в верхней части гумусового горизонта (Апах 0–20 см, для целины А 5–20 см) по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

На пашне наблюдается тенденция к значительному увеличению $pH_{\text{сол.}}$. В 2022 году показатель составлял $5,53 \pm 0,07$, к 2023 году вырос до $5,75 \pm 0,1$, а к 2024 году достиг значения $6,24 \pm 0,09$.

Под многолетними травами зафиксировано наиболее выраженное повышение $pH_{\text{сол.}}$. Начальное значение 2022 года ($5,45 \pm 0,17$) к 2023 году увеличилось до $5,87 \pm 0,08$, а к 2024 году достигло максимального показателя среди всех исследуемых вариантов — $6,44 \pm 0,07$.

На распаханной залежи отмечается умеренная динамика изменения кислотности. В 2022 году показатель составлял $5,79 \pm 0,08$, в 2023 году незначительно увеличился до $5,84 \pm 0,15$, а к 2024 году достиг значения $6,03 \pm 0,19$.

На целинном участке наблюдается следующая динамика: начальное значение $5,81 \pm 0,12$ в 2022 году к 2023 году увеличилось до $5,91 \pm 0,15$, а к 2024 году достигло максимального значения среди всех исследуемых вариантов — $6,53 \pm 0,18$.

Анализ динамики показывает, что во всех вариантах землепользования наблюдалась тенденция к увеличению показателя pH солевой суспензии, что свидетельствует о снижении кислотности почвы. Наиболее значительные изменения были зафиксированы под многолетними травами и на целинном участке. Наименьшая вариабельность показателя отмечалась на распаханной залежи.

Представленные данные на рисунке 27 отражают динамику обменной кислотности (pH_{сол.}) в нижней части гумусового горизонта (20–40 см) чернозема выщелоченного при различных вариантах землепользования за период 2022–2024 гг. Развёрнутая статистическая оценка приведена в приложении В.

На пашне наблюдается тенденция к значительному снижению кислотности почвы. В 2022 году показатель составлял $5,56 \pm 0,08$, к 2023 году вырос до $5,71 \pm 0,1$, а к 2024 году достиг значения $6,33 \pm 0,08$.

В почве под многолетними травами зафиксировано выраженное повышение pH_{сол.} Начальное значение 2022 года ($5,4 \pm 0,1$) к 2023 году увеличилось до $5,99 \pm 0,13$, а к 2024 году достигло $6,39 \pm 0,05$.

На распаханной залежи отмечалась наиболее стабильная динамика изменения кислотности среди всех исследуемых вариантов. В 2022 году показатель составлял $6,11 \pm 0,11$, в 2023 году увеличился до $6,3 \pm 0,16$, а к 2024 году достиг значения $6,4 \pm 0,19$.

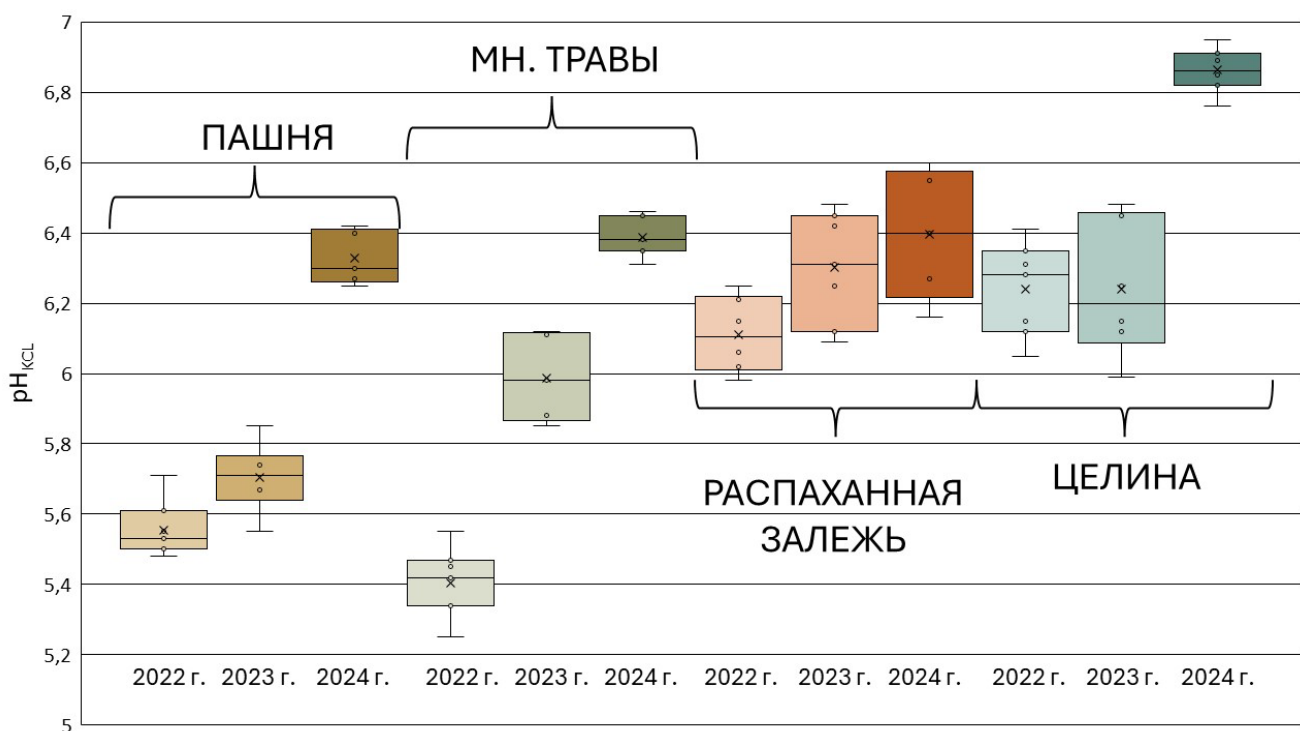


Рисунок 27 – Обменная кислотность (рН_{сол.}) чернозема выщелоченного в нижней части гумусового горизонта (А 20–40 см) по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

На целинном участке наблюдалась следующая динамика: начальное значение $6,24 \pm 0,13$ в 2022 году оставалось стабильным в 2023 году ($6,24 \pm 0,19$), а к 2024 году произошло значительное увеличение до $6,86 \pm 0,06$, что является максимальным показателем среди всех исследуемых вариантов.

Анализ динамики показывает, что во всех вариантах землепользования наблюдалась тенденция к увеличению показателя рН солевой суспензии, что свидетельствует о снижении кислотности почвы. Наиболее значительные изменения зафиксированы на целинном участке, где к 2024 году был достигнут максимальный показатель. Наименьшая вариабельность показателя отмечается на распаханной залежи.

Представленные данные на рисунке 28 отражают динамику актуальной кислотности (рН_{водн.}) чернозема выщелоченного в верхней части гумусового горизонта при различных вариантах землепользования за период 2022–2024 гг. Развёрнутая статистическая оценка приведена в приложении В.

На пашне наблюдалась тенденция к значительному увеличению показателя рН. В 2022 году значение составляло $6,59 \pm 0,16$, к 2023 году выросло до $6,84 \pm 0,11$, а к 2024 году достигло максимального значения среди всех исследуемых вариантов — $7,37 \pm 0,13$.

Под многолетними травами зафиксировано умеренное повышение величины рНводн. Начальное значение 2022 года ($6,24 \pm 0,11$) к 2023 году увеличилось до $6,84 \pm 0,06$, а к 2024 году составило $7,07 \pm 0,05$.

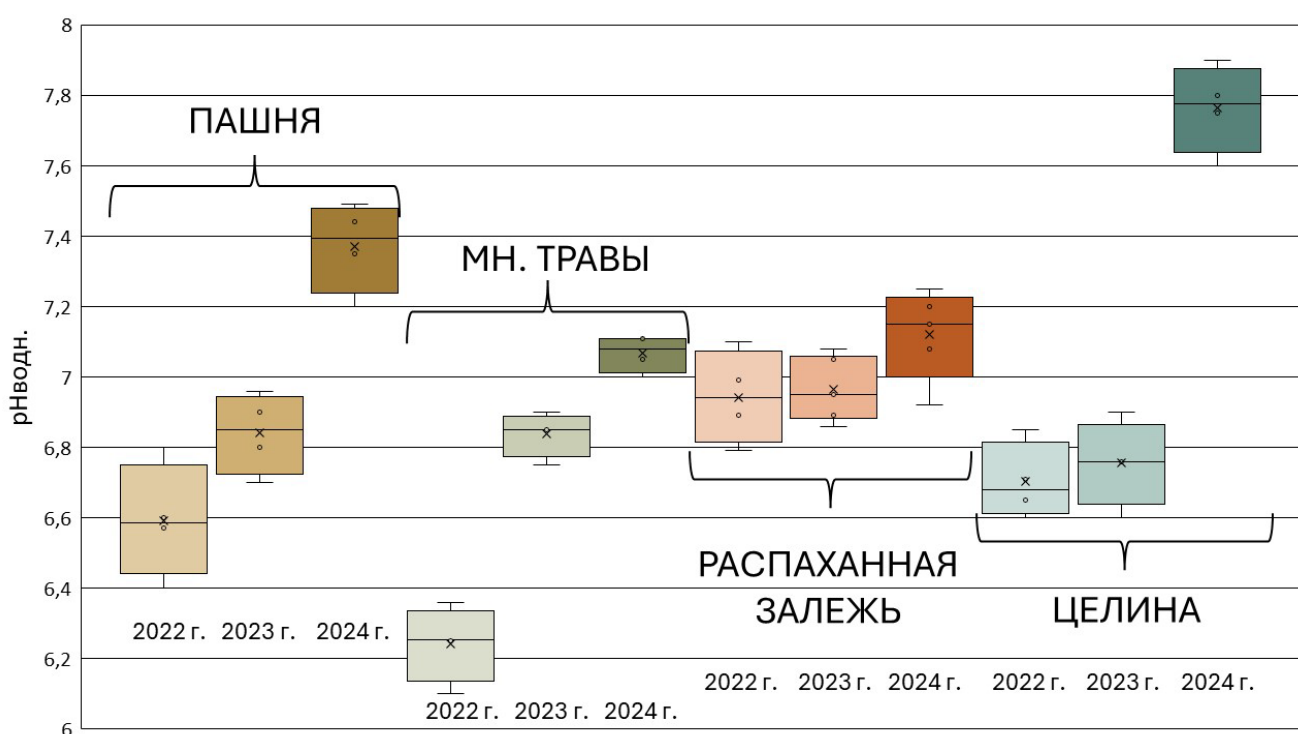


Рисунок 28 – Актуальная кислотность (рНводн.) чернозема выщелоченного в верхней части гумусового горизонта (Апах 0–20 см, для целины А 5–20 см) по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

На распаханной залежи отмечалась наиболее стабильная динамика изменения рН. В 2022 году показатель составлял $6,94 \pm 0,13$, в 2023 году незначительно увеличился до $6,96 \pm 0,09$, а к 2024 году достиг значения $7,12 \pm 0,13$.

На целинном участке наблюдается следующая динамика: начальное значение $6,7 \pm 0,11$ в 2022 году увеличилось до $6,76 \pm 0,12$ в 2023 году, а к 2024 году произошло значительное повышение до $7,76 \pm 0,13$, что является максимальным показателем среди всех исследуемых вариантов.

Анализ динамики показал, что во всех вариантах землепользования наблюдалась тенденция к увеличению показателя актуальной кислотности, что свидетельствует о снижении кислотности почвы. Наиболее значительные изменения зафиксированы на целинном участке, где к 2024 году был достигнут максимальный показатель. Наименьшая вариабельность показателя отмечалась на распаханной залежи.

Представленные данные отражают динамику актуальной кислотности (рНводн.) чернозема выщелоченного в нижней части гумусового горизонта (20–40 см) при различных вариантах землепользования за период 2022–2024 гг. Развёрнутая статистическая оценка приведена в приложении В.

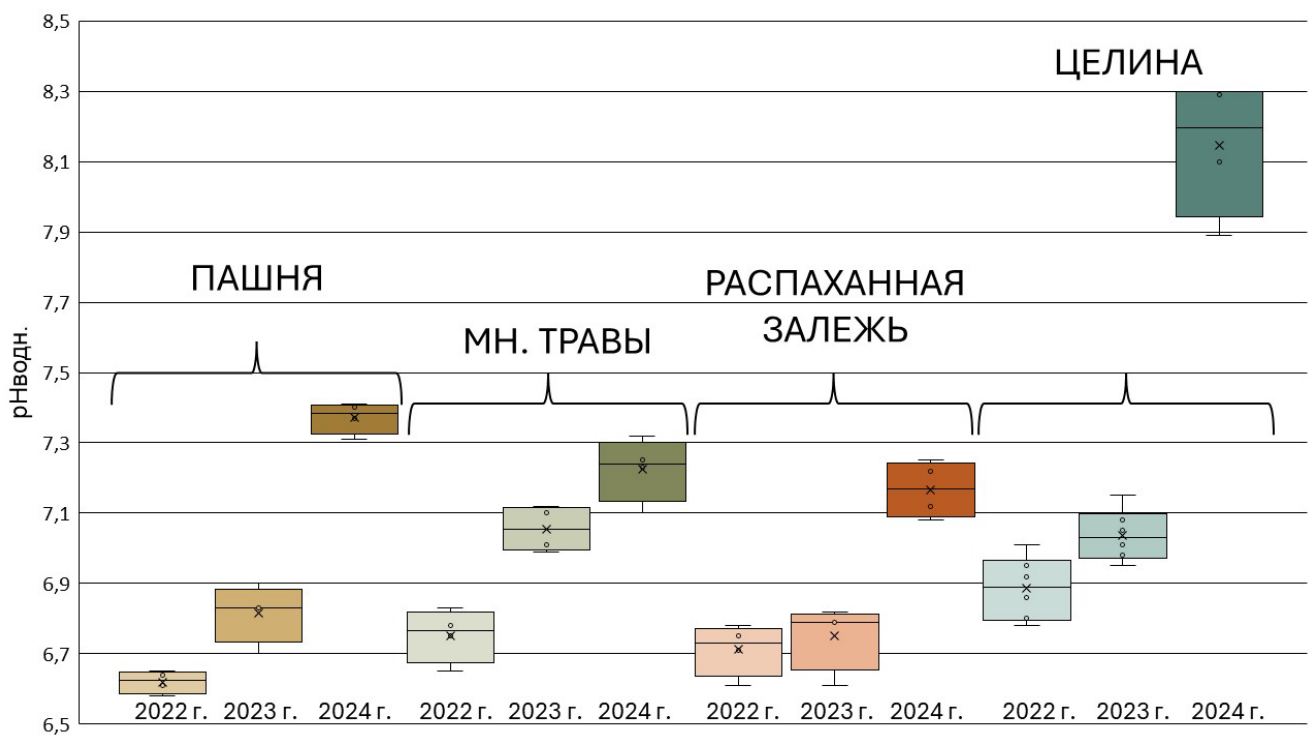


Рисунок 29 – Актуальная кислотность (рНводн.) чернозема выщелоченного в нижней части гумусового горизонта (А 20–40 см) по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

На пашне наблюдалась выраженная тенденция к увеличению показателя рНводн. В 2022 году значение составляло $6,62 \pm 0,03$, к 2023 году выросло до $6,82 \pm 0,08$, а к 2024 году достигло $7,37 \pm 0,05$.

Под многолетними травами зафиксировано умеренное повышение величины рНводн. Начальное значение 2022 года ($6,75 \pm 0,08$) к 2023 году увеличилось до $7,06 \pm 0,06$, а к 2024 году составило $7,23 \pm 0,09$.

На распаханной залежи отмечалась относительно стабильная динамика изменения рНводн. В 2022 году показатель составлял $6,71 \pm 0,07$, в 2023 году незначительно увеличился до $6,75 \pm 0,1$, а к 2024 году достиг значения $7,17 \pm 0,08$.

На целинном участке наблюдалась наиболее значительная динамика: начальное значение $6,89 \pm 0,09$ в 2022 году увеличилось до $7,04 \pm 0,07$ в 2023 году, а к 2024 году произошло существенное повышение до $8,15 \pm 0,19$, что является максимальным показателем среди всех исследуемых вариантов.

Анализ динамики показывает, что во всех вариантах землепользования наблюдалась тенденция к увеличению показателя актуальной кислотности, что свидетельствует о снижении кислотности почвы. Наиболее значительные изменения зафиксированы на целинном участке, где к 2024 году был достигнут максимальный показатель. Наименьшая вариабельность показателя отмечается на распаханной залежи.

Представленные данные на рисунке 30 отражают динамику гидролитической кислотности чернозема выщелоченного в верхней части гумусового горизонта при различных вариантах землепользования за период 2022–2024 гг. Развёрнутая статистическая оценка приведена в приложении В.

На пашне наблюдалась выраженная тенденция к снижению гидролитической кислотности. В 2022 году показатель составлял $6,1 \pm 0,3$ мг-экв/100 г почвы, к 2023 году снизился до $5,1 \pm 0,3$ мг-экв/100 г, а к 2024 году достиг минимального значения — $2,2 \pm 0,2$ мг-экв/100 г.

Под многолетними травами зафиксировано существенное уменьшение кислотности. Начальное значение 2022 года ($6,3 \pm 0,2$ мг-экв/100 г) к 2023 году снизилось до $4,5 \pm 0,3$ мг-экв/100 г, а к 2024 году составило $1,9 \pm 0,3$ мг-экв/100 г.

На распаханной залежи отмечалась умеренная динамика снижения кислотности. В 2022 году показатель составлял $5,9 \pm 0,3$ мг-экв/100 г, в 2023 году снизился до $4,4 \pm 0,3$ мг-экв/100 г, а к 2024 году достиг значения $2,4 \pm 0,2$ мг-экв/100 г.

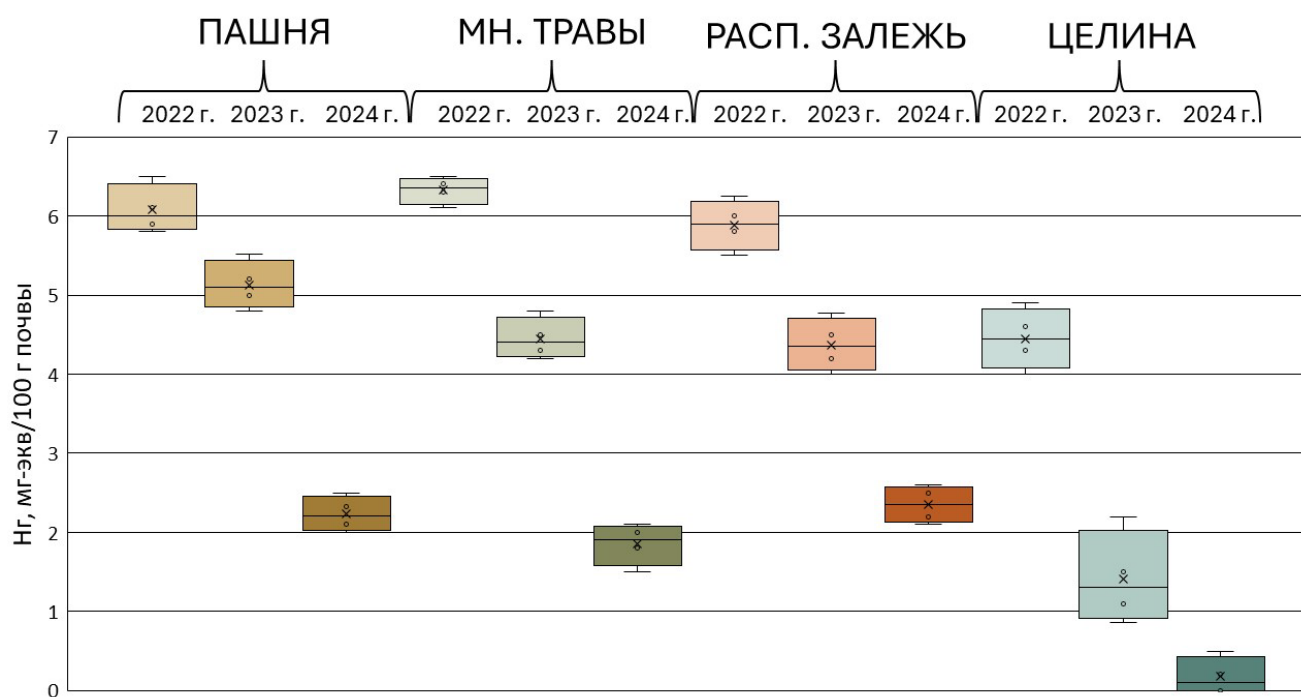


Рисунок 30 – Гидролитическая кислотность (мг-экв/100 г почвы) чернозема выщелоченного в верхней части гумусового горизонта (Апах 0–20 см, для целины А 5–20 см) по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

На целинном участке наблюдалось наиболее значительное снижение кислотности. Начальное значение 2022 года ($4,5 \pm 0,4$ мг-экв/100 г) к 2023 году уменьшилось до $1,4 \pm 0,6$ мг-экв/100 г, а к 2024 году достигло минимального показателя среди всех исследуемых вариантов — $0,2 \pm 0,2$ мг-экв/100 г.

Анализ динамики показал, что во всех вариантах землепользования наблюдалась тенденция к снижению гидролитической кислотности. Наиболее значительные изменения зафиксированы на целинном участке, где к 2024 году произошло практически полное исчезновение гидролитической кислотности. Наименьшая вариабельность показателя отмечается на пашне.

Представленные на рисунке 31 данные отражают динамику гидролитической кислотности чернозема выщелоченного в нижней части гумусового горизонта (20–40 см) при различных вариантах землепользования за период 2022–2024 гг. Развёрнутая статистическая оценка приведена в приложении В.

На пашне наблюдалась выраженная тенденция к снижению гидролитической кислотности. В 2022 году показатель составлял $5,9 \pm 0,6$ мг-экв/100 г почвы, к 2023 году снизился до $5,3 \pm 0,6$ мг-экв/100 г, а к 2024 году достиг минимального значения — $1,3 \pm 0,7$ мг-экв/100 г.

Под многолетними травами зафиксировано существенное уменьшение кислотности. Начальное значение 2022 года ($7,5 \pm 0,7$ мг-экв/100 г) к 2023 году снизилось до $4,8 \pm 0,5$ мг-экв/100 г, а к 2024 году составило $1,7 \pm 0,2$ мг-экв/100 г.

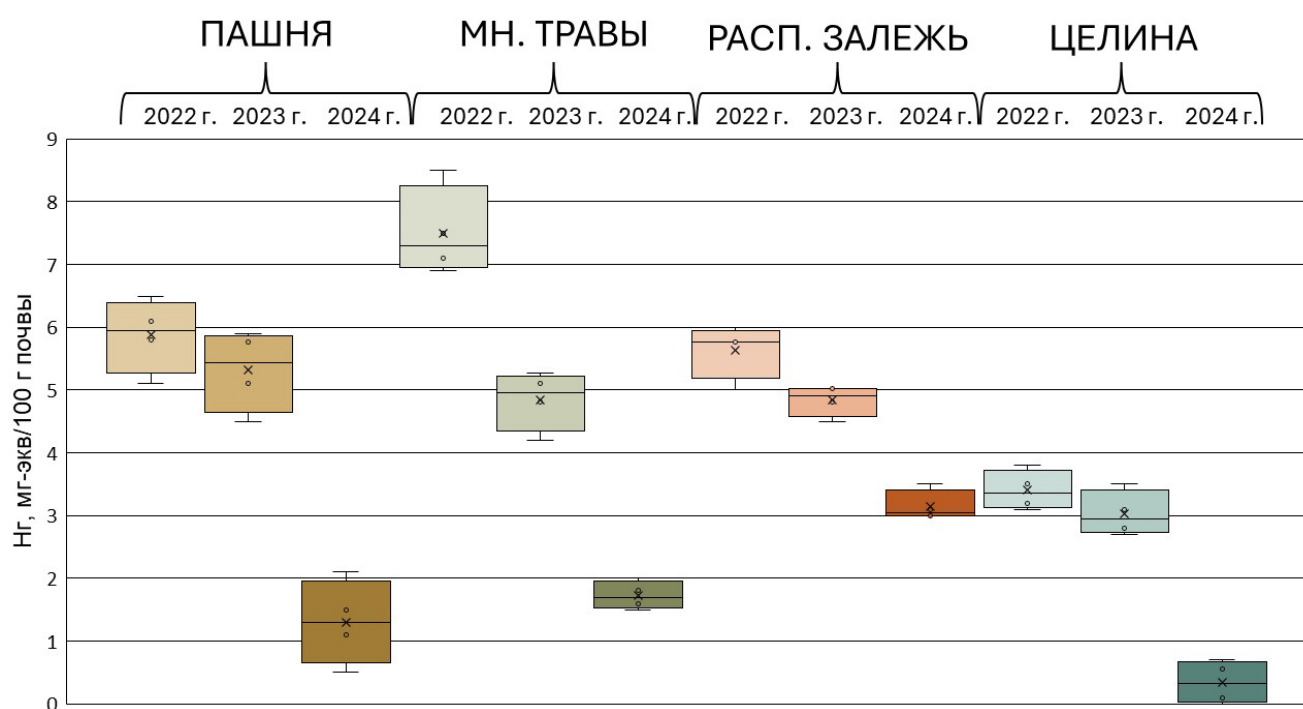


Рисунок 31 – Гидролитическая кислотность (мг-экв/100 г почвы) чернозема выщелоченного в нижней части гумусового горизонта (А 20–40 см) по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

На распаханной залежи отмечалась менее выраженная динамика снижения кислотности. В 2022 году показатель составлял $5,6 \pm 0,4$ мг-экв/100 г, в 2023 году

снизился до $4,8 \pm 0,2$ мг-экв/100 г, а к 2024 году достиг значения $3,2 \pm 0,2$ мг-экв/100 г.

На целинном участке наблюдалось наиболее значительное снижение кислотности. Начальное значение 2022 года ($3,4 \pm 0,3$ мг-экв/100 г) к 2023 году уменьшилось до $3,0 \pm 0,4$ мг-экв/100 г, а к 2024 году достигло минимального показателя среди всех исследуемых вариантов — $0,3 \pm 0,3$ мг-экв/100 г.

Анализ динамики показал, что во всех вариантах землепользования наблюдалась тенденция к снижению гидролитической кислотности. Наиболее значительные изменения зафиксированы на целинном участке, где к 2024 году произошло практически полное исчезновение гидролитической кислотности. Наименьшая вариабельность показателя отмечалась на распаханной залежи.

Представленные на рисунке 32 данные отражают динамику суммы обменных оснований в верхней части гумусового горизонта чернозема выщелоченного при различных вариантах землепользования за период 2022–2024 гг. Развёрнутая статистическая оценка приведена в приложении В.

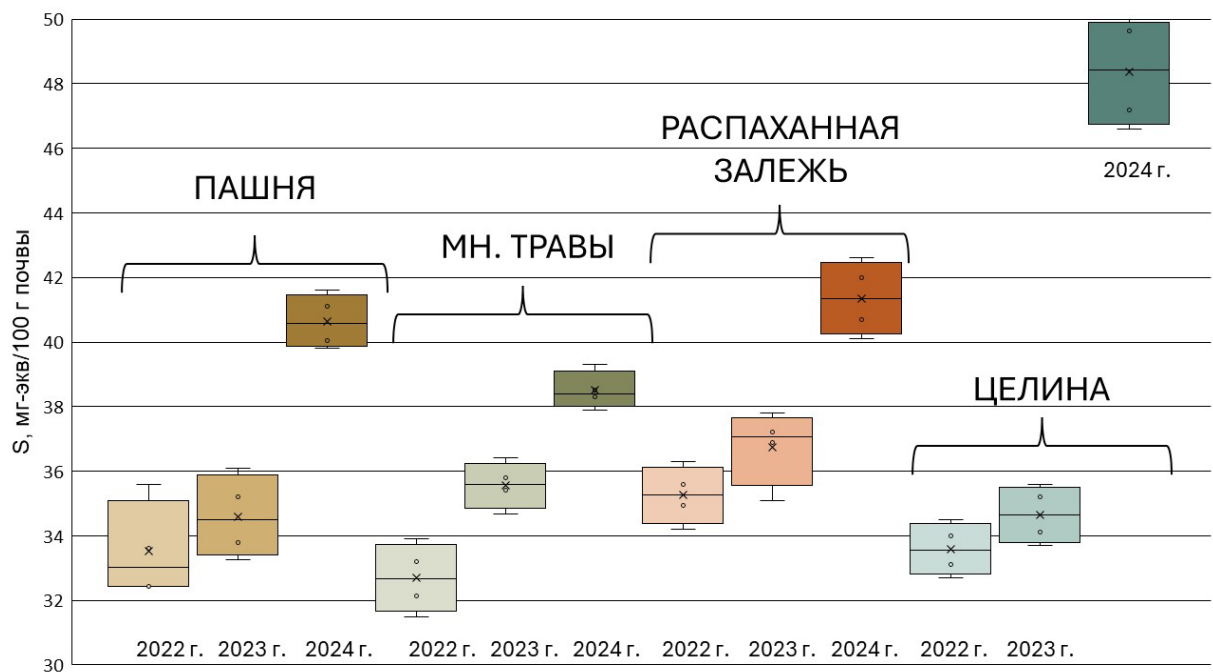


Рисунок 32 – Сумма обменных оснований (мг-экв/100 г почвы) чернозема выщелоченного в верхней части гумусового горизонта (Апах 0–20 см, для целины А 5–20 см) по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

На пашне наблюдалась тенденция к увеличению содержания обменных оснований. В 2022 году показатель составлял $33,5 \pm 1,5$ мг-экв/100 г почвы, к 2023 году увеличился до $34,6 \pm 1,3$ мг-экв/100 г, а к 2024 году достиг значения $40,6 \pm 0,9$ мг-экв/100 г.

Под многолетними травами зафиксировано умеренное повышение суммы обменных оснований. Начальное значение 2022 года ($32,7 \pm 1,1$ мг-экв/100 г) к 2023 году увеличилось до $35,6 \pm 0,7$ мг-экв/100 г, а к 2024 году составило $38,5 \pm 0,6$ мг-экв/100 г.

На распаханной залежи отмечалась стабильная динамика роста показателя. В 2022 году сумма обменных оснований составляла $35,3 \pm 0,9$ мг-экв/100 г, в 2023 году увеличилась до $36,8 \pm 1,2$ мг-экв/100 г, а к 2024 году достигла значения $41,3 \pm 1,2$ мг-экв/100 г.

На целинном участке наблюдалось наиболее значительное увеличение показателя. Начальное значение 2022 года ($33,6 \pm 0,8$ мг-экв/100 г) к 2023 году возросло до $34,7 \pm 0,9$ мг-экв/100 г, а к 2024 году достигло максимального значения среди всех исследуемых вариантов — $48,4 \pm 1,7$ мг-экв/100 г.

Анализ динамики показал, что во всех вариантах землепользования наблюдалась тенденция к увеличению суммы обменных оснований. Наиболее значительные изменения зафиксированы на целинном участке, где к 2024 году был достигнут максимальный показатель. Наименьшая вариабельность показателя отмечалась на пашне.

Представленные на рисунке 33 данные отражают динамику суммы обменных оснований в нижней части гумусового горизонта (20–40 см) чернозема выщелоченного при различных вариантах землепользования за период 2022–2024 гг. Развёрнутая статистическая оценка приведена в приложении В.

На пашне наблюдалась тенденция к увеличению содержания обменных оснований. В 2022 году показатель составлял $32,7 \pm 1,0$ мг-экв/100 г почвы, к 2023 году увеличился до $33,4 \pm 0,8$ мг-экв/100 г, а к 2024 году достиг значения $38,6 \pm 0,7$ мг-экв/100 г.

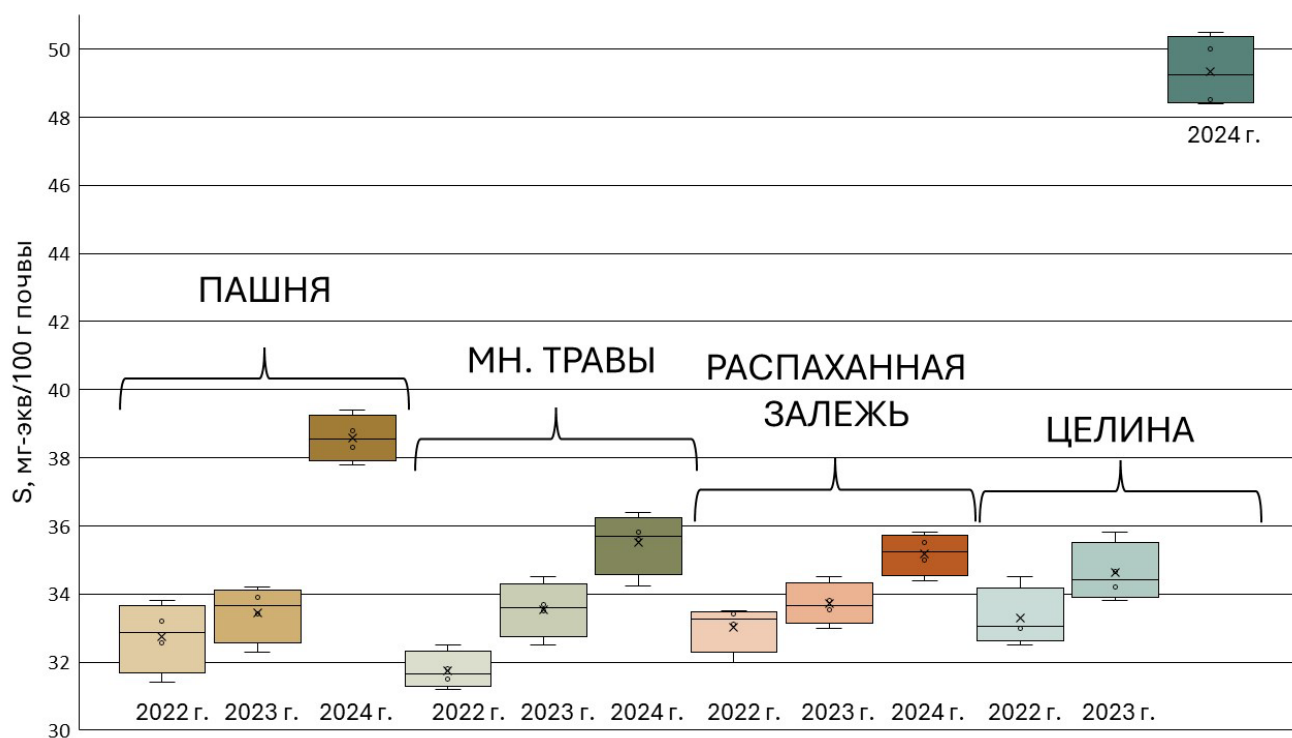


Рисунок 33 – Сумма обменных оснований (мг-экв/100 г почвы) чернозема выщелоченного в нижней части гумусового горизонта (А 20–40 см) по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

Под многолетними травами зафиксировано умеренное повышение суммы обменных оснований. Начальное значение 2022 года ($31,7 \pm 0,6$ мг-экв/100 г) к 2023 году увеличилось до $33,5 \pm 0,8$ мг-экв/100 г, а к 2024 году составило $35,5 \pm 0,9$ мг-экв/100 г.

На распаханной залежи отмечалась стабильная динамика роста показателя. В 2022 году сумма обменных оснований составляла $33,0 \pm 0,7$ мг-экв/100 г, в 2023 году увеличилась до $33,7 \pm 0,6$ мг-экв/100 г, а к 2024 году достигла значения $35,2 \pm 0,6$ мг-экв/100 г.

На целинном участке наблюдалось наиболее значительное увеличение показателя. Начальное значение 2022 года ($33,3 \pm 0,9$ мг-экв/100 г) к 2023 году возросло до $34,6 \pm 0,9$ мг-экв/100 г, а к 2024 году достигло максимального значения среди всех исследуемых вариантов — $49,3 \pm 1,1$ мг-экв/100 г.

Анализ динамики показал, что во всех вариантах землепользования наблюдалась тенденция к увеличению суммы обменных оснований. Наиболее

значительные изменения зафиксированы на целинном участке, где к 2024 году был достигнут максимальный показатель. Наименьшая вариабельность показателя отмечалась на пашне.

Анализ показателей ёмкости катионного обмена и степени насыщенности основаниями чернозема выщелоченного, представленных в таблице 20, показал существенные различия между верхним (0–20 см) и нижним (20–40 см) горизонтами при разных типах землепользования.

Таблица 20 – Ёмкость катионного обмена и степень насыщенности основаниями чернозема выщелоченного по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

Год	Горизонт (глубина, см)	Ёмкость катионного обмена, мг-экв/100 г почвы	Степень насыщенности основаниями, %
Пашня			
2022	Апах (0–20)	39,6	85
	А (20–40)	38,6	85
2023	Апах (0–20)	39,7	87
	А (20–40)	38,7	86
2024	Апах (0–20)	42,8	95
	А (20–40)	39,9	97
Многолетние травы			
2022	Апах (0–20)	39,0	84
	А (20–40)	39,2	81
2023	Апах (0–20)	40,1	89
	А (20–40)	38,3	87
2024	Апах (0–20)	40,4	95
	А (20–40)	37,2	95
Распаханная залежь			
2022	Апах (0–20)	41,2	86
	А (20–40)	38,6	85
2023	Апах (0–20)	41,2	89
	А (20–40)	38,5	88
2024	Апах (0–20)	43,7	95
	А (20–40)	38,4	92
Целина			
2022	А (5–20)	38,1	88
	А (20–40)	36,7	91
2023	А (5–20)	36,1	96
	А (20–40)	37,6	92
2024	А (5–20)	48,6	100
	А (20–40)	49,6	100

На пашне верхний горизонт демонстрировал более высокие значения ёмкости катионного обмена по сравнению с нижним: если в 2022 году показатель составлял 39,6 мг-экв/100 г против 38,6 мг-экв/100 г, то к 2024 году разница увеличилась до 42,8 мг-экв/100 г против 39,9 мг-экв/100 г. Степень насыщенности основаниями в верхнем горизонте также росла более интенсивно — с 85% до 95%, тогда как в нижнем горизонте наблюдался рост с 85% до 97%.

На участках с многолетними травами ёмкость катионного обмена в верхнем горизонте (от 39,0 до 40,4 мг-экв/100 г) оставалась выше, чем в нижнем (от 39,2 до 37,2 мг-экв/100 г). При этом степень насыщенности основаниями в верхнем горизонте увеличивалась с 84% до 95%, а в нижнем — с 81% до 95%.

На распаханной залежи верхний горизонт также характеризовался более высокой ёмкостью катионного обмена: от 41,2 до 43,7 мг-экв/100 г против 38,6–38,4 мг-экв/100 г в нижнем горизонте. Степень насыщенности основаниями в верхнем горизонте достигала 95%, тогда как в нижнем — только 92%.

Наиболее интересные различия наблюдались на целинном участке. В 2022 году ёмкость катионного обмена в верхнем горизонте (38,1 мг-экв/100 г) была выше, чем в нижнем (36,7 мг-экв/100 г), однако к 2024 году ситуация изменилась: в нижнем горизонте показатель достиг 49,6 мг-экв/100 г, превысив значение верхнего горизонта (48,6 мг-экв/100 г). Степень насыщенности основаниями в обоих горизонтах достигла 100% к 2024 году, при этом в нижнем горизонте изначально показатели были выше.

Таким образом, в большинстве случаев верхний горизонт характеризуется более высокими начальными показателями ёмкости катионного обмена, однако динамика их изменения различалась в зависимости от типа землепользования. Степень насыщенности основаниями в верхнем горизонте росла более интенсивно, за исключением целинных участков, где к концу периода показатели выровнились.

Проведенная выше характеристика физико-химические свойства чернозема выщелоченного по вариантам землепользования позволяет сделать ряд обобщающих выводов.

За период наблюдения с 2022 по 2024 гг. не наблюдалось связи изменений физико-химических свойств с изменением характера землепользования, особенно ожидаемая на участке с введенной в оборот залежью. Во всех вариантах наблюдался четкий тренд на изменение физико-химических свойств по годам, особенно в 2024 году. Связанные между собой физико-химические свойства реагировали на изменения, произошедшие к 2024 году. Обменная кислотность, актуальная кислотность и сумма обменных оснований по показателям росли, особенно в 2024 году и сильнее всего это было выражено на участке целины. Закономерно упал показатель гидролитической кислотности и опять же сильнее это было выражено в 2024 году на участке целины. Емкость катионного обмена изменялась незначительно, что связано с тем, что увеличение суммы обменных оснований нивелировалось снижением гидролитической кислотности, поскольку ЕКО является суммой этих показателей. Степень насыщенности основаниями была высокой и в 2024 году по вариантам возросла на 5–10%.

Такая тенденция изменения физико-химических свойств, очевидно, связана с особенностью водного режима чернозема выщелоченного, который определяется как периодически промывной. Характеризуется выщелоченностью карбонатов, которые по данным морфологических описаний обнаруживаются в пределах 1 метра. 2024 год характеризуется как наиболее сухой из 3 лет наблюдений и даже среди многолетних наблюдений по осадкам на 38% ниже среднемноголетнего показателя за период с 1986 г. Такие климатические изменения вероятно привели к перенаправлению тока влаги к восходящему режиму, что в свою очередь вызвало подтягивание из нижней части почвенного профиля ионов Ca^{2+} и соответственно насыщение ими почвенно-поглощающего комплекса (ППК). Это сказалось на увеличении суммы обменных оснований. Подтягивание карбонатов также привело к высвобождению и связыванию ионов H^+ в составе ППК, что можно наблюдать по резкому падению гидролитической кислотности. На целинном участке она снизилась до 0. В условиях целинного участка эффект от засушливых условий, очевидно, сильнее, что в значительной степени связано с десукцией постоянной растительности целинного участка, которая в значительной степени ускоряет

скорость восходящего тока влаги и растворенных в ней карбонатов. Эффект от постоянной растительности в 2 раза сильнее, чем на пашне. Обработка почвы и непостоянство растительного покрова позволяет несколько снизить эффект сухого года.

Такие наблюдения показывает необходимость учитывать климатические показатели конкретного года при проведении агрохимических обследований и интерпретации данных физико-химических показателей черноземов выщелоченных.

Вероятно, этот эффект будет проявляться в почвах с периодически промывным водным режимом (для черноземов оподзоленных, типичных и тёмно-серых лесных почв), но это требует отдельных расширенных исследований.

Представленные на рисунке 34 данные отражают динамику содержания подвижного фосфора (P_2O_5) в верхней части гумусового горизонта чернозема выщелоченного при различных вариантах землепользования за период 2022–2024 гг. Развёрнутая статистическая оценка приведена в приложении В.

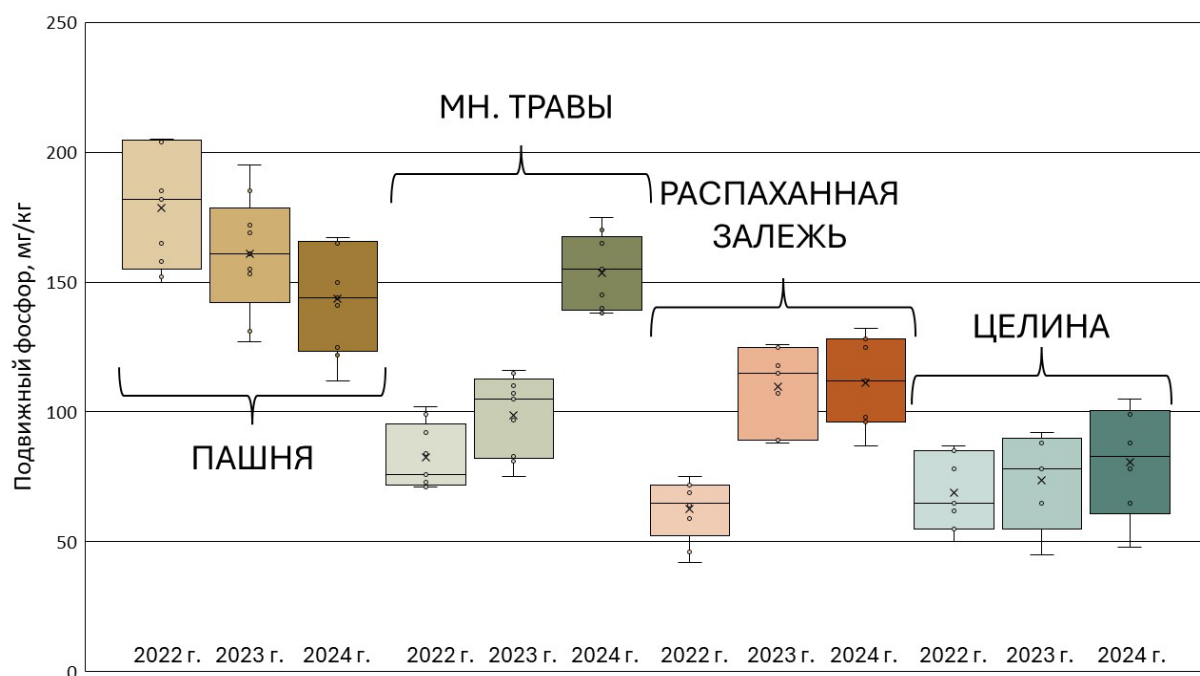


Рисунок 34 – Содержание подвижного фосфора (P_2O_5) (мг/кг почвы) в верхней части гумусового горизонта (Апах 0–20 см, для целины А 5–20 см) чернозема выщелоченного по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

На пашне наблюдалась относительно стабильная динамика содержания фосфора. В 2022 году показатель составлял 103 ± 9 мг/кг почвы, что соответствовало IV классу (повышенная обеспеченность). К 2023 году произошло снижение до 97 ± 9 мг/кг, а к 2024 году показатель составил 99 ± 12 мг/кг, оставаясь в пределах III класса (средняя обеспеченность).

Под многолетними травами зафиксировано незначительное колебание содержания фосфора. Начальное значение 2022 года (82 ± 14 мг/кг) соответствовало III классу обеспеченности. В 2023 году показатель снизился до 78 ± 20 мг/кг, а к 2024 году увеличился до 92 ± 14 мг/кг, оставаясь в пределах III класса.

На распаханной залежи отмечалась стабильность содержания фосфора. В 2022 году показатель составлял 59 ± 8 мг/кг, в 2023 году увеличился до 61 ± 8 мг/кг, а к 2024 году вернулся к исходному значению 59 ± 12 мг/кг, оставаясь в пределах III класса обеспеченности.

На целинном участке наблюдалась незначительная динамика содержания фосфора. Начальное значение 2022 года (85 ± 9 мг/кг) соответствовало III классу. В 2023 году показатель снизился до 79 ± 9 мг/кг, а к 2024 году увеличился до 86 ± 13 мг/кг, оставаясь в пределах III класса обеспеченности.

Анализ динамики показал, что во всех вариантах землепользования содержание подвижного фосфора остаётся в пределах средней обеспеченности. Наиболее стабильные показатели наблюдались на распаханной залежи, где содержание фосфора практически не меняется. Наибольшие колебания зафиксированы на пашне, хотя и там изменения остаются в пределах одного класса обеспеченности.

Представленные на рисунке 35 данные отражают динамику содержания подвижного фосфора (P_2O_5) в нижней части гумусового горизонта (20–40 см) чернозема выщелоченного при различных вариантах землепользования за период 2022–2024 гг. Развёрнутая статистическая оценка приведена в приложении В.

На пашне наблюдалась следующая динамика: в 2022 году зафиксировано содержание 103 ± 9 мг/кг (IV класс, повышенная обеспеченность). К 2023 году

произошло снижение до 97 ± 9 мг/кг (III класс, средняя обеспеченность), а к 2024 году показатель составил 99 ± 12 мг/кг, оставаясь в пределах III класса.

Под многолетними травами отмечалась относительно стабильная динамика. Начальное значение 2022 года — 82 ± 14 мг/кг (III класс). В 2023 году показатель снизился до 78 ± 20 мг/кг, а к 2024 году увеличился до 92 ± 14 мг/кг, оставаясь в пределах III класса обеспеченности.

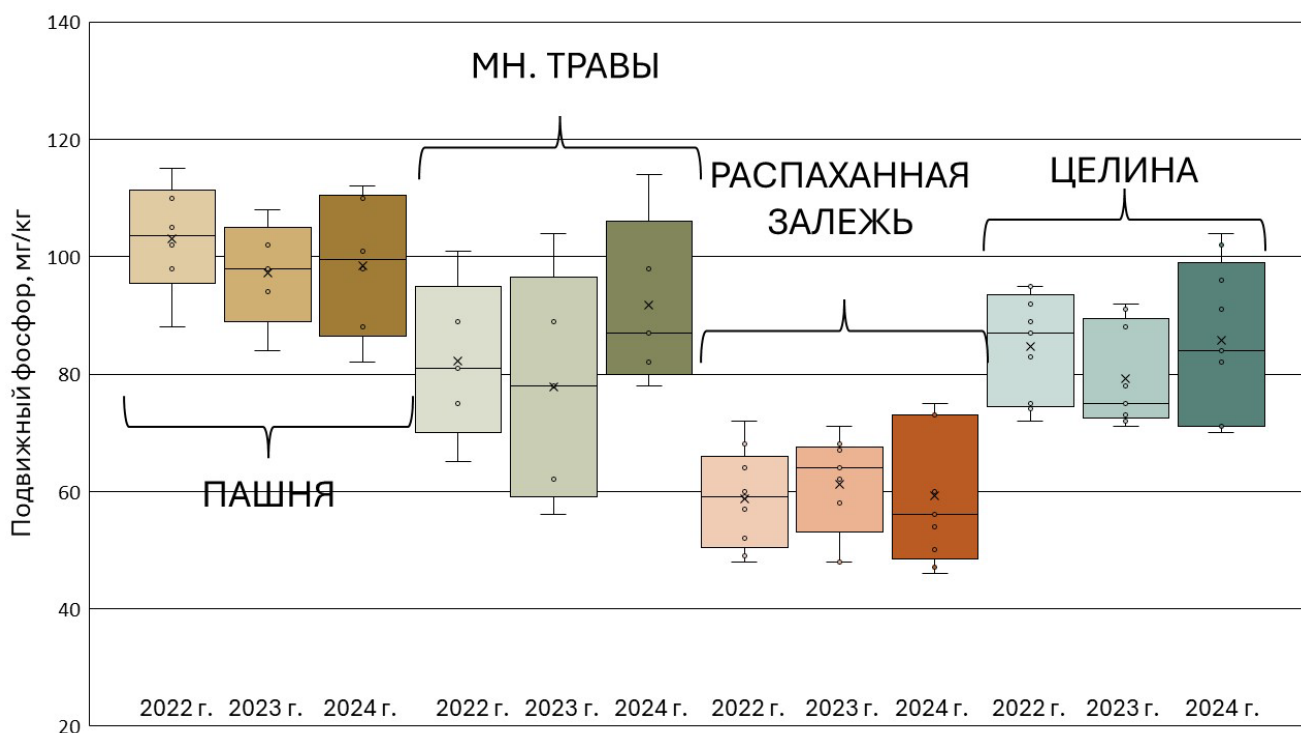


Рисунок 35 – Содержание подвижного фосфора (P_2O_5) (мг/кг почвы) в нижней части гумусового горизонта (А 20–40 см) чернозема выщелоченного по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

На распаханной залежи наблюдалась самая стабильная картина. В 2022 году содержание составило 59 ± 8 мг/кг (III класс), в 2023 году незначительно возросло до 61 ± 8 мг/кг, а к 2024 году вернулось к исходному значению 59 ± 12 мг/кг, оставаясь в пределах III класса.

На целинном участке отмечалась незначительная динамика. Начальное значение 2022 года — 85 ± 9 мг/кг (III класс). В 2023 году произошло снижение до 79 ± 9 мг/кг, а к 2024 году показатель увеличился до 86 ± 13 мг/кг, оставаясь в пределах III класса обеспеченности.

Анализ динамики показал, что во всех вариантах землепользования содержание подвижного фосфора оставалось в пределах средней обеспеченности. Наиболее стабильные показатели наблюдались на распаханной залежи, где содержание фосфора практически не меняется. Наибольшие колебания зафиксированы на пашне, хотя и там изменения остаются в пределах одного класса обеспеченности.

Представленные на рисунке 36 данные отражают динамику содержания обменного калия (K_2O) в верхней части гумусового горизонта чернозема выщелоченного при различных вариантах землепользования за период 2022–2024 гг. Развёрнутая статистическая оценка приведена в приложении В.

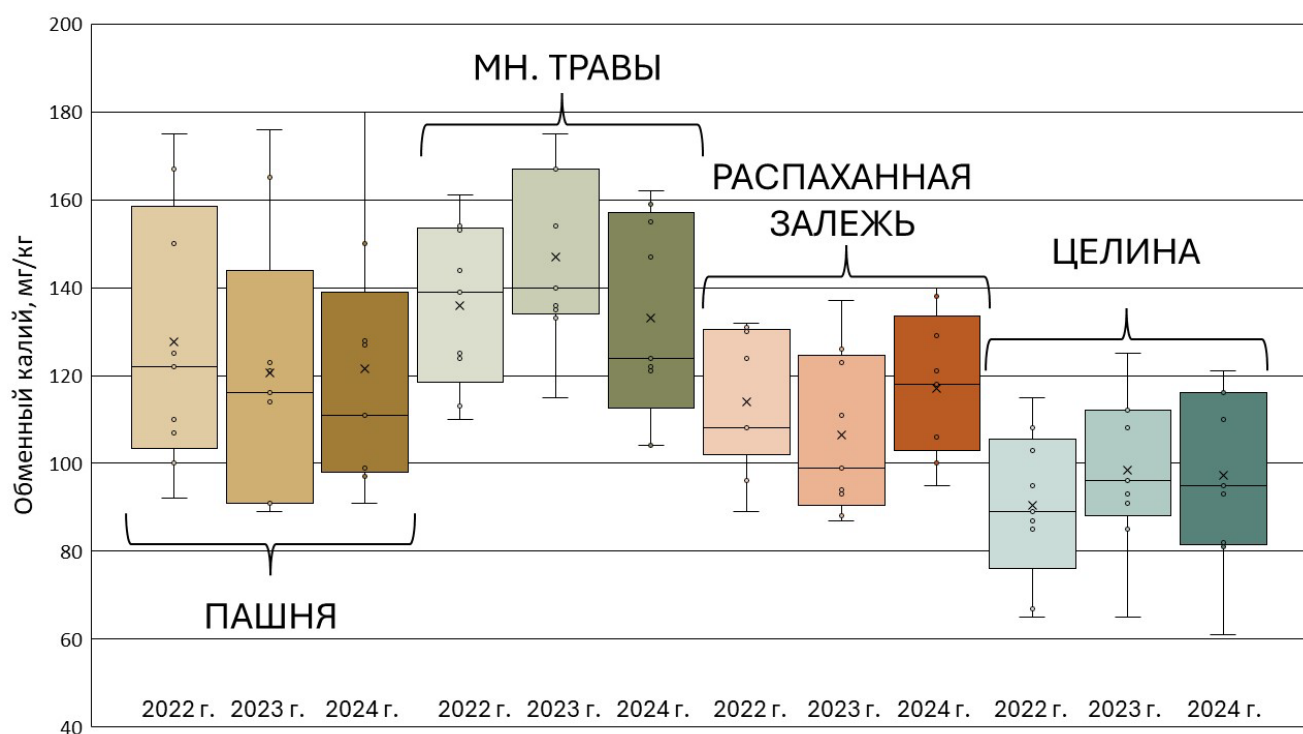


Рисунок 36 – Содержание обменного калия (K_2O) (мг/кг почвы) в верхней части гумусового горизонта (Апах 0–20 см, для целины А 5–20 см) чернозема выщелоченного по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

На пашне наблюдалась относительно стабильная динамика содержания калия. В 2022 году показатель составлял 128 ± 30 мг/кг почвы, что соответствовало

V классу (высокая обеспеченность). В 2023 году произошло незначительное снижение до 121 ± 31 мг/кг, а к 2024 году показатель восстановился до 122 ± 29 мг/кг, оставаясь в пределах V класса.

Под многолетними травами зафиксировано колебание содержания калия в пределах высокой обеспеченности. Начальное значение 2022 года — 136 ± 19 мг/кг. В 2023 году показатель увеличился до 147 ± 20 мг/кг, а к 2024 году снизился до 133 ± 23 мг/кг, оставаясь в пределах V класса обеспеченности.

На распаханной залежи отмечалась умеренная динамика содержания калия. В 2022 году показатель составлял 114 ± 16 мг/кг (IV класс, повышенная обеспеченность). В 2023 году произошло снижение до 106 ± 18 мг/кг, а к 2024 году показатель возрос до 117 ± 16 мг/кг, оставаясь в пределах IV класса.

На целинном участке наблюдалась незначительная динамика содержания калия. Начальное значение 2022 года — 90 ± 17 мг/кг (IV класс). В 2023 году показатель увеличился до 99 ± 18 мг/кг, а к 2024 году составил 97 ± 20 мг/кг, оставаясь в пределах IV класса обеспеченности.

Анализ динамики показал, что во всех вариантах землепользования содержание обменного калия остаётся в пределах высокой и повышенной обеспеченности. Наиболее стабильные показатели наблюдались на пашне, где содержание калия поддерживается на высоком уровне. Наименьшие значения зафиксированы на целинном участке, хотя и там обеспеченность остаётся достаточной.

Представленные данные на рисунке 37 отражают динамику содержания обменного калия (K_2O) в нижней части гумусового горизонта (20–40 см) чернозема выщелоченного при различных вариантах землепользования за период 2022–2024 гг. Развёрнутая статистическая оценка приведена в приложении В.

На пашне наблюдалась нестабильная динамика содержания калия. В 2022 году показатель составлял 92 ± 28 мг/кг (IV класс, повышенная обеспеченность). В 2023 году произошло увеличение до 107 ± 23 мг/кг, однако к 2024 году отмечено снижение до 79 ± 21 мг/кг, что соответствует III классу (средняя обеспеченность).

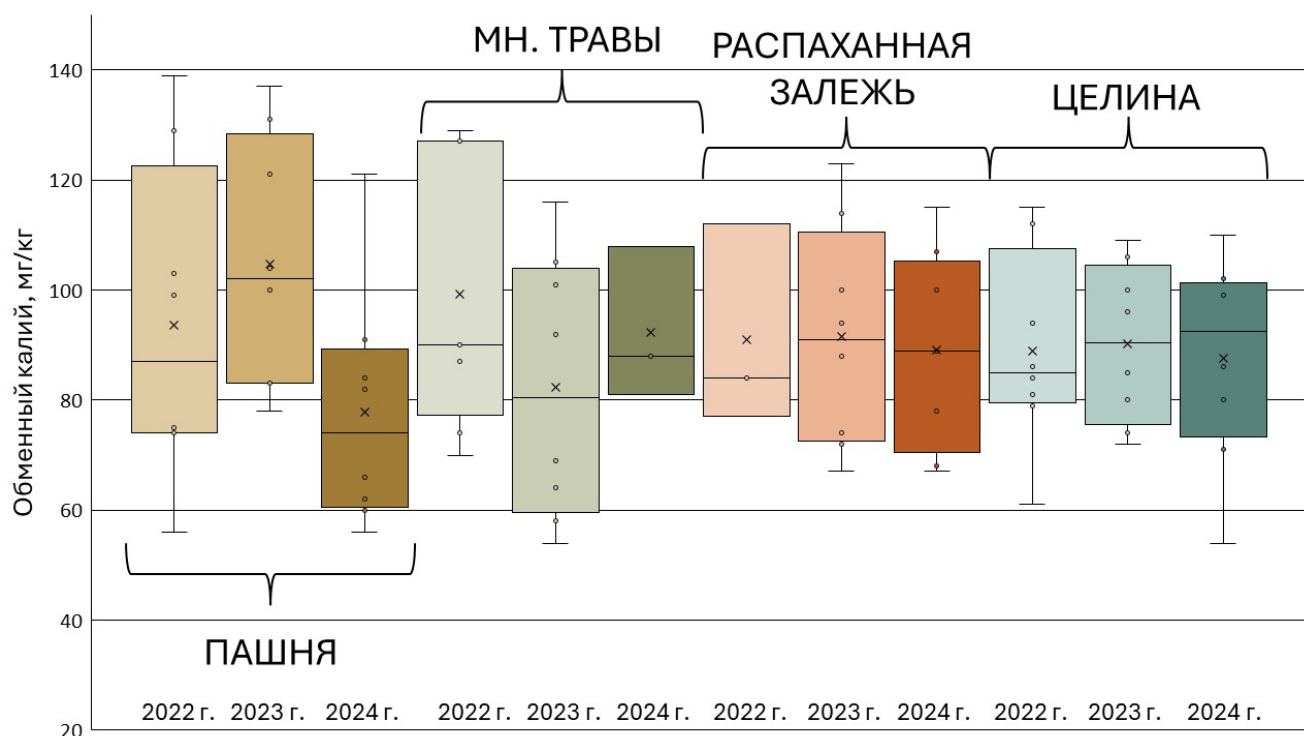


Рисунок 37 – Содержание обменного калия (K₂O) (мг/кг почвы) в нижней части гумусового горизонта (А 20–40 см) чернозема выщелоченного по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

Под многолетними травами отмечалась колебательная динамика. Начальное значение 2022 года — 100 ± 23 мг/кг (IV класс). В 2023 году зафиксировано снижение до 81 ± 23 мг/кг, а к 2024 году показатель возрос до 101 ± 10 мг/кг, оставаясь в пределах IV класса.

На распаханной залежи наблюдалась относительно стабильная картина. В 2022 году содержание составило 93 ± 15 мг/кг (IV класс), в 2023 году показатель остался на уровне 93 ± 19 мг/кг, а к 2024 году незначительно снизился до 87 ± 17 мг/кг, оставаясь в пределах IV класса.

На целинном участке отмечалась тенденция к снижению обеспеченности калием. Начальное значение 2022 года — 85 ± 19 мг/кг (IV класс). В 2023 году произошло существенное снижение до 65 ± 10 мг/кг (III класс), а к 2024 году показатель составил 73 ± 11 мг/кг, оставаясь в пределах III класса.

Анализ динамики показал, что во всех вариантах землепользования содержание обменного калия остаётся в пределах повышенной и средней

обеспеченности. Наиболее стабильные показатели наблюдались на распаханной залежи. Наибольшие колебания зафиксированы на пашне, где произошло снижение класса обеспеченности с IV до III. На целинном участке также отмечалась тенденция к снижению обеспеченности калием.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По существу выполненной работы можно сделать ряд выводов:

1. Проведенное исследование динамики содержания гумуса в черноземе выщелоченном среднегумусном среднемощным тяжелосуглинистом на тяжелом лессовидном суглинке Тульской области при различном характере землепользования показало, что на участке с постоянным использованием под пашню среднее содержание гумуса в верхней част гумусового горизонта составило 6,06% и было наиболее низким и стабильным в течение трех лет по сравнению с другими исследуемыми вариантами землепользования. На целинном участке и на участке многолетних трав среднее содержание гумуса в почве было близко по значениям и превышало содержание гумуса на постоянной пашне на 0,6%, наиболее высокое содержание гумуса в 7,17% отмечено на участке залежи, введенной в оборот. Динамика гумуса в нижней части гумусового горизонта отражает общие тенденции уменьшения гумуса с глубиной, но не показала связи с характером землепользования.

2. Достоверно наиболее высокое содержание легкоразлагаемого органического вещества (ЛОВ) отмечено для пахотного горизонта в черноземе выщелоченном среднегумусном среднемощным тяжелосуглинистом на тяжелом лессовидном суглинке на участке с многолетними травами — 1,06%, менее выраженное, но также достоверное повышение содержания ЛОВ наблюдалось в пахотном горизонте на участке распаханной залежи, где оно составило 0,69%. На участке многолетних трав и залежи после распашки произошло на 3-ий год произошло снижение содержания ЛОВ, вследствие изменения характера поступления органических остатков и активной минерализации после распашки наиболее лабильной части гумуса и ЛОВ, и составило 0,46% и 0,39%.

3. Целинный чернозем выщелоченный среднегумусный среднемощный тяжелосуглинистый на тяжелом лессовидном суглинке в верхней части гумусового горизонта характеризуется средним содержанием ЛОВ за 3 года в 0,70%, что на

30% меньше, чем на участке с многолетними травами, что связано с более высоким качеством культурного травостоя.

4. Содержание легкоразлагаемого органического вещества (легкой фракции) в пахотном горизонте чернозема выщелоченного среднегумусного среднемощного тяжелосуглинистого на тяжелом лессовидном суглинке в условиях пашни стабилизировалось на уровне в 0,38%., что является наиболее низким для исследуемых вариантов землепользования.

5. Для чернозема выщелоченного среднегумусного среднемощного тяжелосуглинистого на тяжелых лессовидных суглинках лесостепной зоны в плакорных агроэкологических условиях, содержание перманганат-окисляемого углерода (РОХС) в среднем составляло 1035 ± 183 мг/кг, что характеризует высокий уровень его содержания и качественно хорошее состояние почв по этому показателю. Для нижней части гумусового горизонта содержание РОХС по всем вариантам землепользования было ниже на 250 мг/кг и в среднем составило 788 ± 99 мг/кг.

6. Показатель содержания перманганат-окисляемого органического углерода (РОХС) в исследуемых условиях оказался нечувствительным к изменению характера землепользования, что связано с характерным для черноземов высоким содержанием органического углерода и высокой биологической активностью, которые способствуют высокому уровню содержания перманганат-окисляемого углерода независимо от характера землепользования. Для того, чтобы повысить его чувствительность на черноземах необходима его модернизация, требующая специальных методических исследований.

7. В условиях целины и залежи в черноземе выщелоченном среднегумусном среднемощным тяжелосуглинистом на тяжелом лессовидном суглинке в верхней части гумусового горизонта складывается отличное структурное состояние с содержанием агрономически ценных агрегатов порядка 82–85%, а при введении его в сельскохозяйственное использование и распашки на 3 год происходит их на 10% до уровня постоянной пашни. Использование многолетних трав в севообороте способствовало повышению уровня структурного состояния до целинного и таким

образом позволило поддерживать высокий уровень агрокультуры и стабильно хорошее структурное состояние. Нижняя часть гумусового горизонта характеризовалась схожими трендами — для нее характерно хорошее структурное состояние, для целинного участка агрономически ценные агрегаты составляют 79% против 64% на пашне.

8. В условиях Тульской области на черноземе выщелоченном среднегумусном среднемощным тяжелосуглинистом на тяжелом лессовидном суглинке индекс отношения органического углерода к гранулометрической фракции менее 0,002 мм в наблюдаемых условиях оказался нечувствительным к характеру землепользования. Средний уровень значений индекса по всем исследованным вариантам землепользований составил 0,154–0,188, что значительно выше порога отличной оценки в 0,125.

9. Содержания подвижного фосфора и обменного калия в условиях исследования отражают устоявшиеся в условиях землепользования уровни и при введении в оборот залежного участка не показали значимых изменений ввиду поддерживающего уровня применения удобрений.

10. Физико-химические свойства чернозема выщелоченного среднегумусного среднемощного тяжелосуглинистого на тяжелом лессовидном суглинке в условиях исследований также не показали изменений в результате введения в оборот залежного участка. Сухой 2024 год способствовал активации восходящего тока и подтягиванию карбонатов из нижней части почвы, в том числе и Ca^{2+} , что привело к отразилось на увеличении pH, снижении гидролитической кислотности и росте содержания поглощённых оснований. При этом эффект сильнее оказался на целинном участке, где была сильнее выражена десукция.

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВУ

При вовлечении залежных тяжелосуглинистых выщелоченных черноземов в пашню рекомендуется применять поэтапную систему освоения, направленную на сохранение органического вещества и структурного состояния почвы. Перед распашкой залежного участка целесообразно провести агрохимическое и агрофизическое обследование с определением содержания гумуса, лабильного легкоразлагаемого органического вещества, подвижного фосфора, обменного калия, величины рН, гидролитической кислотности, суммы поглощенных оснований и структурно-агрегатного состава. Первичную обработку залежи следует проводить в оптимальные сроки физической спелости почвы, избегая переувлажнения или чрезмерного иссушения, с минимизацией числа механических проходов, чтобы снизить разрушение агрономически ценных агрегатов.

В первые годы после распашки залежи необходимо предусматривать обязательное поступление органического вещества в почву за счет оставления и заделки послеуборочных остатков, использования сидеральных культур, внесения органических удобрений при их наличии и применения поддерживающих доз минеральных удобрений с учетом агрохимического состояния почвы и выноса элементов питания урожаем. Для предотвращения ускоренной минерализации лабильной части гумуса не рекомендуется длительное использование вновь освоенного участка в севооборотах с большой долей пропашных культур, без культур, формирующих значительную корневую массу.

Оптимальным направлением последующего использования распаханной залежи является включение ее в биологизированный севооборот с обязательным введением многолетних трав. Размещение многолетних трав в первые годы после освоения залежи или после короткого периода возделывания однолетних культур позволяет частично компенсировать потери лабильных форм органического вещества, поддерживать содержание агрономически ценных агрегатов и сохранять структурное состояние, близкое к исходному.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ЛОВ — лабильное (легкоразлагаемое, легкая фракция) органическое вещество;

СЛОВ — углерод лабильного органического вещества;

ПП — почвенный покров;

ППК — почвенно-поглощающий комплекс;

ЭПА — элементарный почвенный ареал;

ЭПС — элементарная почвенная структура;

SOM — soil organic mater (органическое вещество почв);

SOC — soil organic carbon (органический углерод почв);

CLAY — глина, механические элементы размером менее 0,002 мм;

POXC — permanganate oxidizable carbon (перманганат-окисляемый углерод).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агробιοтехнологии XXI века / И.И. Серегина, С.П. Торшин, Н.Н. Новиков [и др.]. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Мегаполис", 2022. – 516 с.
2. Агроклиматический справочник по Тульской области [Текст] / Упр. гидрометеорол. службы центр. областей. – Москва: [б. и.], 1966. – 132 с.: карт.
3. Агроэкологическая оценка земель, проектирование адаптивно-ландшафтных систем земледелия и агротехнологий / Под ред. В.И. Кирюшина, А.Л. Иванова – Москва: Росинформагротех, 2005. – 784 с.
4. Агроэкологическое состояние и перспективы использования земель России, выбывших из активного сельскохозяйственного оборота: материалы Всероссийской научной конференции / под ред. акад. А.Л. Иванова. – Москва: Почвенный институт имени В.В. Докучаева Россельхозакадемии, 2008. – 405 с.
5. Аксенова, Ю.В. Состояние залежных земель степной зоны Омского Прииртышья и возможность их повторного введения в оборот / Ю.В. Аксенова, А.М. Гиндемит // Российская сельскохозяйственная наука. – 2022. – № 6. – С. 37–44. – DOI: 10.31857/S2500262722060084.
6. Амелин, А.В. Агрохимическое и фитосанитарное состояние полей, выведенных из сельскохозяйственного оборота Орловской области / А.В. Амелин, В.М. Казьмин, Н.Н. Лысенко [и др.] // Плодородие. – 2013. – № 6. – С. 7–9.
7. Артемьева, З.С. Химическая структура органического вещества агрочерноземов разных позиций на склоне / З.С. Артемьева, Н.Н. Данченко, Ю.Г. Колягин [и др.] // Почвоведение. – 2023. – № 6. – С. 703–714. – DOI: 10.31857/S0032180X22601517. – EDN FQDGYL.
8. Борисов, Б.А. Органическое вещество и физические свойства постагрогенной эродированной дерново-подзолистой почвы в сравнении с пахотным аналогом / Б.А. Борисов, О.Е. Ефимов, О.В. Елисеева // Почвоведение. – 2022. – № 7. – С. 909–917. – DOI: 10.31857/S0032180X22070036.

9. Борисов, Б.А. Концептуальная модель формирования и функционирования легкоразлагаемого органического вещества почв / Б.А. Борисов, Н.Ф. Ганжара // Доклады ТСХА. – 2006. – Вып. 278. – С. 550–553.

10. Борисов, Б.А. Легкоразлагаемое органическое вещество целинных и пахотных почв зонального ряда европейской части России: дис. ... д-ра биол. наук / Б.А. Борисов. – Москва, 2008. – 275 с. – EDN QDZRUN.

11. Борисов, Б.А. Органическое вещество почв (генетическая и агрономическая оценка): монография / Б.А. Борисов, Н.Ф. Ганжара; М-во сельского хоз-ва Российской Федерации, Российский гос. аграрный ун-т – МСХА им. К.А. Тимирязева. – Москва: Изд-во РГАУ-МСХА, 2015. – 213 с.

12. Бородина, К.С. Агрегатный состав пахотных горизонтов выщелоченного чернозема при возврате залежных земель в пашню в условиях среднерусской провинции лесостепной зоны / К.С. Бородина, А.А. Козюлина // Сборник трудов Всероссийской молодежной научной конференции с международным участием «VIII Вильямсовские чтения», посвященной 160-летию В.Р. Вильямса (Москва, 30 ноября – 2 декабря 2023 г.). – Москва: Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, 2023. – С. 43–45.

13. Бородина, К.С. Дизайн эксперимента по оценке состояния чернозема выщелоченного лесостепной зоны в условиях изменения землепользования / К.С. Бородина // Международная научная конференция молодых учёных и специалистов, посвящённая 180-летию со дня рождения К.А. Тимирязева: сборник статей (Москва, 5–7 июня 2023 г.). – Москва: Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, 2023. – С. 391–396.

14. Бородина, К.С. Динамика лабильного органического вещества в черноземе выщелоченном при возврате залежи в пашню / К.С. Бородина, Н.В. Минаев // Сборник трудов Всероссийской молодежной научной конференции с международным участием IX Вильямсовские чтения, Москва, 27–28 ноября 2024 года. – Москва: Российский государственный аграрный университет, 2024. – С. 349–352.

15. Бородина, К.С. Использование перманганатного метода окисления углерода для оценки состояния органического вещества чернозема выщелоченного лесостепной зоны при возврате залежи в пашню / К.С. Бородина, Б.А. Борисов, Н.В. Минаев // 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. 116–117.

16. Бородина, К.С. Оценка структуры чернозёма выщелоченного Тульской области при различном характере землепользования / К.С. Бородина, Н.В. Минаев, Б.А. Борисов // Journal of Agriculture and Environment. – 2026. – № 5 (69). – DOI: 10.60797/JAE.2026.69.5. – URL: <https://jae.cifra.science/archive/5-69-2026-may/10.60797/JAE.2026.69.5> (дата обращения: 16.06.2026).

17. Бородина, К.С. Перманганат окисляемый углерод как показатель состояния органического вещества чернозема выщелоченного лесостепной зоны при возврате залежных земель в пашню / К.С. Бородина // Материалы Международной научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 150-летию со дня рождения А.Я. Миловича: Сборник статей, Москва, 03–05 июня 2024 года. – Москва: Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, 2024. – С. 419–422.

18. Бородина, К.С. Предварительная оценка содержания гумуса и структурного состояния почв лесостепной зоны в условиях залежи / К.С. Бородина, Н.В. Минаев // Материалы Международной научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 135-летию со дня рождения А.Н. Костякова: сборник статей, Москва, 06–08 июня 2022 года. Том 1. – Москва: Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, 2022. – С. 342–345.

19. Бородина, К.С. Содержание гумуса и лабильного органического вещества в черноземе выщелоченном Плавского района Тульской области при различном характере землепользования / К.С. Бородина, Н.В. Минаев, Б.А. Борисов //

Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. – 2025. – № 2. – С. 20–31. – DOI: 10.26897/0021-342X-2025-2-20-31.

20. Бурдуковский, М.Л. Агроэкологическое состояние почв и восстановление растительности в залежных экосистемах / М.Л. Бурдуковский, П.А. Перепелкина // Биота и среда природных территорий. – 2022. – Т. 10. – № 2. – С. 28–36. – DOI: 10.37102/2782-1978_2022_2_3.

21. Вильямс, В.Р. Избранные сочинения. Работы по почвоведению (1898–1931) Т. 1. / В.Р. Вильямс. – Москва: Изд-во и 2-я тип. Изд-ва Акад. наук СССР, 1950. – 791 с.

22. Галеева, Л.П. Свойства почв солонцовых комплексов Барабы в агроценозе пашня – залежь / Л.П. Галеева // Агрохимия. – 2020. – № 7. – С. 17–25. DOI: 10.31857/S0002188120070066.

23. Ганжара, Н.Ф. Легкоразлагаемое органическое вещество и его роль в плодородии почв / Н.Ф. Ганжара, М.А. Флоринский, Б.А. Борисов // Основные итоги исследований по проблеме генезиса и мелиорации почв. – Москва: Изд-во МСХА, 1993. – С. 22–26.

24. Гиниятуллин, К.Г. Использование геостатистических методов для оценки запасов органического вещества в залежных почвах / К.Г. Гиниятуллин, С.С. Рязанов, Е.В. Смирнова [и др.] // Ученые записки Казанского университета. Серия: Естественные науки. – 2019. – Т. 161. – № 2. – С. 275–292. – DOI: 10.26907/2542-064X.2019.2.275-292.

25. Голеусов, П.В., Тренды воспроизводства постагрогенных почв в лесостепной зоне Европейской территории России. / П.В. Голеусов, Ф.Н. Лисецкий, А.В. Малышев // Геополитика и экогеодинамика регионов. – 2024. – Т. 20. – Вып. 1. – С. 165–180.

26. Голубев, И.Г. Состояние и перспективы вовлечения залежных земель в оборот/ И.Г. Голубев, А.С. Апатенко, Н.С. Севрюгина // Мелиорация. – 2021. – № 3 (97). – С. 67–74.

27. Доклад о состоянии и использовании земель сельскохозяйственного назначения Российской Федерации в 2020 году [Электронный ресурс]. – Москва:

ФГБНУ «Росинформагротех», 2022. – 384 с. – URL: <https://www.mcхac.ru/upload/iblock/859/85939bcfcc1153e193246538bf900ea0.pdf> (дата обращения: 20.02.2024).

28. Доктрина продовольственной безопасности Российской Федерации. Москва: ФГБНУ «Росинформагротех», – 2020. – 26 с.

29. Дюшофур, Ф. Основы почвоведения. Эволюция почв: опыт изучения динамики почвообразования / Ф. Дюшофур; пер. с фр. – Москва: Прогресс, 1970. – 591 с.

30. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России утверждено Министерством сельского хозяйства Российской Федерации / М-во сел. хоз-ва Рос. Федерации, Рос. акад. с.-х. наук. – Версия 1.0. – Москва, Тула: Почвенный институт, Гриф и К, 2014. – 760 с.

31. Екимовская, О.А. Региональные аспекты возвращения залежных земель в сельскохозяйственный оборот (Республика Бурятия) / О.А. Екимовская, А.П. Сизых, В.Л. Рупосов [и др.] // География и природные ресурсы. – 2023. – Т. 44. – № 3, – С. 117–126. – DOI: 10.15372/GIPR20230312.

32. Ерёмин, Д.И. Залежь как средство восстановления содержания и запасов гумуса старопахотных черноземов лесостепной зоны Зауралья / Д.И. Ерёмин // Плодородие. – 2014. – № 1 (76). – С. 24–26.

33. Ефимов, О.Е. Агроэкологическая оценка уплотнения почв / О.Е. Ефимов, В.И. Савич, В.В. Гукалов, К.С. Бородина // Плодородие. – 2021. – № 1(118). – С. 54–56. – DOI: 10.25680/S19948603.2021.118.15.

34. Ефимов, О.Е. Уплотнение почв, как фактор корректировки моделей плодородия почв / О.Е. Ефимов, А.Е. Сорокин, П.Н. Балабко [и др.] // АгроЭкоИнфо. – 2021. – № 1(43). – С. 18. – DOI: 10.51419/20211111.

35. Зинякова, Н.Б. Активное органическое вещество в серой лесной почве пахотных и залежных земель / Н.Б. Зинякова, А.К. Ходжаева, А.С. Тулина [и др.] // Агрохимия. – 2013. – № 9. – С. 3–14.

36. Зыбалов, В.С. Результаты мониторинга залежных земель в лесостепной зоне Южного Урала / В.С. Зыбалов, Н.С. Сергеев, М.В. Запевалов // АПК России. – 2020. – Т. 27. – № 1. – С. 30–37.

37. Иванов, А.Л. Рациональное использование и охрана земельных (почвенных) ресурсов Российской Федерации / А.Л. Иванов // Вестник Российской сельскохозяйственной науки. – 2015. – № 1. – С. 7–10.

38. Иванов, А.И. Агрономическая эффективность освоения закустаренной залежи при воспроизводстве плодородия почв / А.И. Иванов, Ж.А. Иванова, И.В. Соколов // Плодородие. – 2020. – № 2 (113). – С. 37–40. – DOI: 10.25680/S19948603.2020.113.11.

39. Казеев, К.Ш. Постагrogenное изменение ферментативной активности и содержания органического углерода чернозема в первые 3 года залежного режима / К.Ш. Казеев, А.В. Трушков, М.Ю. Одабашян [и др.] // Почвоведение. – 2020. – № 7. – С. 901–910. – DOI: 10.31857/S0032180X20070059.

40. Карта почвенно-географического районирования СССР: для высших учебных заведений / спец. содерж. разработ. сотр. фак. почвоведения МГУ; отв. ред. И.Ю. Кульбацкая; ред. сер. карт природы И.П. Заруцкая. – 1:8 000 000, 80 км в 1 см. – Испр. в 1986 г. – Москва: ГУГК, 1986. – 2 л.

41. Каштанов, А.Н. Технология восстановления и использования земель, выбывших из сельскохозяйственного оборота / А.Н. Каштанов, О.А. Сизов // Агроэкологическое состояние и перспективы использования земель России, выбывших из активного сельскохозяйственного оборота: материалы Всероссийской научной конференции / Под ред. акад. А.Л. Иванова. Москва: Почвенный институт имени В.В. Докучаева Россельхозакадемии, – 2008. – С. 174–183.

42. Кирюшин, В.И. Последствия земельной реформы и проблема оптимизации использования земельных ресурсов / В.И. Кирюшин // Агроэкологическое состояние и перспективы использования земель России, выбывших из активного сельскохозяйственного оборота: материалы Всероссийской научной конференции / Под ред. акад. А.Л. Иванова. Москва:

Почвенный институт имени В.В. Докучаева Россельхозакадемии, – 2008. – С. 80–86.

43. Кирюшин, В.И. Теория адаптивно-ландшафтного земледелия и проектирования агроландшафтов / В.И. Кирюшин. – Москва: КолосС, 2011. – 443 с.

44. Кирюшин, В.И. Экологические основы проектирования сельскохозяйственных ландшафтов / В.И. Кирюшин. – Санкт-Петербург: ООО «Квадро», – 2018. – 567 с.

45. Классификация и диагностика почв России. – Смоленск: Ойкумена, 2004. – 342 с.

46. Классификация и диагностика почв СССР / [Сост. чл.-кор. ВАСХНИЛ В.В. Егоров, профессора В.М. Фридланд, Е.Н. Иванова [и др.]]; Почв. ин-т им. В.В. Докучаева. – Москва: Колос, 1977. – 223 с.

47. Китов, М.В. Изменения площадей залежных земель на Европейской территории России за период 1990–2013 гг. / М.В. Китов, А.Н. Цапков // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки. – 2015. – № 15 (212). – Вып. 32. – С. 163.

48. Когут, Б.М. Дегумусирование и почвенная секвестрация углерода / Б.М. Когут, В.М. Семенов, З.С. Артемьева [и др.] // Агрохимия. – 2021. – № 5. – С. 3–13.

49. Когут, Б.М. Сравнительный анализ методов определения содержания гумуса в почвах / Б.М. Когут, А.С. Фрид // Почвоведение. – 1993. – № 9. – С. 119–123.

50. Королева, П.В. Пространственно-временные связи между землепользованием и почвенным покровом пахотных угодий (на примере Арсеньевского и Плавского районов Тульской области в период с 1969 по 2020 гг.): дис. ... канд. с.-х. наук: 1.5.19 / П.В. Королева. – Москва, 2023. – 145 с.

51. Куликова, Е.Г. Мониторинг земель сельхозназначения выбывших из оборота / Е.Г. Куликова, С.Ю. Ефремова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. Серия: Технические науки. Безопасность деятельности человека. – 2017. – № 01 (35). – С. 71–79.

52. Курманбаев, А.А. Концепция почвенного здоровья и современные индикаторы здоровья почв / А.А. Курманбаев, Т.Р. Сүндет // Почвоведение и агрохимия. – 2023. – № 2. – С. 91–106. – DOI: 10.51886/1999-740X_2023_2_91.

53. Курганова, И.Н. Запасы органического углерода в почвах Российской Федерации: современные оценки в связи с изменением системы землепользования / И.Н. Курганова, В.О. Лопес де Гереню // Доклады Академии наук. – 2009. – Т. 426. – № 1. – С. 132–134.

54. Курганова, И.Н. Влияние типа землепользования на физические свойства черноземов лесостепной зоны Западной Сибири / И.Н. Курганова, В.О. Лопес де Гереню, Е.Н. Смоленцева [и др.] // Почвоведение. – 2021. – № 9. – С. 1061–1075. – DOI: 10.31857/S0032180X21090045.

55. Лопес де Гереню, В.О. Изменение пулов органического углерода при самовосстановлении пахотных черноземов / В.О. Лопес де Гереню, И.Н. Курганова, А.И. Ермолаев [и др.] // Агрохимия. – 2009. – № 5. – С. 5–12.

56. Люри, Д.И. Динамика сельскохозяйственных земель России в XX веке и постагрогенное восстановление растительности и почв / Д.И. Люри, С.В. Горячкин, Н.А. Караваева [и др.]. – Москва: ГЕОС, 2010. – 416 с.

57. Малышев, А.В. Особенности воспроизводства почв на залежах в различных физико-географических условиях Белгородской области / А.В. Малышев // Региональные геосистемы. – 2021. – Т. 45. – № 1. – С. 40–50. – DOI: 10.52575/2712-7443-2021-45-1-40-50.

58. Мамонтов, В.Г. Методы почвенных исследований: учебник для вузов / В.Г. Мамонтов. – 2-е изд., стер. – Санкт-Петербург: Лань, 2021. – 260 с. – ISBN 978-5-8114-6791-4. – Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/152448> (дата обращения: 24.04.2025). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

59. Мамонтов, В.Г. Химический анализ почв и использование аналитических данных: лабораторный практикум / В.Г. Мамонтов. – Санкт-Петербург: Лань, 2021. – 328 с.

60. Миллер, Г.Ф. К вопросу об изменении некоторых свойств почв под молодыми залежами на территории Новосибирской области / Г.Ф. Миллер, С.В. Соловьев, А.Н. Безбородова [и др.] // Современные проблемы науки и образования. – 2017. – № 6. – С. 249.

61. Минаев, Н.В. Агроэкологическая оценка серых лесных почв Владимирского Ополя методами дистанционного зондирования / Н.В. Минаев, Н.Л. Поветкина, Д.В. Мусенова // Плодородие. – 2017. – № 1(94). – С. 48–50.

62. Минаев, Н.В. Методика крупномасштабного картографирования почв сельскохозяйственных земель в условиях цифровизации / Н.В. Минаев, О.Е. Ефимов, Б.А. Борисов [и др.] // 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. 265–266.

63. Мировая реферативная база почвенных ресурсов. Международная система почвенной классификации для диагностики почв и составления легенд почвенных карт / пер. с англ. С. Фортовой; науч. ред. пер. М.И. Герасимовой, П.В. Красильникова. – 4-е изд. – Москва: МАКС Пресс, 2024. – 248 с. – DOI: 10.29003/m4174.978-5-317-07235-3.

64. Морковкин, Г.Г. К оценке влияния сидератов и залежи на изменение плодородия чернозёмов выщелоченных в условиях умеренно засушливой и колючной степи Алтайского края / Г.Г. Морковкин, И.В. Дёмина // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2011. – № 11 (85). – С. 18–22.

65. Наквасина, Е.Н. Динамика запасов углерода при формировании лесов на постагрогенных землях / Е.Н. Наквасина, Ю.Н. Шумилова // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2021. – № 1 (379). – С. 46–59. – DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-46-59.

66. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Части 1–6. Вып. 28: Калужская, Тульская, Тамбовская, Брянская,

Липецкая, Орловская, Курская, Воронежская, Белгородская области. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1990.

67. Национальный атлас почв Российской Федерации / Моск. гос. ун-т им. М.В. Ломоносова, фак. почвоведения; науч. конс. Г.В. Добровольский; гл. ред. С.А. Шоба; отв. ред.: И.О. Алябина, И.С. Урусевская, О.В. Чернова. – Москва: Астрель: Факультет почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова, 2011. – 631 с.

68. Нечаева, Т.В. Залежные земли России: распространение, агроэкологическое состояние и перспективы использования (обзор) / Т.В. Нечаева // Почвы и окружающая среда. – 2023. – № 2. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/zaleznyye-zemli-rossii-rasprostranenie-agroekologicheskoe-sostoyanie-i-perspektivy-ispolzovaniya-obzor> (дата обращения: 10.10.2024).

69. Овсепян, Л.А. Изменение денситометрического фракционного состава органического вещества почв лесостепной зоны в процессе постагрогенной эволюции / Л.А. Овсепян, И.Н. Курганова, В.О. Лопес де Гереню [и др.] // Почвоведение. – 2020. – № 1. – С. 56–68. – DOI: 10.1134/S0032180X20010128.

70. Орлов, Д.С. Органическое вещество почв Российской Федерации / Д.С. Орлов, О.Н. Бирюкова, Н.И. Суханова. – Москва: Наука, 1996. – 253 с.

71. Орлов, Д.С. Эколого-геохимические проблемы гумусообразования / Д.С. Орлов // Роль органического вещества в формировании почв и их плодородия: науч. тр. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. – Москва, 1990. – С. 5–15.

72. Погода и климат [Электронный ресурс]. – URL: http://www.pogodaiklimat.ru/history/27814_2.htm (дата обращения: 30.05.2024).

73. Постановление Правительства РФ от 14 мая 2021 г. № 731 «О Государственной программе эффективного вовлечения в оборот земель сельскохозяйственного назначения и развития мелиоративного комплекса Российской Федерации» (с изменениями и дополнениями) [Электронный ресурс]. – URL: <http://base.garant.ru/400773886/>.

74. Постановление Правительства РФ от 27 октября 2021 г. № 1832 «О внесении изменений в Государственную программу эффективного вовлечения в

оборот земель сельскохозяйственного назначения и развития мелиоративного комплекса Российской Федерации» [Электронный ресурс]. – URL: http://base.garant.ru/402994306/#block_10002.

75. Попков, А.П. Влияние направления использования залежей на некоторые агрофизические свойства почв / А.П. Попков, О.А. Сорокина // АгроЭкоИнфо: электронный научно-производственный журнал. – 2023а. – № 1. – URL: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2023/1/st_128.pdf. – DOI: 10.51419/202131128.

76. Попков, А.П. Влияние повторного освоения залежей на свойства почв в Красноярской лесостепи / А.П. Попков, О.А. Сорокина // АгроЭкоИнфо: электронный научно-производственный журнал. – 2023б. – № 2. – URL: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2023/2/st_223.pdf. – DOI: 10.51419/202132223.

77. Почвоведение: практикум: учебное пособие / Н.Ф. Ганжара, Б.А. Борисов, Р.Ф. Байбеков; под общ. ред. Н.Ф. Ганжары. – Москва: ИНФРА-М, 2025. – 256 с. + доп. материалы [Электронный ресурс]. – (Высшее образование: Бакалавриат). – DOI: 10.12737/992. – ISBN 978-5-16-020539-7. – ISBN-онлайн 978-5-16-100149-3. – URL: <https://znanium.ru/catalog/product/2180234> (дата обращения: 16.06.2026). – Режим доступа: по подписке.

78. Природа России – национальный портал [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.priroda.ru> (дата обращения: 11.06.2024).

79. Природно-сельскохозяйственное районирование земельного фонда СССР: карта / сост. и подгот. к печати ПКО «Картография» ГУГК в 1984 г.; спец. содерж. разраб. по плану НИР Гос. НИИ зем. ресурсов; ред. Т.С. Дюжева. – Москва: ГУГК, 1984.

80. Прохоров, А.А. Перманганат-окисляемый углерод как маркер качества почв агроландшафтов / А.А. Прохоров, Б.А. Борисов, О.Е. Ефимов // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. – 2024. – Вып. 121. – С. 47–69. – DOI: 10.19047/0136-1694-2024-121-47-69.

81. Пуртова, Л.Н. Состояние гумуса в некоторых типах залежных почв Приморья / Л.Н. Пуртова, И.В. Киселева, М.Л. Бурдуковский // Вестник Северо-

Восточного научного центра ДВО РАН. – 2019. – № 2. – С. 46–54. – DOI: 10.34078/1814-0998-2019-2-46-54.

82. Распоряжение Правительства РФ от 29 октября 2022 г. № 3240-р «Об утверждении важнейшего инновационного проекта государственного значения “Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ” и плана мероприятий (“дорожной карты”) по реализации первого этапа (2022–2024 гг.)» [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/405491263/>.

83. Ратников, А.И. Почвы Тульской области: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук / А.И. Ратников. – Москва, 1960. – 22 с.

84. Романовская, А.А. Органический углерод в почвах залежных земель России / А.А. Романовская // Почвоведение. – 2006. – № 1. – С. 52–61. – EDN HTAVKR.

85. Рухович, Д.И. Применение технологии спектральной окрестности линии почв для анализа интенсивности использования почвенного покрова в 1985–2014 гг. (на примере трех районов Тульской области) / Д.И. Рухович, А.Д. Рухович, Д.Д. Рухович [и др.] // Почвоведение. – 2018. – № 3. – С. 357–371.

86. Савич, В.И. Информационно-энергетическая оценка плодородия почв / В.И. Савич, К.С. Бородина, Н.В. Минаев // АгроЭкоИнфо. – 2023. – № 3(57). – DOI: 10.51419/202133307.

87. Саидов, М.М. Агрохимический мониторинг почв земель сельскохозяйственного назначения в Тульской области / М.М. Саидов, Г.А. Новикова, Е.М. Молчанова // Достижения науки и техники АПК. – 2016. – № 12. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/agrohimicheskiy-monitoring-pochv-zemel-selskohozyaystvennogo-naznacheniya-v-tulskoj-oblasti> (дата обращения: 12.02.2025).

88. Семенов, В.М. Почвенное органическое вещество / В.М. Семенов, Б.М. Когут // Почвенный институт им. В.В. Докучаева. – Москва: Издательство ГЕОС, 2015. – 233 с. – ISBN 978-5-89118-702-3. – EDN VQNCVL.

89. Соколов, А.С. Сравнительный анализ водно-физических и агрохимических показателей почвы на разновозрастных залежах дельты Волги /

А.С. Соколов, Г.Ф. Соколова // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. – 2020. – № 8 (161). – С. 49–56. – DOI: 10.36718/1819-4036-2020-8-49-56.

90. Сорокина, О.А. Постагрогенная трансформация серых почв залежей / О.А. Сорокина, В.В. Токавчук, А.Н. Рыбакова. – Красноярск: КрасГАУ, 2016. – 239 с.

91. Степанцова, Л.В. Влияние залежного состояния на физико-химические свойства и структуру чернозёма выщелоченного севера Тамбовской области / Л.В. Степанцова, В.Н. Красин, А.О. Гаврилов // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. – 2014. – № 4 (4). – С. 7–13.

92. Сычёв, В.Г. Состояние земельного фонда России и агрохимическая характеристика земель, выбывших из сельскохозяйственного оборота / В.Г. Сычёв, М.И. Лунёв, А.В. Павлихина // Агроэкологическое состояние и перспективы использования земель России, выбывших из активного сельскохозяйственного оборота: материалы Всероссийской научной конференции / под ред. акад. А.Л. Иванова. – Москва: Почвенный институт имени В.В. Докучаева Россельхозакадемии, 2008. – С. 122–125.

93. Телеснина, В.М. Динамика свойств почв и состава растительности в ходе постагрогенного развития в разных биоклиматических зонах / В.М. Телеснина, И.Н. Курганова, В.О. Лопес де Гереню [и др.] // Почвоведение. – 2017. – № 12. – С. 1514–1534. – DOI: 10.7868/S0032180X17120115.

94. Титлянова, А.А. Изменение чистой первичной продукции и восстановление запасов углерода в почвах залежей / А.А. Титлянова, С.В. Шибарева // Почвоведение. – 2022. – № 4. – С. 500–510. – DOI: 10.31857/S0032180X2204013X.

95. Трушков, А.В. Изменение содержания органического вещества в постагрогенных почвах Ростовской области / А.В. Трушков, М.Ю. Одабашян, К.Ш. Казеев [и др.] // Проблемы агрохимии и экологии. – 2019. – № 1. – С. 53–57. – DOI: 10.26178/AE.2019.94.88.009.

96. Тюрин, И.В. Органическое вещество почв и его роль в почвообразовании и плодородии: учение о почвенном гумусе / И.В. Тюрин. – Москва; Ленинград: Сельхозгиз, 1937. – 285 с.

97. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет) [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.meteorf.gov.ru/>.

98. Хитров, Н.Б. Сокращение пахотных угодий и посевных площадей в России, агроэкологическая оценка их состояния, перспективы дальнейшего использования, задачи нормативно-правового и научного обеспечения рационального использования и охраны земель / Н.Б. Хитров, Б.Ф. Апарин, И.И. Карманов [и др.] // Агроэкологическое состояние и перспективы использования земель России, выбывших из активного сельскохозяйственного оборота: материалы Всероссийской научной конференции / под ред. акад. А.Л. Иванова. – Москва: Почвенный институт имени В.В. Докучаева Россельхозакадемии, 2008. – С. 14–29.

99. Черкасов, Г.Н. Состояние и пути рационального использования залежных земель в условиях Центрального Черноземья / Г.Н. Черкасов, Н.П. Масютенко // Агроэкологическое состояние и перспективы использования земель России, выбывших из активного сельскохозяйственного оборота: материалы Всероссийской научной конференции / под ред. акад. А.Л. Иванова. – Москва: Почвенный институт имени В.В. Докучаева Россельхозакадемии, 2008. – С. 184–191.

100. Шарков, И.Н. Некоторые аспекты углерод-секвестрирующей способности пахотных почв / И.Н. Шарков, П.В. Антипина // Почвы и окружающая среда. – 2022. – Т. 5. – № 2. – e175. – DOI: 10.31251/pos.v5i2.175.

101. Шпедт, А.А. Гумусное состояние и рациональное использование почв залежных земель Приенисейской Сибири / А.А. Шпедт, Ю.Н. Трубников // Достижения науки и техники АПК. – 2017. – Т. 31. – № 5. – С. 5–8.

102. Шпедт, А.А. Тренды гумусного состояния залежных агропочв сельскохозяйственных ландшафтов Красноярского края / А.А. Шпедт, Ю.Н. Трубников // Новые методы и результаты исследований ландшафтов в Европе,

Центральной Азии и Сибири: монография в 5 т. Т. II / под ред. В.Г. Сычева, Л. Мюллера. – Москва: ВНИИА им. Д.Н. Прянишникова, 2018. – С. 113–117. – DOI: 10.25680/5875.2018.40.67.120.

103. Шеин, Е.В. Гранулометрический состав почв: проблемы методов исследования, интерпретации результатов и классификаций / Е.В. Шеин // Почвоведение. – 2009. – № 3. – С. 309–317.

104. Щепашенко, Д.Г. Запасы органического углерода в почвах России / Д.Г. Щепашенко, Л.В. Мухортова, А.З. Швиденко [и др.] // Почвоведение. – 2013. – № 2. – С. 123. – DOI: 10.7868/S0032180X13020123. – EDN PNQXGL.

105. Bell, M.J. The role of active fractions of soil organic matter in physical and chemical fertility of Ferrosols / M.J. Bell, P.W. Moody, R.D. Connolly, B.J. Bridge // Australian Journal of Soil Research. – 1998. – Vol. 36. – No. 5. – P. 809–820. – DOI: 10.1071/S98020.

106. Blair, G.J. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems / G.J. Blair, R.D.B. Lefroy, L. Lisle // Australian Journal of Agricultural Research. – 1995. – Vol. 46, No. 7. – P. 1459–1466. – DOI: 10.1071/AR9951459.

107. Blanco-Canqui, H. Impacts of soil organic carbon on soil physical behavior / H. Blanco-Canqui, J.G. Benjamin // Quantifying and Modeling Soil Structure Dynamics. – John Wiley & Sons, Ltd., 2015. – P. 11–40.

108. Byrnes, R.C. A global meta-analysis of grazing impacts on soil health indicators / R.C. Byrnes [et al.] // Journal of Environmental Quality. – 2018. – Vol. 47. – No. 4. – P. 758–765.

109. Cool, N. 6th FCC Interlaboratory Comparison 2009 / N. Cool, B. De Vos. – Belgium: Instituut voor Natuur en Bosonderzoek, 2010.

110. Cotrufo, M.F. The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter? / M.F. Cotrufo, M.D. Wallenstein, C.M. Boot, K. Denef, E.A. Paul // Global Change Biology. – 2013. – Vol. 19, No. 4. – P. 988–995. – DOI: 10.1111/gcb.12113.

111. Culman, S.W. Permanganate oxidizable carbon reflects a processed soil fraction that is sensitive to management / S.W. Culman, S.S. Snapp, M.A. Freeman [et al.] // *Soil Science Society of America Journal*. – 2012. – Vol. 76. – No. 2. – P. 494–504.
112. Culman, S.W. Short- and long-term labile soil carbon and nitrogen dynamics reflect management and predict corn agronomic performance / S.W. Culman, S.S. Snapp, J.M. Green [et al.] // *Agronomy Journal*. – 2013. – Vol. 105. – No. 2. – P. 493–502.
113. Culman, S.W. Permanganate oxidizable carbon: an indicator of biologically active soil carbon / S.W. Culman, T.T. Hurisso, J. Wade // *Soil Health Series*. – 2021. – Vol. 2. – P. 152–175.
114. Dexter, A.R. Complexed organic matter controls soil physical properties / A.R. Dexter [et al.] // *Geoderma*. – 2008. – Vol. 144. – No. 3–4. – P. 620–627.
115. Drinkwater, L.E. Legume-based cropping systems have reduced carbon and nitrogen losses / L.E. Drinkwater [et al.] // *Nature*. – 1998. – Vol. 396. – No. 6708. – P. 262–265.
116. Jones, E.J. Optimising POXC effective sensitivity as a soil indicator in Australian soils / E.J. Jones, Y. Hong, V. Pino, V. Pauly, K. Singh, D. Field, A.B. McBratney // *Soil Security*. – 2023. – Vol. 13. – Article 100116. – DOI: 10.1016/j.soisec.2023.100116.
117. Paul, E.A. The nature and dynamics of soil organic matter: plant inputs, microbial transformations, and organic matter stabilization / E.A. Paul // *Soil Biology and Biochemistry*. – 2016. – Vol. 98. – P. 109–126.
118. Fine, A.K. Statistics, scoring functions, and regional analysis of a comprehensive soil health database / A.K. Fine, H.M. van Es, R.R. Schindelbeck // *Soil Science Society of America Journal*. – 2017. – Vol. 81. – P. 589–601.
119. Gasch, C. Permanganate oxidizable carbon for soil health: does drying temperature matter? / C. Gasch, S. Mathews, A. Deschene [et al.] // *Agricultural & Environmental Letters*. – 2020. – Vol. 5. – Article e20019.
120. Gregorich, E.G. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils / E.G. Gregorich [et al.] // *Canadian Journal of Soil Science*. – 1994. – Vol. 74. – No. 4. – P. 367–385.

121. Gruver, J. Evaluating the sensitivity and linearity of a permanganate-oxidizable carbon method / J. Gruver // *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. – 2015. – Vol. 46. – P. 490–510.

122. Haynes, R.J. Labile organic matter fractions as central components of the quality of agricultural soils: an overview / R.J. Haynes // *Advances in Agronomy*. – 2005. – Vol. 85. – P. 221–268.

123. Hoffland, E. Eco-functionality of organic matter in soils / E. Hoffland [et al.] // *Plant and Soil*. – 2020. – Vol. 455. – P. 1–22.

124. Hurisso, T.T. Comparison of permanganate-oxidizable carbon and mineralizable carbon for assessment of organic matter stabilization and mineralization / T.T. Hurisso, S.W. Culman, W.R. Horwath [et al.] // *Soil Science Society of America Journal*. – 2016. – Vol. 80. – P. 1352–1364.

125. Hurisso, T.T. Repeatability and spatiotemporal variability of emerging soil health indicators relative to routine soil nutrient tests / T.T. Hurisso, S.W. Culman, K. Zhao // *Soil Science Society of America Journal*. – 2018. – Vol. 82. – P. 939–948.

126. Johannes, A. Soil organic carbon content and soil structure quality of clayey cropland soils: a large-scale study in the Swiss Jura region / A. Johannes [et al.] // *Soil Use and Management*. – 2023. – Vol. 39. – No. 2. – P. 707–716.

127. Koop, A.N. Is macroporosity controlled by complexed clay and soil organic carbon? / A.N. Koop [et al.] // *Geoderma*. – 2023. – Vol. 437. – Article 116565.

128. Körschens, M. Turnover of soil organic matter (SOM) and long-term balances: tools for evaluating sustainable productivity of soils / M. Körschens, A. Weigel, E. Schulz // *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*. – 1998. – Vol. 161. – No. 4. – P. 409–424.

129. Lal, R. Research and development priorities towards recarbonization of the biosphere / R. Lal [et al.] // *Recarbonization of the Biosphere: Ecosystems and the Global Carbon Cycle*. – 2012. – P. 533–544.

130. Lal, R. Soil aggregation and C sequestration / R. Lal // *Global Climate Change and Tropical Ecosystems*. – 2019. – P. 317–329.

131. Lefroy, R.D.B. Changes in soil organic matter with cropping as measured by organic carbon fractions and ^{13}C natural isotope abundance / R.D.B. Lefroy, G.J. Blair, W.M. Strong // *Plant and Soil*. – 1993. – Vol. 155. – P. 399–402. – DOI: 10.1007/BF00025067.

132. Liptzin, D. An evaluation of carbon indicators of soil health in long-term agricultural experiments / D. Liptzin, C.E. Norris, S.B. Cappellazzi [et al.] // *Soil Biology and Biochemistry*. – 2022. – Vol. 172. – Article 108708. – DOI: 10.1016/j.soilbio.2022.108708.

133. Łoginow, W. Fractionation of organic carbon based on susceptibility to oxidation / W. Łoginow, W. Wiśniewski, S.S. Gonet, B. Cieścińska // *Polish Journal of Soil Science*. – 1987. – Vol. 20. – No. 1. – P. 47–52. – ISSN 0079-2985.

134. Lozano-García, B. Land use change effects on soil organic carbon store. An opportunity to soils regeneration in Mediterranean areas: implications in the 4p1000 notion / B. Lozano-García [et al.] // *Ecological Indicators*. – 2020. – Vol. 119. – Article 106831.

135. McDaniel, M.D. Does agricultural crop diversity enhance soil microbial biomass and organic matter dynamics? A meta-analysis / M.D. McDaniel, L.K. Tiemann, A.S. Grandy // *Ecological Applications*. – 2014. – Vol. 24. – No. 3. – P. 560–570.

136. Moody, P.W. Soil organic carbon, permanganate fractions, and the chemical properties of acidic soils / P.W. Moody, S.A. Yo, R.L. Aitken // *Australian Journal of Soil Research*. – 1997. – Vol. 35. – No. 6. – P. 1301–1308. – DOI: 10.1071/S97050.

137. North, P.F. Towards an absolute measurement of soil structural stability using ultrasound / P.F. North // *Journal of Soil Science*. – 1976. – Vol. 27. – No. 4. – P. 451–459.

138. Oldfield, E.E. Global meta-analysis of the relationship between soil organic matter and crop yields / E.E. Oldfield, M.A. Bradford, S.A. Wood // *SOIL*. – 2019. – Vol. 5. – No. 1. – P. 15–32.

139. Oliveira, F.C.C. A regional assessment of permanganate oxidizable carbon for potential use as a soil health indicator in managed pine plantations / F.C.C. Oliveira, A.

Bacon, T.R. Fox [et al.] // *Forest Ecology and Management*. – 2022. – Vol. 521. – Article 120423. – DOI: 10.1016/j.foreco.2022.120423.

140. Pribyl, D.W. A critical review of the conventional SOC to SOM conversion factor / D.W. Pribyl // *Geoderma*. – 2010. – Vol. 156. – No. 3–4. – P. 75–83.

141. Prout, J.M. Changes in organic carbon to clay ratios in different soils and land uses in England and Wales over time / J.M. Prout [et al.] // *Scientific Reports*. – 2022. – Vol. 12. – No. 1. – Article 5162.

142. Prout, J. What is a good level of soil organic matter? An index based on organic carbon to clay ratio / J. Prout, K.D. Shepherd, S.P. McGrath [et al.] // *European Journal of Soil Science*. – 2020. – Vol. 72. – No. 3–4. – P. 1–11.

143. Rasmussen, C. Beyond clay: towards an improved set of variables for predicting soil organic matter content / C. Rasmussen, K. Heckman, W.R. Wieder [et al.] // *Biogeochemistry*. – 2018. – Vol. 137. – P. 297–306.

144. Rabot, E. Relevance of the organic carbon to clay ratio as a national soil health indicator / E. Rabot [et al.] // *Geoderma*. – 2024. – Vol. 443. – Article 116829.

145. Robertson, G.P. Greenhouse gases in intensive agriculture: contributions of individual gases to the radiative forcing of the atmosphere / G.P. Robertson, E.A. Paul, R.R. Harwood // *Science*. – 2000. – Vol. 289. – No. 5486. – P. 1922–1925.

146. Sá, J.C.M. Soil carbon fractions and biological activity-based indices can be used to study the impact of land management and ecological successions / J.C.M. Sá, D.R.P. Gonçalves, L.A. Ferreira [et al.] // *Ecological Indicators*. – 2018. – Vol. 84. – P. 96–105.

147. Schimel, D.S. Climatic, edaphic, and biotic controls over storage and turnover of carbon in soils / D.S. Schimel, B.H. Braswell, E.A. Holland [et al.] // *Global Biogeochemical Cycles*. – 1994. – Vol. 8. – No. 3. – P. 279–293.

148. Schnitzer, M. Soil organic matter / M. Schnitzer, S.U. Khan. – Amsterdam: Elsevier, 1978. – 319 p.

149. Six, J. Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils / J. Six, R.T. Conant, E.A. Paul [et al.] // *Plant and Soil*. – 2002. – Vol. 241. – P. 155–176.

150. Tang, H. Long-term effects of NPK fertilizers and organic manures on soil organic carbon and carbon management index under a double-cropping rice system in Southern China / H. Tang, X. Xiao, W. Tang [et al.] // *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. – 2018. – Vol. 49. – P. 1976–1989.

151. Tan, Z. Distribution of light and heavy fractions of soil organic carbon as related to land use and tillage practice / Z. Tan, R. Lal, L. Owens [et al.] // *Soil and Tillage Research*. – 2007. – Vol. 92. – No. 1–2. – P. 53–59. – DOI: 10.1016/j.still.2006.01.003.

152. Tripolskaja, L. Exploring the influence of natural and agricultural land use systems on the different lability organic carbon compounds in Eutric Endocalcaric Arenosol / L. Tripolskaja, K. Amaleviciute-Volunge, A. Kazlauskaite-Jadzevice [et al.] // *Sustainability*. – 2024. – Vol. 16. – Article 5403. – DOI: 10.3390/su16135403.

153. Vanek, S. Soil Health Evaluation Manual / S. Vanek, S. Fonte, B. Magonziwa. – Version 6.2. – Soils Cross Cutting Project, East/Southern Africa Community of Practice, McKnight Foundation, 2018. – 75 p. – URL: https://smallholder-sha.org/wp-content/uploads/2018/07/soiltoolkitmanual_sv6-2.pdf (дата обращения: 16.06.2026).

154. Wade, J. To standardize by mass of soil or organic carbon? A comparison of permanganate oxidizable carbon (POXC) assay methods / J. Wade, C. Li, M.M. Pulleman [et al.] // *Geoderma*. – 2021. – Vol. 404. – Article 115392.

155. Waksman, S.A. Humus: origin, chemical composition, and importance in nature / S.A. Waksman. – Baltimore: The Williams & Wilkins Company, 1938. – 526 p.

156. Wander, M.M. Fostering soil stewardship through soil quality assessment / M.M. Wander, L.E. Drinkwater // *Applied Soil Ecology*. – 2000. – Vol. 15. – No. 1. – P. 61–73.

157. Wander, M. Soil organic matter fractions and their relevance to soil function / M. Wander // *Soil Organic Matter in Sustainable Agriculture*. – Boca Raton, FL: CRC Press, 2004. – P. 67–102.

158. Weil, R.R. Estimating active carbon for soil quality assessment: a simplified method for laboratory and field use / R.R. Weil [et al.] // *American Journal of Alternative Agriculture*. – 2003. – Vol. 18. – No. 1. – P. 3–17.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Агрохимические характеристики чернозема выщелоченного на исследуемых участках

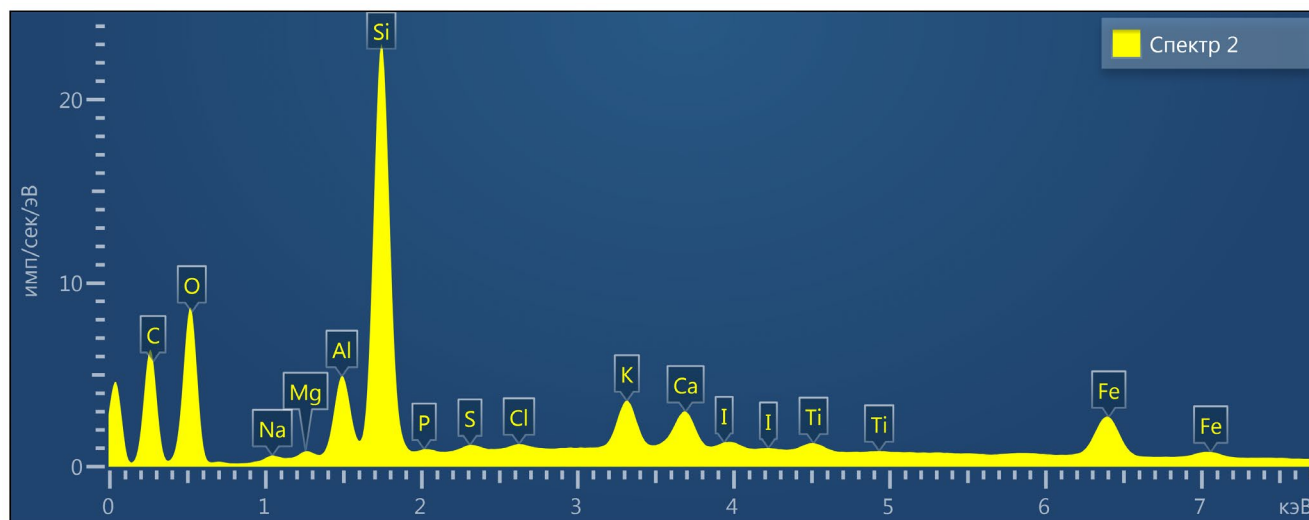
Год	Горизонт (глубина, см)	pH _{сол} ,	pH _{водн} ,	Гидролитическая кислотность, мг- экв/100 г почвы	Сумма обменных оснований, мг- экв/100 г почвы	Емкость катионного обмена, мг- экв/100 г почвы	Степень насыщенности основаниями, %	Подвижный фосфор по Чирикову, мг/кг	Обменный калий по Чирикову, мг/кг
Пашня									
2022	Апах (0-20)	5,53±0,07	6,59±0,16	6,1±0,3	33,5±1,5	39,6	85	178±23	128±30
	А (20-40)	5,56±0,08	6,62±0,03	5,9±0,6	32,7±1,0	38,6	85	103±9	92±28
2023	Апах (0-20)	5,75±0,10	6,84±0,11	5,1±0,3	34,6±1,3	39,7	87	161±23	121±31
	А (20-40)	5,71±0,10	6,82±0,08	5,3±0,6	33,4±0,8	38,7	86	97±9	107±23
2024	Апах (0-20)	6,24±0,09	7,37±0,13	2,2±0,2	40,6±0,9	42,8	95	144±21	122±29
	А (20-40)	6,33±0,08	7,37±0,05	1,3±0,7	38,6±0,7	39,9	97	99±12	79±21
Многолетние травы									
2022	Апах (0-20)	5,45±0,17	6,24±0,11	6,3±0,2	32,7±1,1	39,0	84	83±12	136±19
	А (20-40)	5,40±0,10	6,75±0,08	7,5±0,7	31,7±0,6	39,2	81	82±14	100±23
2023	Апах (0-20)	5,87±0,08	6,84±0,06	4,5±0,3	35,6±0,7	40,1	89	99±16	147±20
	А (20-40)	5,99±0,13	7,06±0,06	4,8±0,5	33,5±0,8	38,3	87	78±20	81±23
2024	Апах (0-20)	6,44±0,07	7,07±0,05	1,9±0,3	38,5±0,6	40,4	95	154±14	133±23
	А (20-40)	6,39±0,05	7,23±0,09	1,7±0,2	35,5±0,9	37,2	95	92±14	101±10
Распаханная залежь									
2022	Апах (0-20)	5,79±0,08	6,94±0,13	5,9±0,3	35,3±0,9	41,2	86	63±12	114±16
	А (20-40)	6,11±0,11	6,71±0,07	5,6±0,4	33,0±0,7	38,6	85	59±8	93±15
2023	Апах (0-20)	5,84±0,15	6,96±0,09	4,4±0,3	36,8±1,2	41,2	89	110±16	106±18
	А (20-40)	6,30±0,16	6,75±0,10	4,8±0,2	33,7±0,6	38,5	88	61±8	93±19
2024	Апах (0-20)	6,03±0,19	7,12±0,13	2,4±0,2	41,3±1,2	43,7	95	111±18	117±16
	А (20-40)	6,40±0,19	7,17±0,08	3,2±0,2	35,2±0,6	38,4	92	59±12	87±17
Целина									
2022	А (5-20)	5,81±0,12	6,70±0,11	4,5±0,4	33,6±0,8	38,1	88	69±15	90±17
	А (20-40)	6,24±0,13	6,89±0,09	3,4±0,3	33,3±0,9	36,7	91	85±9	85±19
2023	А (5-20)	5,91±0,15	6,76±0,12	1,4±0,6	34,7±0,9	36,1	96	74±19	99±18
	А (20-40)	6,24±0,19	7,04±0,07	3,0±0,4	34,6±0,9	37,6	92	79±9	65±10
2024	А (5-20)	6,53±0,18	7,76±0,13	0,2±0,2	48,4±1,7	48,6	100	81±21	97±20
	А (20-40)	6,86±0,06	8,15±0,19	0,3±0,3	49,3±1,1	49,6	99	86±13	73±11

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

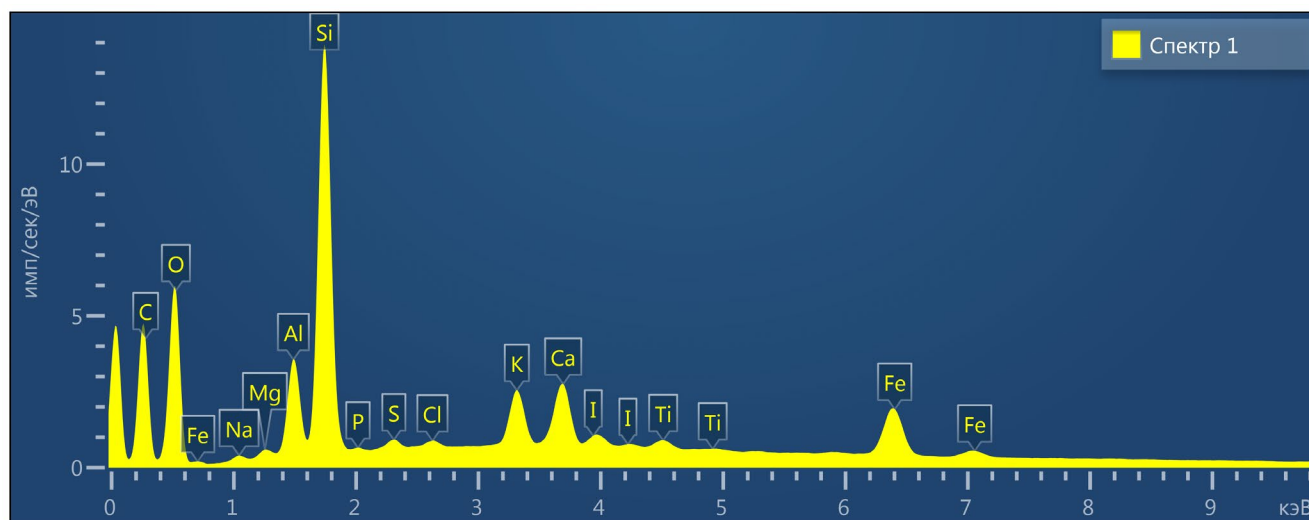
Элементный состав лабильного органического вещества (ЛОВ)

Участок пашни (Апах 0-20 см)

2022 год



2023 год

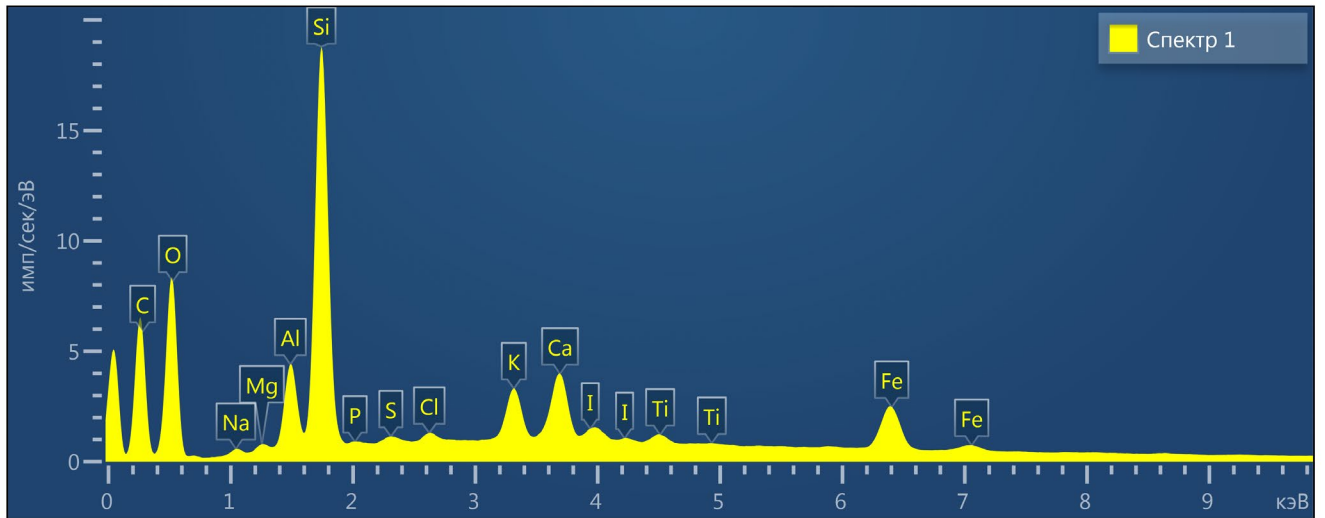


2024 год

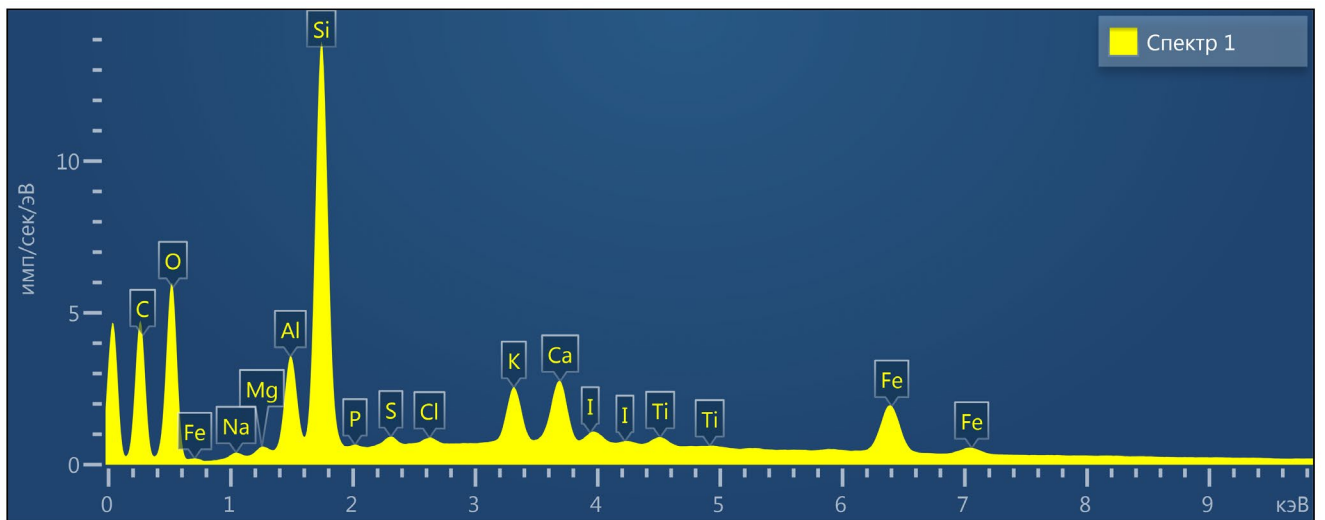
Нет изображения

Участок пашни (А 20-40 см)

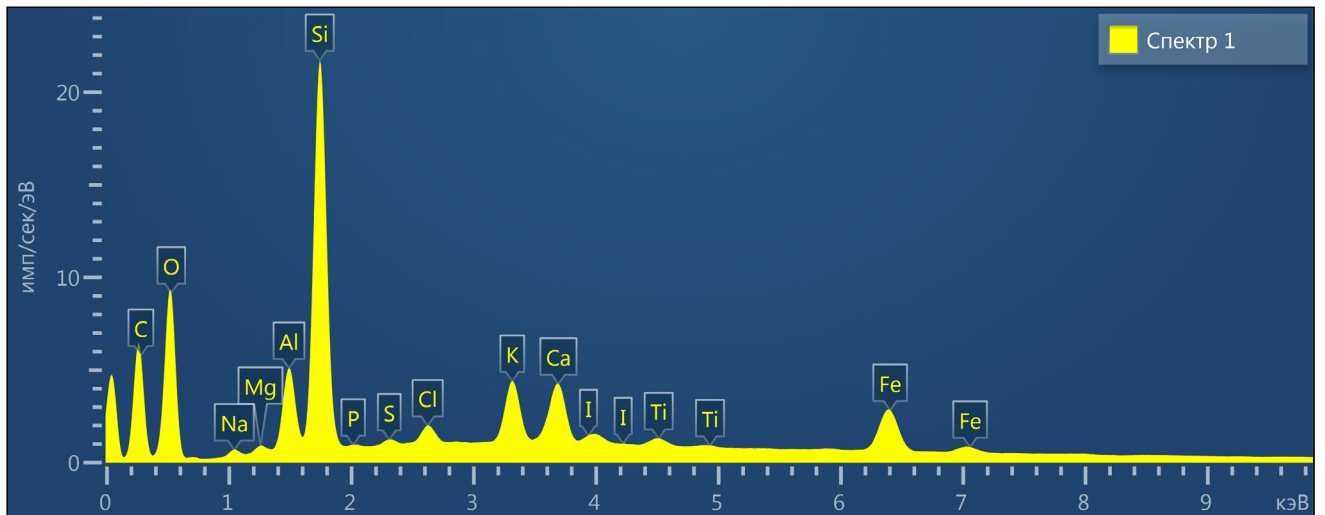
2022 год



2023 год

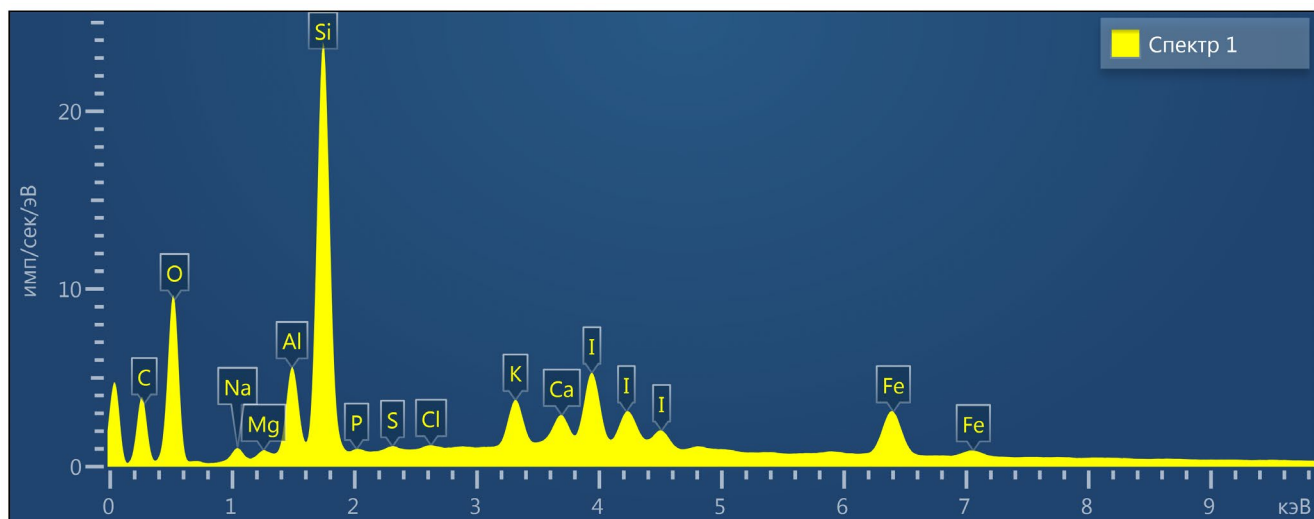


2024 год

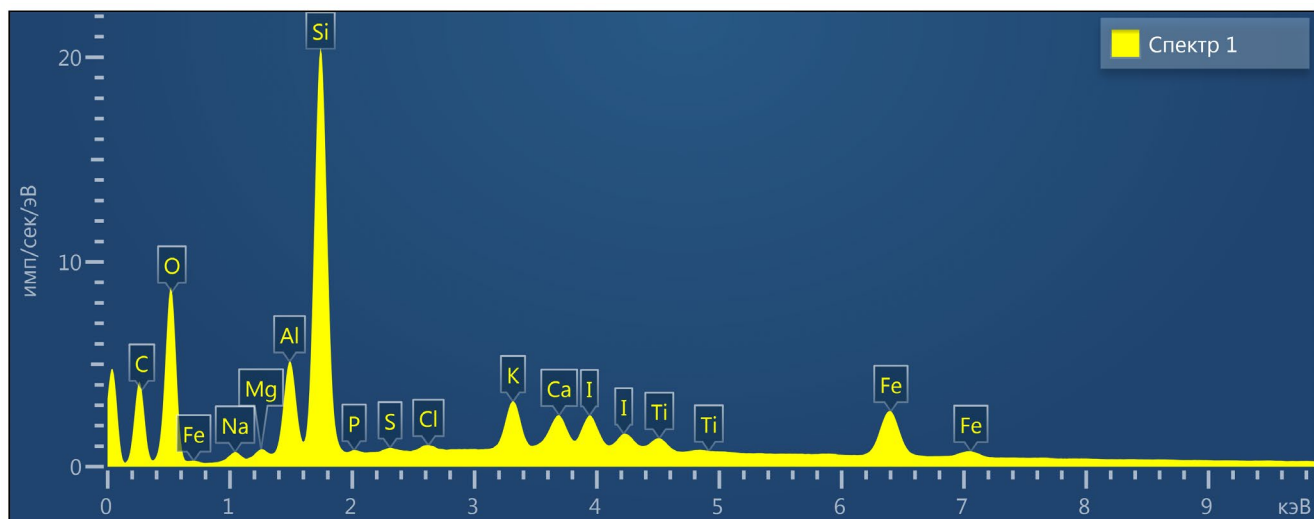


Участок с многолетними травами (Апах 0-20 см)

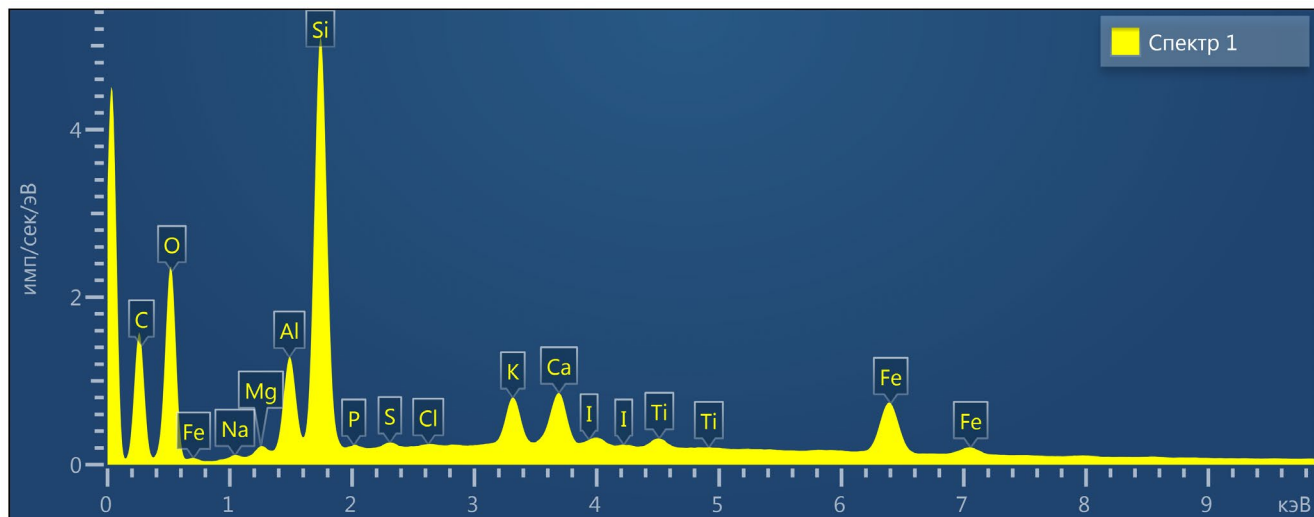
2022 год



2023 год

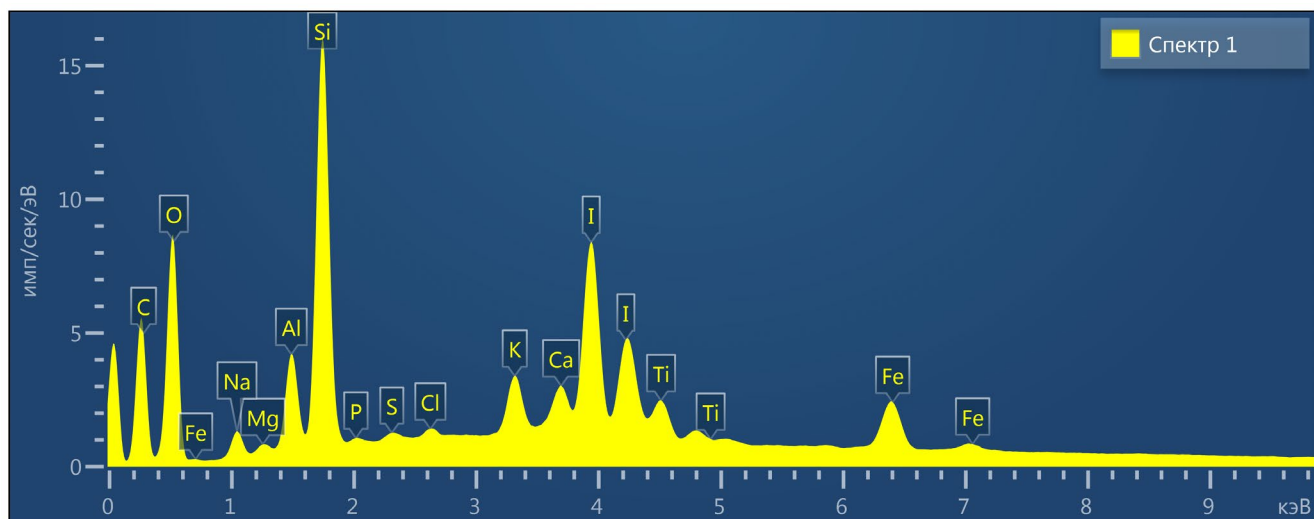


2024 год

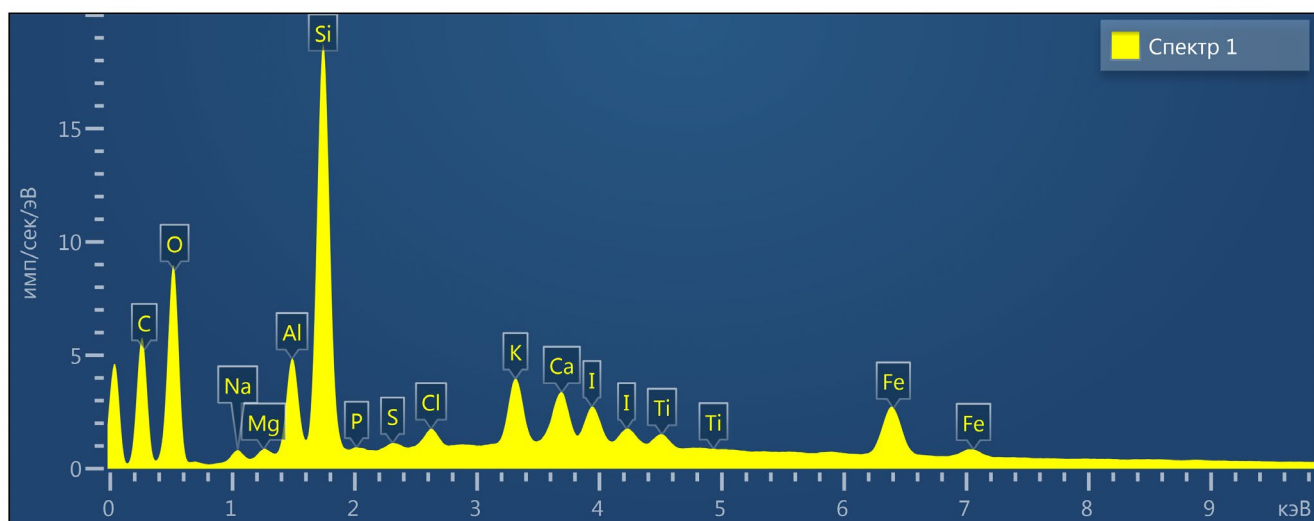


Участок с многолетними травами (А 20-40 см)

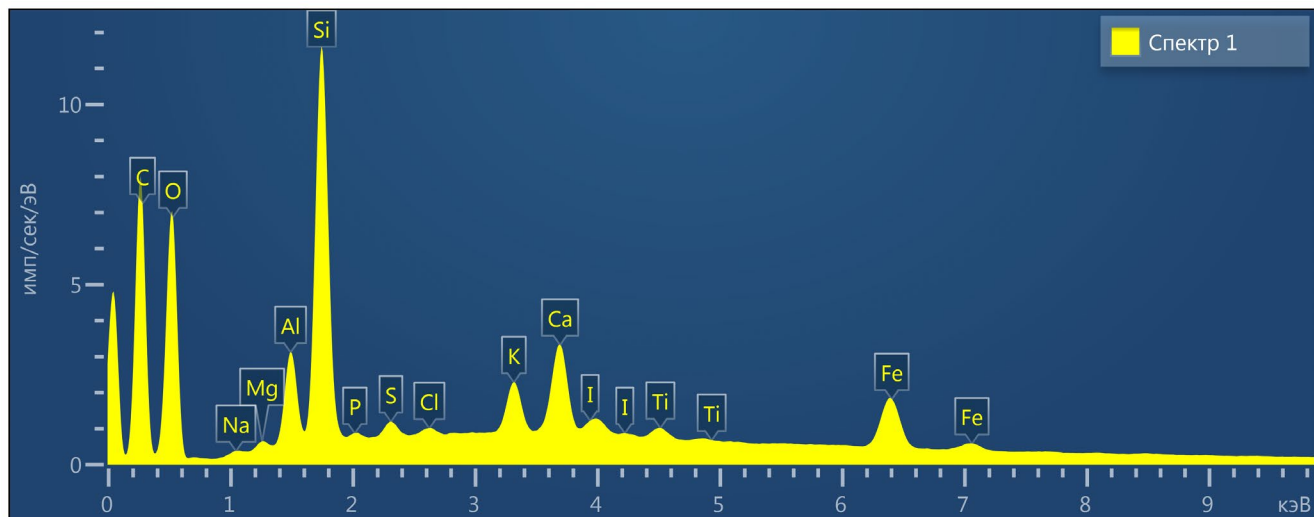
2022 год



2023 год

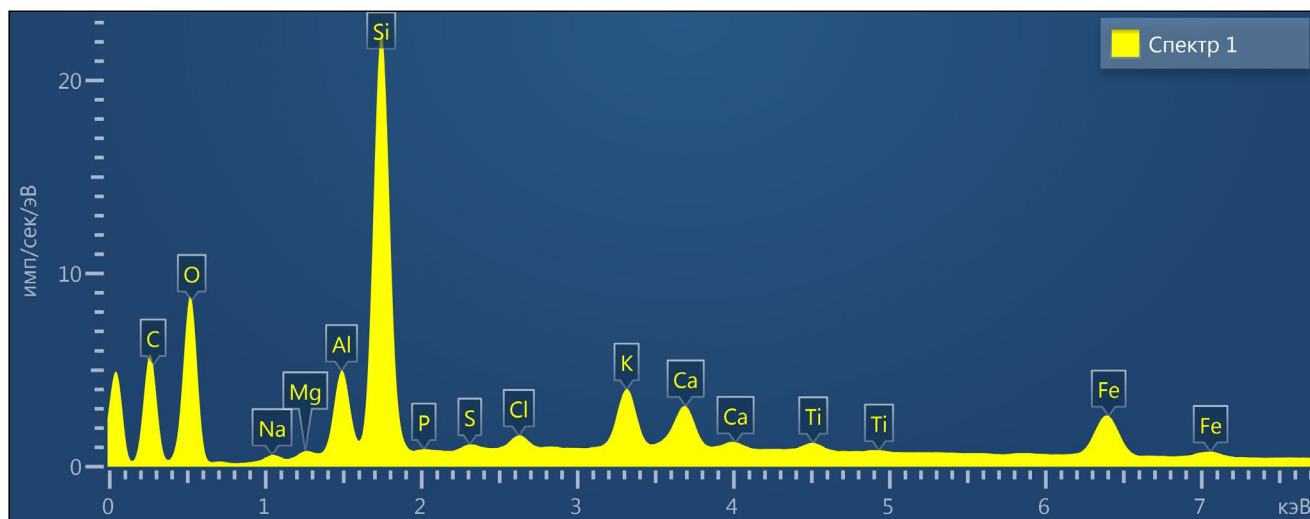


2024 год

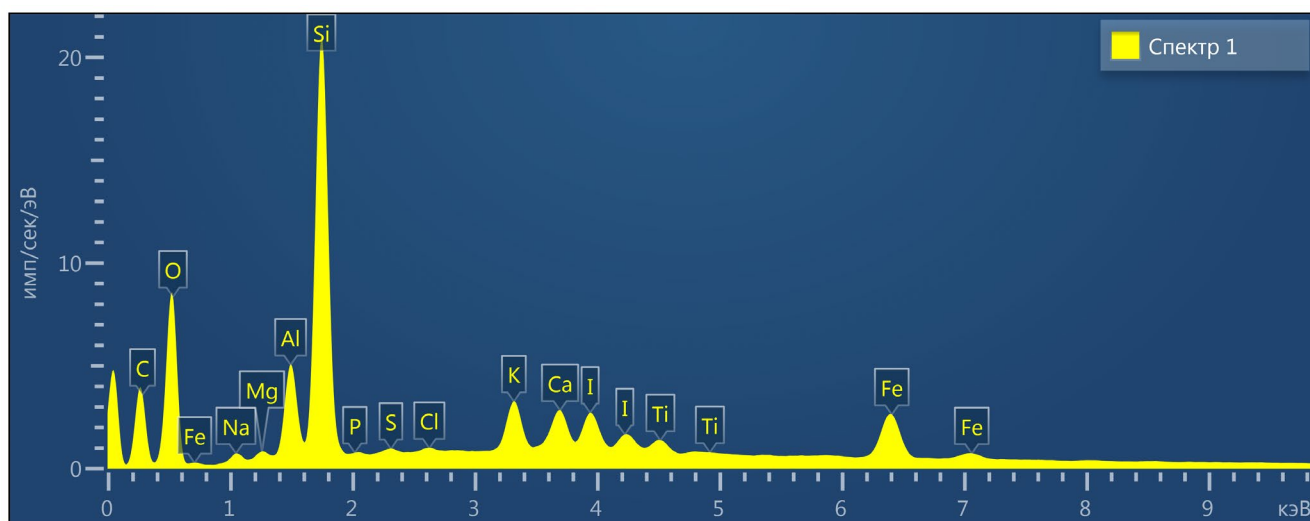


Участок распаханной залежи (Апах 0-20 см)

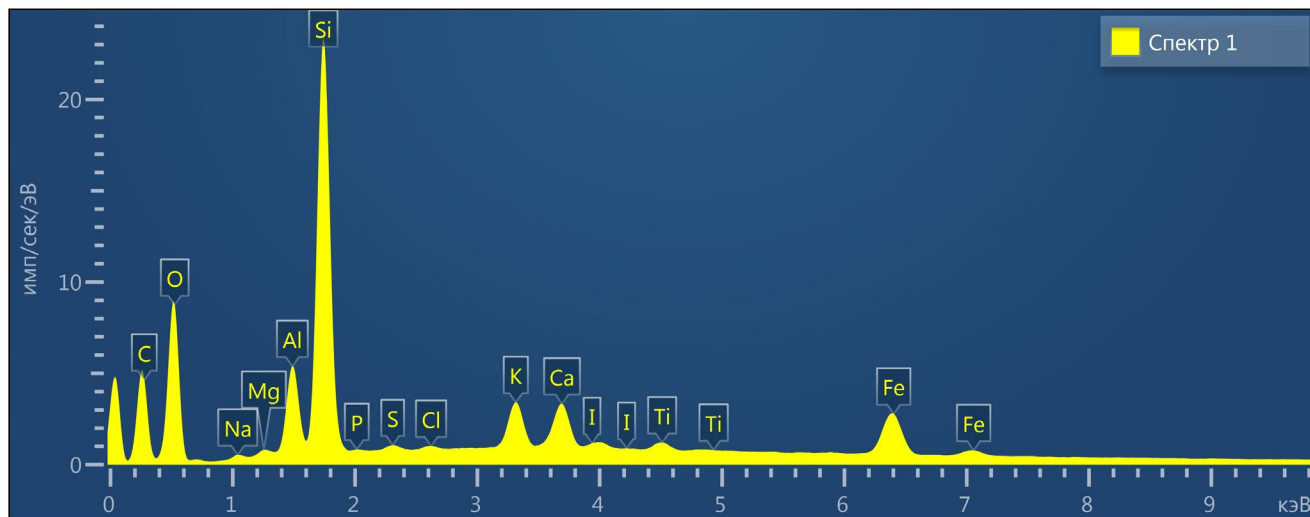
2022 год



2023 год

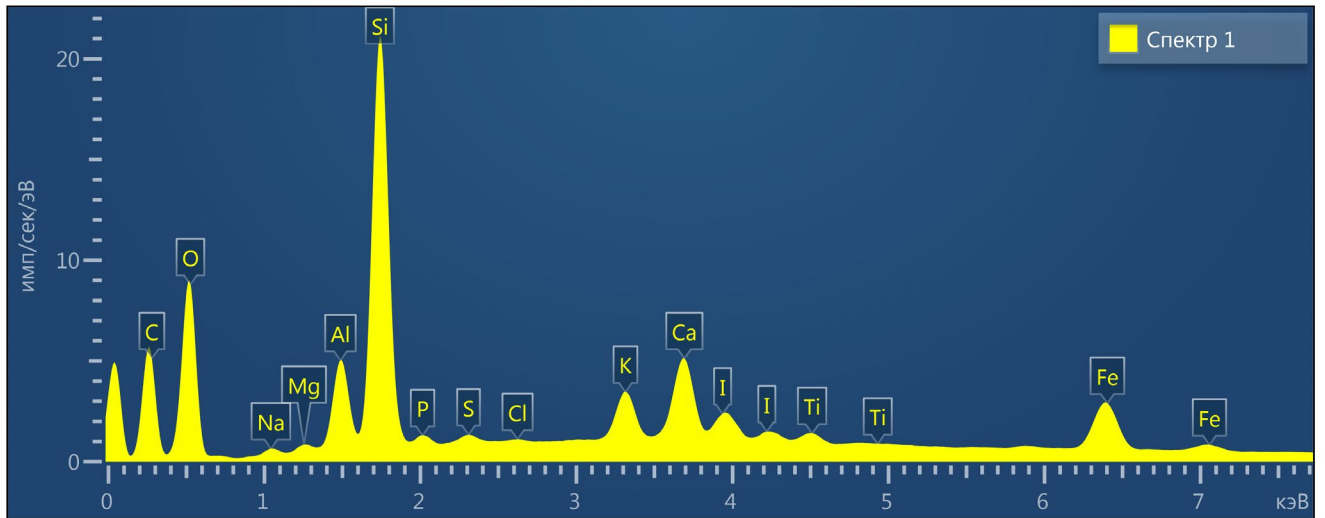


2024 год

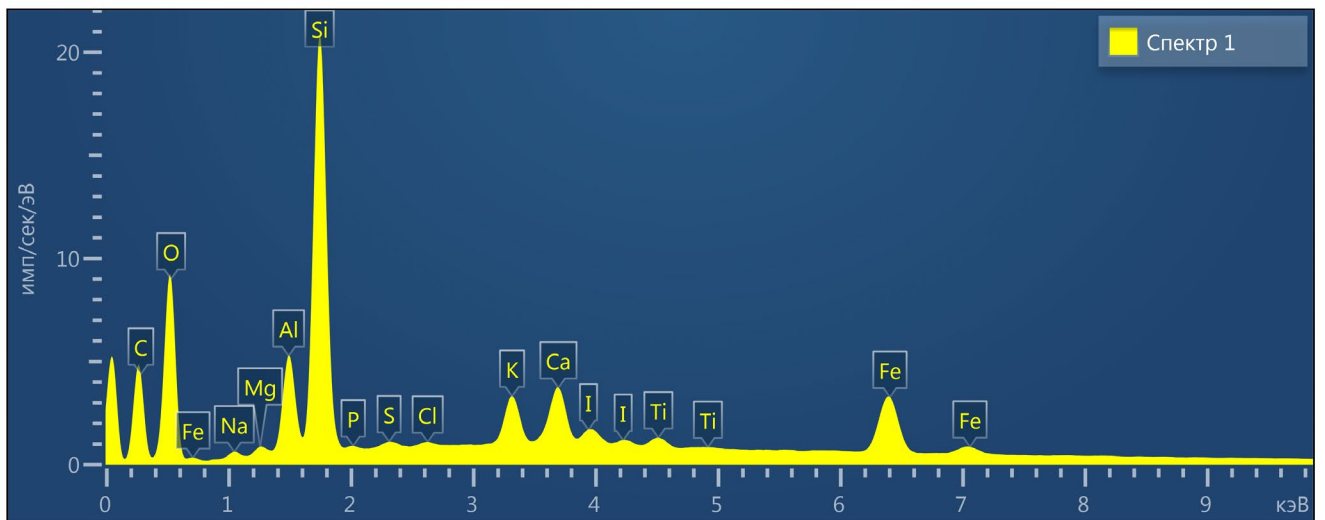


Участок распаханной залежи (А 20-40 см)

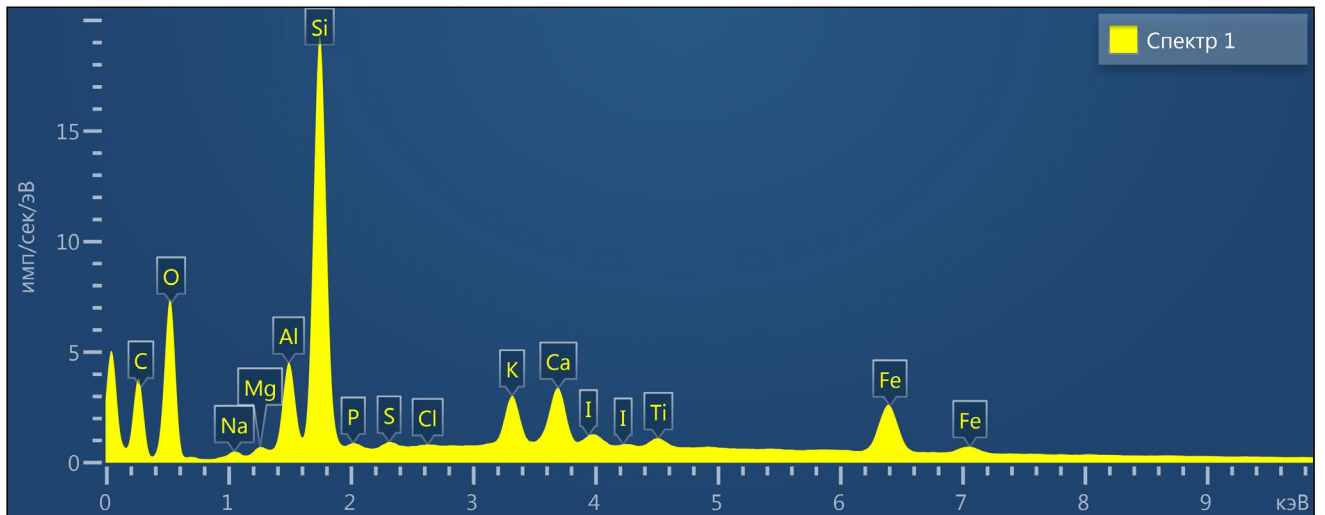
2022 год



2023 год

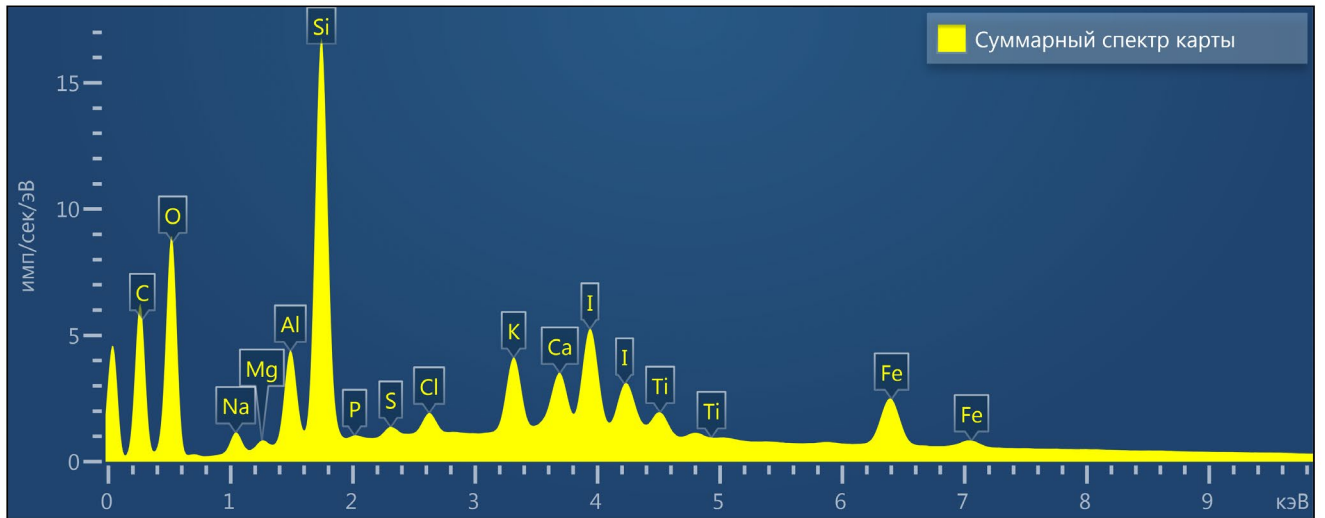


2024 год

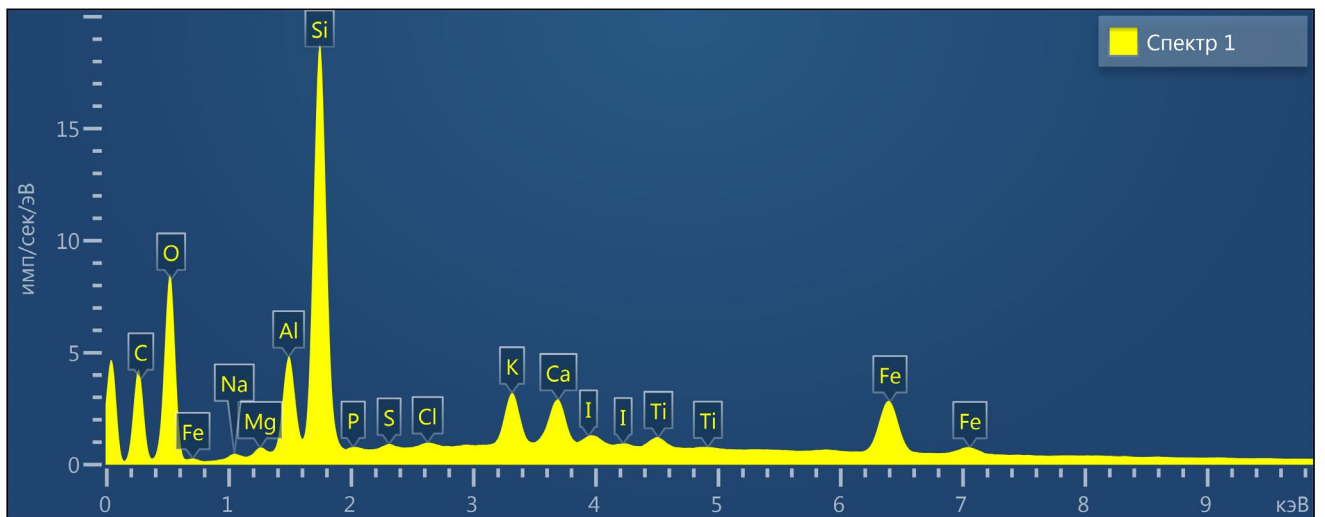


Участок целины (А 5-20 см)

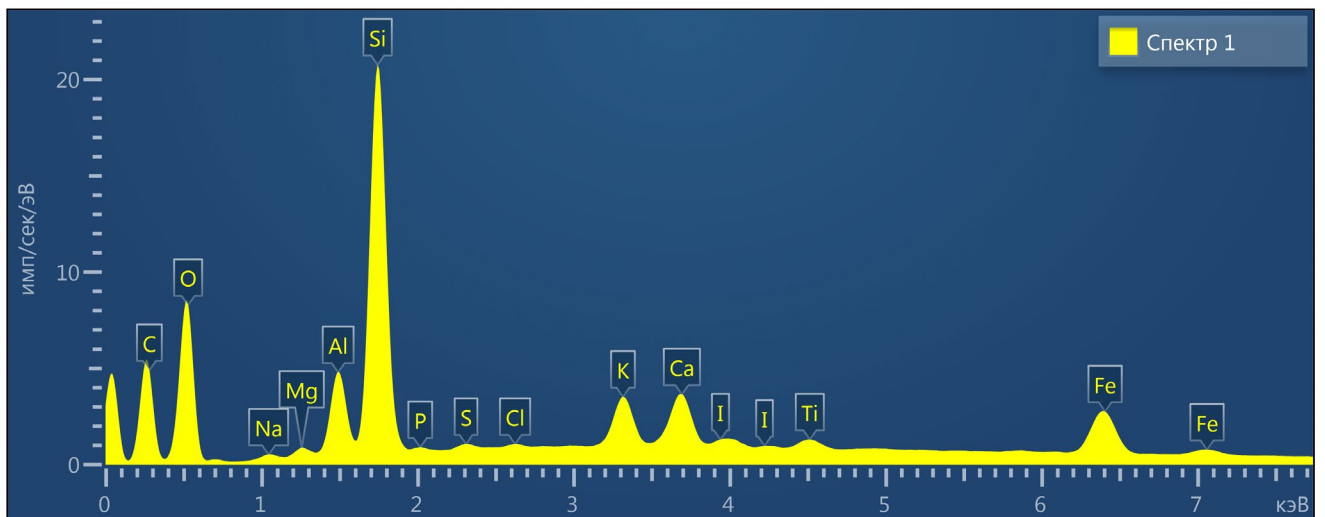
2022 год



2023 год

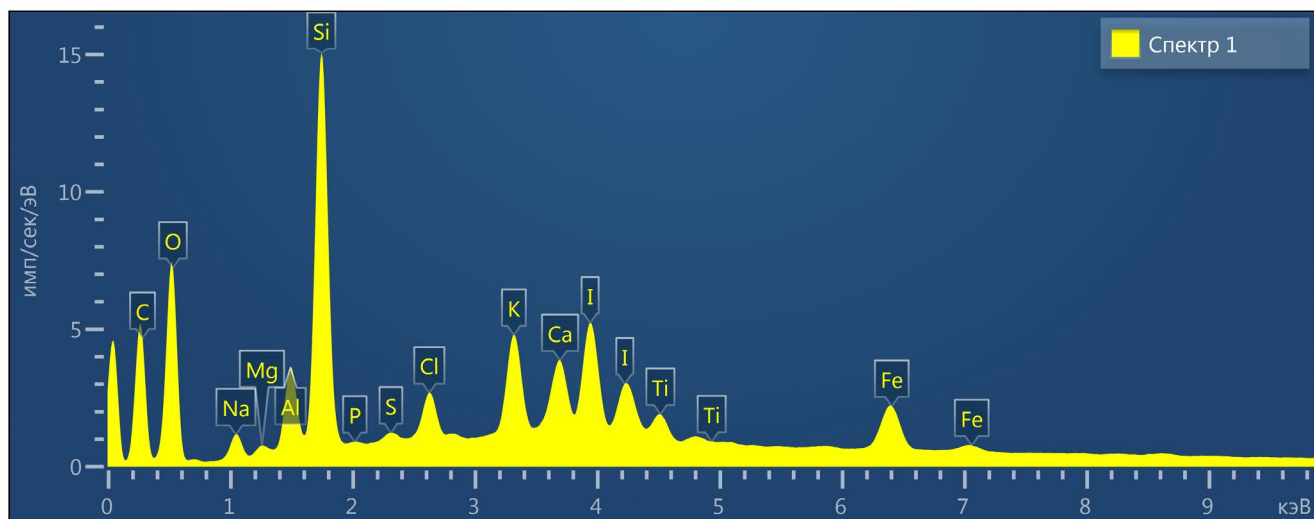


2024 год

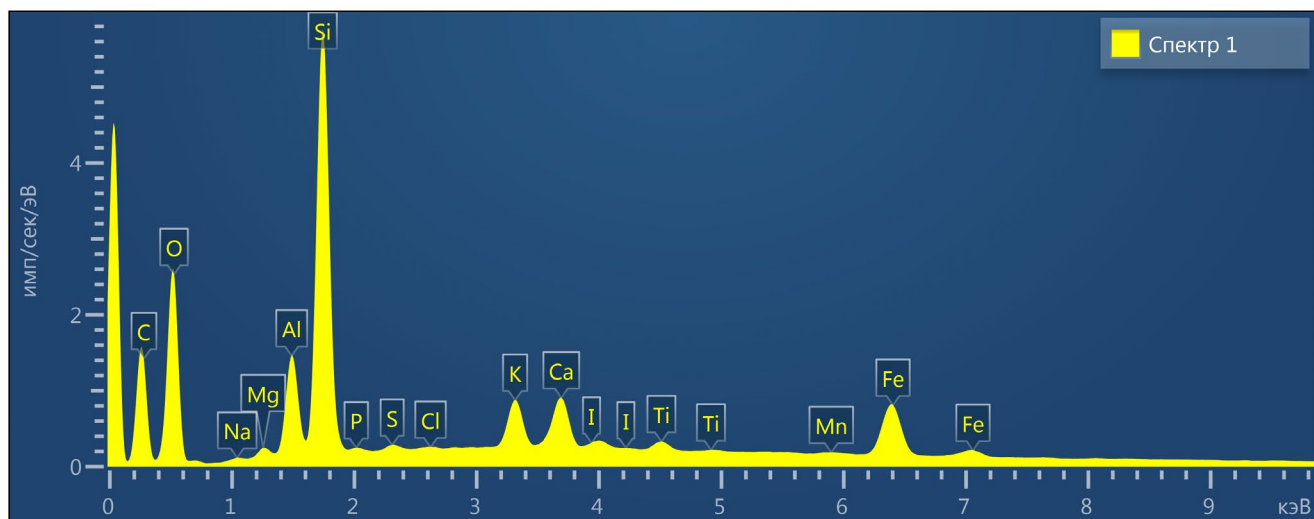


Участок целины (А 20-40 см)

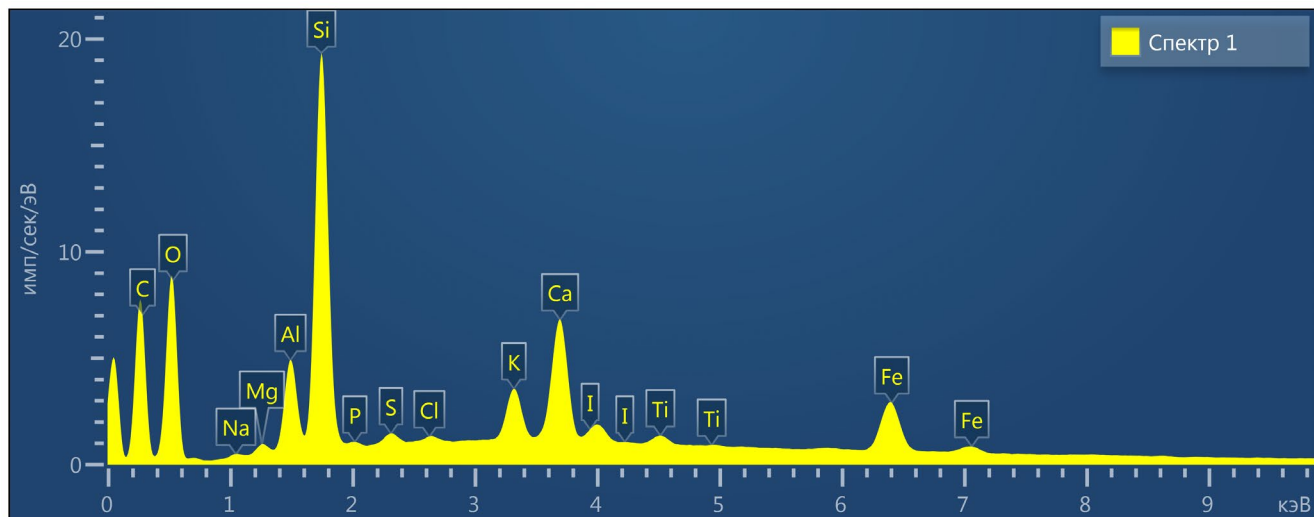
2022 год



2023 год



2024 год



ПРИЛОЖЕНИЕ В

Оценка различия между выборками с использованием критерия НСР(LSD)

Средние значения и параметры рядов для содержания гумуса (%) в верхней части гумусового горизонта (Апах 0–20 см, для целины А 5–20 см) по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

Названия групп (выборок)	Средние значения	Количество повторностей	Стандартные ошибки средних	Доверительные интервалы	Стандартные отклонения
Пашня 2022 г.	6,00	9	0,06	0,12	0,18
Пашня 2023 г.	6,07	9	0,08	0,17	0,25
Пашня 2024 г.	6,10	9	0,09	0,19	0,28
Мн. травы 2022 г.	7,12	9	0,09	0,18	0,27
Мн. травы 2023 г.	6,99	9	0,16	0,33	0,48
Мн. травы 2024 г.	6,03	9	0,14	0,29	0,43
Распаханная залежь (1 год)	7,42	9	0,06	0,13	0,19
Распаханная залежь (2 год)	7,11	9	0,05	0,11	0,16
Распаханная залежь (3 год)	6,99	9	0,11	0,22	0,33
Целина 2022 г.	6,68	9	0,10	0,20	0,30
Целина 2023 г.	6,64	9	0,09	0,19	0,28
Целина 2024 г.	6,69	9	0,09	0,18	0,26

Оценка значимости различий между выборками с использованием критерия НСР(LSD)₀₅ содержания гумуса (%) в верхней части гумусового горизонта (Апах 0–20 см, для целины А 5–20 см) по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

Переменная 1	Переменная 2	Разница средних	НСР(LSD) ₀₅
Пашня 2022 г.	Пашня 2023 г.	0,07	0,22
Пашня 2022 г.	Пашня 2024 г.	0,10	0,24
Пашня 2023 г.	Мн. травы 2024 г.	0,04	0,36
Мн. травы 2022 г.	Мн. травы 2023 г.	0,13	0,39
Мн. травы 2022 г.	Мн. травы 2024 г.	1,08	0,36
Мн. травы 2023 г.	Мн. травы 2024 г.	0,96	0,46
Распаханная залежь (1 год)	Распаханная залежь (2 год)	0,31	0,18
Распаханная залежь (1 год)	Распаханная залежь (3 год)	0,44	0,27
Распаханная залежь (2 год)	Распаханная залежь (3 год)	0,12	0,26
Целина 2022 г.	Целина 2023 г.	0,04	0,30
Целина 2022 г.	Целина 2024 г.	0,01	0,29
Целина 2023 г.	Целина 2024 г.	0,05	0,28

Зелёным цветом обозначены варианты, разница между которыми является существенной по критерию НСР(LSD)₀₅

Красным цветом обозначены варианты, разница между которыми не существенна по критерию НСР(LSD)₀₅

Средние значения и параметры рядов для содержания гумуса (%) в нижней части гумусового горизонта (А 20–40 см) по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

Названия групп (выборки)	Средние значения	Количество повторностей	Стандартные ошибки средних	Доверительные интервалы	Стандартные отклонения
Пашня 2022 г.	5,95	9	0,17	0,33	0,50
Пашня 2023 г.	5,83	9	0,15	0,30	0,45
Пашня 2024 г.	5,28	9	0,18	0,36	0,53
Мн. травы 2022 г.	6,01	9	0,10	0,20	0,30
Мн. травы 2023 г.	6,06	9	0,15	0,30	0,45
Мн. травы 2024 г.	4,77	9	0,17	0,33	0,50
Распаханная залежь (1 год)	5,69	9	0,10	0,20	0,30
Распаханная залежь (2 год)	5,30	9	0,16	0,32	0,47
Распаханная залежь (3 год)	5,58	9	0,13	0,26	0,39
Целина 2022 г.	5,57	9	0,10	0,19	0,29
Целина 2023 г.	5,50	9	0,10	0,19	0,29
Целина 2024 г.	5,29	9	0,17	0,35	0,52

Оценка значимости различий между выборками с использованием критерия НСР(LSD)₀₅ содержания гумуса (%) в нижней части гумусового горизонта (А 20–40 см) по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

Переменная 1	Переменная 2	Разница средних	НСР(LSD) ₀₅
Пашня 2022 г.	Пашня 2023 г.	0,12	0,48
Пашня 2022 г.	Пашня 2024 г.	0,67	0,52
Пашня 2023 г.	Пашня 2024 г.	0,55	0,50
Мн. травы 2022 г.	Мн. травы 2023 г.	0,04	0,38
Мн. травы 2022 г.	Мн. травы 2024 г.	1,24	0,41
Мн. травы 2023 г.	Мн. травы 2024 г.	1,28	0,48
Распаханная залежь (1 год)	Распаханная залежь (2 год)	0,38	0,40
Распаханная залежь (1 год)	Распаханная залежь (3 год)	0,10	0,35
Распаханная залежь (2 год)	Распаханная залежь (3 год)	0,28	0,44
Целина 2022 г.	Целина 2023 г.	0,06	0,29
Целина 2022 г.	Целина 2024 г.	0,28	0,42
Целина 2023 г.	Целина 2024 г.	0,22	0,42

Зелёным цветом обозначены варианты, разница между которыми является существенной по критерию НСР(LSD)₀₅

Красным цветом обозначены варианты, разница между которыми не существенна по критерию НСР(LSD)₀₅

Средние значения и параметры рядов для содержания ЛОВ (%) в верхней части гумусового горизонта (Апах 0–20 см, для целины А 5–20 см) по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

Названия групп (выборок)	Средние значения	Количество повторностей	Стандартные ошибки средних	Доверительные интервалы	Стандартные отклонения
Пашня 2022 г.	0,38	9	0,03	0,06	0,08
Пашня 2023 г.	0,36	9	0,03	0,06	0,08
Пашня 2024 г.	0,36	9	0,04	0,07	0,11
Мн. травы 2022 г.	1,07	9	0,19	0,39	0,58
Мн. травы 2023 г.	1,04	9	0,11	0,23	0,34
Мн. травы 2024 г.	0,46	9	0,03	0,06	0,08
Распаханная залежь (1 год)	0,69	9	0,11	0,22	0,33
Распаханная залежь (2 год)	0,62	9	0,09	0,18	0,27
Распаханная залежь (3 год)	0,39	9	0,04	0,08	0,12
Целина 2022 г.	0,69	9	0,06	0,12	0,18
Целина 2023 г.	0,70	9	0,12	0,25	0,37
Целина 2024 г.	0,73	9	0,12	0,25	0,37

Оценка значимости различий между выборками с использованием критерия НСР(LSD)₀₅ содержания ЛОВ (%) в верхней части гумусового горизонта (Апах 0–20 см, для целины А 5–20 см) по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

Переменная 1	Переменная 2	Разница средних	НСР(LSD) ₀₅
Пашня 2022 г.	Пашня 2023 г.	0,02	0,08
Пашня 2022 г.	Пашня 2024 г.	0,02	0,10
Пашня 2023 г.	Пашня 2024 г.	0,00	0,10
Мн. травы 2022 г.	Мн. травы 2023 г.	0,02	0,48
Мн. травы 2022 г.	Мн. травы 2024 г.	0,60	0,42
Мн. травы 2023 г.	Мн. травы 2024 г.	0,58	0,25
Распаханная залежь (1 год)	Распаханная залежь (2 год)	0,07	0,30
Распаханная залежь (1 год)	Распаханная залежь (3 год)	0,30	0,25
Распаханная залежь (2 год)	Распаханная залежь (3 год)	0,23	0,21
Целина 2022 г.	Целина 2023 г.	0,01	0,30
Целина 2022 г.	Целина 2024 г.	0,04	0,29
Целина 2023 г.	Целина 2024 г.	0,03	0,37

Зелёным цветом обозначены варианты, разница между которыми является существенной по критерию НСР(LSD)₀₅

Красным цветом обозначены варианты, разница между которыми не существенна по критерию НСР(LSD)₀₅

Средние значения и параметры рядов для содержания ЛОВ (%) в нижней части гумусового горизонта (А 20–40 см) по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

Названия групп (выборки)	Средние значения	Количество повторностей	Стандартные ошибки средних	Доверительные интервалы	Стандартные отклонения
Пашня 2022 г.	0,27	9	0,02	0,05	0,07
Пашня 2023 г.	0,26	9	0,05	0,10	0,14
Пашня 2024 г.	0,24	9	0,05	0,09	0,14
Мн. травы 2022 г.	0,41	9	0,04	0,09	0,13
Мн. травы 2023 г.	0,36	9	0,04	0,08	0,12
Мн. травы 2024 г.	0,36	9	0,05	0,10	0,15
Распаханная залежь (1 год)	0,30	9	0,03	0,06	0,08
Распаханная залежь (2 год)	0,24	9	0,01	0,03	0,04
Распаханная залежь (3 год)	0,25	9	0,03	0,06	0,09
Целина 2022 г.	0,32	9	0,02	0,05	0,07
Целина 2023 г.	0,32	9	0,04	0,08	0,12
Целина 2024 г.	0,32	9	0,02	0,04	0,06

Оценка значимости различий между выборками с использованием критерия НСР(LSD)₀₅ содержания ЛОВ (%) в нижней части гумусового горизонта (А 20–40 см) по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

Переменная 1	Переменная 2	Разница средних	НСР(LSD) ₀₅
Пашня 2022 г.	Пашня 2023 г.	0,00	0,12
Пашня 2022 г.	Пашня 2024 г.	0,03	0,11
Пашня 2023 г.	Пашня 2024 г.	0,02	0,14
Мн. травы 2022 г.	Мн. травы 2023 г.	0,05	0,12
Мн. травы 2022 г.	Мн. травы 2024 г.	0,05	0,14
Мн. травы 2023 г.	Мн. травы 2024 г.	0,01	0,14
Распаханная залежь (1 год)	Распаханная залежь (2 год)	0,06	0,07
Распаханная залежь (1 год)	Распаханная залежь (3 год)	0,05	0,09
Распаханная залежь (2 год)	Распаханная залежь (3 год)	0,00	0,07
Целина 2022 г.	Целина 2023 г.	0,01	0,10
Целина 2022 г.	Целина 2024 г.	0,00	0,07
Целина 2023 г.	Целина 2024 г.	0,00	0,10

Зелёным цветом обозначены варианты, разница между которыми является существенной по критерию НСР(LSD)₀₅

Красным цветом обозначены варианты, разница между которыми не существенна по критерию НСР(LSD)₀₅

Средние значения и параметры рядов для содержания РОХС (мг/кг) в верхней части гумусового горизонта (Апах 0–20 см, для целины А 5–20 см) по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

Названия групп (выборки)	Средние значения	Количество повторностей	Стандартные ошибки средних	Доверительные интервалы	Стандартные отклонения
Пашня 2022 г.	954	9	68	137	204
Пашня 2023 г.	1032	9	54	110	163
Пашня 2024 г.	1055	9	73	148	220
Мн. травы 2022 г.	1019	9	55	111	164
Мн. травы 2023 г.	1028	9	77	155	230
Мн. травы 2024 г.	1046	9	70	141	209
Распаханная залежь (1 год)	1042	9	60	121	180
Распаханная залежь (2 год)	984	9	58	118	175
Распаханная залежь (3 год)	1110	9	57	115	171
Целина 2022 г.	1120	9	63	127	189
Целина 2023 г.	1008	9	66	133	198
Целина 2024 г.	1027	9	47	94	140

Оценка значимости различий между выборками с использованием критерия НСР(LSD)₀₅ содержания РОХС (мг/кг) в верхней части гумусового горизонта (Апах 0–20 см, для целины А 5–20 см) по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

Переменная 1	Переменная 2	Разница средних	НСР(LSD) ₀₅
Пашня 2022 г.	Пашня 2023 г.	77	186
Пашня 2022 г.	Пашня 2024 г.	100	214
Пашня 2023 г.	Пашня 2024 г.	23	195
Мн. травы 2022 г.	Мн. травы 2023 г.	10	202
Мн. травы 2022 г.	Мн. травы 2024 г.	28	189
Мн. травы 2023 г.	Мн. травы 2024 г.	18	221
Распаханная залежь (1 год)	Распаханная залежь (2 год)	58	179
Распаханная залежь (1 год)	Распаханная залежь (3 год)	67	177
Распаханная залежь (2 год)	Распаханная залежь (3 год)	126	175
Целина 2022 г.	Целина 2023 г.	112	195
Целина 2022 г.	Целина 2024 г.	93	167
Целина 2023 г.	Целина 2024 г.	20	173

Зелёным цветом обозначены варианты, разница между которыми является существенной по критерию НСР(LSD)₀₅

Красным цветом обозначены варианты, разница между которыми не существенна по критерию НСР(LSD)₀₅

Средние значения и параметры рядов для содержания РОХС (мг/кг) в нижней части гумусового горизонта (А 20–40 см) по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

Названия групп (выборки)	Средние значения	Количество повторностей	Стандартные ошибки средних	Доверительные интервалы	Стандартные отклонения
Пашня 2022 г.	833	9	27	55	81
Пашня 2023 г.	726	9	15	30	45
Пашня 2024 г.	715	9	17	34	51
Мн. травы 2022 г.	813	9	41	83	123
Мн. травы 2023 г.	852	9	23	46	69
Мн. травы 2024 г.	760	9	43	86	128
Распаханная залежь (1 год)	849	9	34	69	103
Распаханная залежь (2 год)	821	9	37	74	110
Распаханная залежь (3 год)	791	9	32	64	95
Целина 2022 г.	766	9	28	57	85
Целина 2023 г.	761	9	32	64	95
Целина 2024 г.	773	9	36	72	107

Оценка значимости различий между выборками с использованием критерия НСР(LSD)₀₅ содержания РОХС (мг/кг) в нижней части гумусового горизонта (А 20–40 см) по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

Переменная 1	Переменная 2	Разница средних	НСР(LSD) ₀₅
Пашня 2022 г.	Пашня 2023 г.	107	66
Пашня 2022 г.	Пашня 2024 г.	118	68
Пашня 2023 г.	Пашня 2024 г.	11	48
Мн. травы 2022 г.	Мн. травы 2023 г.	38	100
Мн. травы 2022 г.	Мн. травы 2024 г.	53	127
Мн. травы 2023 г.	Мн. травы 2024 г.	92	104
Распаханная залежь (1 год)	Распаханная залежь (2 год)	28	107
Распаханная залежь (1 год)	Распаханная залежь (3 год)	58	100
Распаханная залежь (2 год)	Распаханная залежь (3 год)	29	103
Целина 2022 г.	Целина 2023 г.	6	91
Целина 2022 г.	Целина 2024 г.	6	97
Целина 2023 г.	Целина 2024 г.	12	102

Зелёным цветом обозначены варианты, разница между которыми является существенной по критерию НСР(LSD)₀₅

Красным цветом обозначены варианты, разница между которыми не существенна по критерию НСР(LSD)₀₅

Средние значения и параметры рядов для обменной кислотности ($pH_{\text{сол.}}$) чернозема выщелоченного в верхней части гумусового горизонта (Апах 0–20 см, для целины А 5–20 см) по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

Названия групп (выборок)	Средние значения	Количество повторностей	Стандартные ошибки средних	Доверительные интервалы	Стандартные отклонения
Пашня 2022 г.	5,53	4	0,03	0,07	0,07
Пашня 2023 г.	5,75	3	0,05	0,11	0,10
Пашня 2024 г.	6,24	3	0,05	0,11	0,09
Мн. травы 2022 г.	5,45	3	0,10	0,20	0,17
Мн. травы 2023 г.	5,87	3	0,05	0,10	0,08
Мн. травы 2024 г.	6,44	3	0,04	0,08	0,07
Распаханная залежь (1 год)	5,79	3	0,05	0,09	0,08
Распаханная залежь (2 год)	5,84	3	0,09	0,18	0,15
Распаханная залежь (3 год)	6,03	5	0,09	0,18	0,19
Целина 2022 г.	5,80	4	0,06	0,12	0,12
Целина 2023 г.	5,90	4	0,07	0,15	0,15
Целина 2024 г.	6,53	7	0,07	0,14	0,18

Оценка значимости различий между выборками с использованием критерия $HCP(LSD)_{05}$ обменной кислотности ($pH_{\text{сол.}}$) чернозема выщелоченного в верхней части гумусового горизонта (Апах 0–20 см, для целины А 5–20 см) по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

Переменная 1	Переменная 2	Разница средних	$HCP(LSD)_{05}$
Пашня 2022 г.	Пашня 2023 г.	0,22	0,17
Пашня 2022 г.	Пашня 2024 г.	0,71	0,16
Пашня 2023 г.	Пашня 2024 г.	0,49	0,21
Мн. травы 2022 г.	Мн. травы 2023 г.	0,42	0,30
Мн. травы 2022 г.	Мн. травы 2024 г.	0,99	0,29
Мн. травы 2023 г.	Мн. травы 2024 г.	0,57	0,17
Распаханная залежь (1 год)	Распаханная залежь (2 год)	0,05	0,27
Распаханная залежь (1 год)	Распаханная залежь (3 год)	0,24	0,24
Распаханная залежь (2 год)	Распаханная залежь (3 год)	0,19	0,30
Целина 2022 г.	Целина 2023 г.	0,10	0,23
Целина 2022 г.	Целина 2024 г.	0,73	0,20
Целина 2023 г.	Целина 2024 г.	0,63	0,23

Зелёным цветом обозначены варианты, разница между которыми является существенной по критерию $HCP(LSD)_{05}$

Красным цветом обозначены варианты, разница между которыми не существенна по критерию $HCP(LSD)_{05}$

Средние значения и параметры рядов для обменной кислотности ($pH_{\text{сол.}}$) чернозема выщелоченного в нижней части гумусового горизонта (А 20–40 см) по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

Названия групп (выборок)	Средние значения	Количество повторностей	Стандартные ошибки средних	Доверительные интервалы	Стандартные отклонения
Пашня 2022 г.	5,56	7	0,03	0,06	0,08
Пашня 2023 г.	5,71	6	0,04	0,08	0,10
Пашня 2024 г.	6,33	5	0,03	0,07	0,08
Мн. травы 2022 г.	5,40	7	0,04	0,08	0,10
Мн. травы 2023 г.	5,99	5	0,06	0,11	0,13
Мн. травы 2024 г.	6,39	7	0,02	0,04	0,05
Распаханная залежь (1 год)	6,11	6	0,04	0,09	0,11
Распаханная залежь (2 год)	6,30	7	0,06	0,12	0,16
Распаханная залежь (3 год)	6,40	5	0,08	0,17	0,19
Целина 2022 г.	6,24	7	0,05	0,10	0,13
Целина 2023 г.	6,24	6	0,08	0,16	0,19
Целина 2024 г.	6,86	7	0,02	0,05	0,06

Оценка значимости различий между выборками с использованием критерия $HCP(LSD)_{05}$ обменной кислотности ($pH_{\text{сол.}}$) чернозема выщелоченного в нижней части гумусового горизонта (А 20–40 см) по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

Переменная 1	Переменная 2	Разница средних	$HCP(LSD)_{05}$
Пашня 2022 г.	Пашня 2023 г.	0,15	0,11
Пашня 2022 г.	Пашня 2024 г.	0,77	0,10
Пашня 2023 г.	Пашня 2024 г.	0,62	0,12
Мн. травы 2022 г.	Мн. травы 2023 г.	0,58	0,15
Мн. травы 2022 г.	Мн. травы 2024 г.	0,98	0,09
Мн. травы 2023 г.	Мн. травы 2024 г.	0,40	0,13
Распаханная залежь (1 год)	Распаханная залежь (2 год)	0,19	0,16
Распаханная залежь (1 год)	Распаханная залежь (3 год)	0,28	0,21
Распаханная залежь (2 год)	Распаханная залежь (3 год)	0,09	0,23
Целина 2022 г.	Целина 2023 г.	0,00	0,21
Целина 2022 г.	Целина 2024 г.	0,62	0,12
Целина 2023 г.	Целина 2024 г.	0,62	0,18

Зелёным цветом обозначены варианты, разница между которыми является существенной по критерию $HCP(LSD)_{05}$

Красным цветом обозначены варианты, разница между которыми не существенна по критерию $HCP(LSD)_{05}$

Средние значения и параметры рядов для актуальной кислотности (рНводн.) чернозема выщелоченного в верхней части гумусового горизонта (Апах 0–20 см, для целины А 5–20 см) по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

Названия групп (выборки)	Средние значения	Количество повторностей	Стандартные ошибки средних	Доверительные интервалы	Стандартные отклонения
Пашня 2022 г.	6,59	4	0,08	0,17	0,16
Пашня 2023 г.	6,84	4	0,06	0,12	0,11
Пашня 2024 г.	7,37	4	0,06	0,13	0,13
Мн. травы 2022 г.	6,24	4	0,05	0,11	0,11
Мн. травы 2023 г.	6,84	4	0,03	0,06	0,06
Мн. травы 2024 г.	7,07	4	0,03	0,05	0,05
Распаханная залежь (1 год)	6,94	4	0,07	0,14	0,13
Распаханная залежь (2 год)	6,96	6	0,04	0,07	0,09
Распаханная залежь (3 год)	7,12	5	0,06	0,12	0,13
Целина 2022 г.	6,70	4	0,05	0,11	0,11
Целина 2023 г.	6,75	4	0,06	0,13	0,12
Целина 2024 г.	7,76	4	0,06	0,13	0,13

Оценка значимости различий между выборками с использованием критерия НСР(LSD)₀₅ актуальной кислотности (рНводн.) чернозема выщелоченного в верхней части гумусового горизонта (Апах 0–20 см, для целины А 5–20 см) по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

Переменная 1	Переменная 2	Разница средних	НСР(LSD) ₀₅
Пашня 2022 г.	Пашня 2023 г.	0,25	0,24
Пашня 2022 г.	Пашня 2024 г.	0,78	0,25
Пашня 2023 г.	Пашня 2024 г.	0,53	0,21
Мн. травы 2022 г.	Мн. травы 2023 г.	0,60	0,15
Мн. травы 2022 г.	Мн. травы 2024 г.	0,83	0,15
Мн. травы 2023 г.	Мн. травы 2024 г.	0,23	0,10
Распаханная залежь (1 год)	Распаханная залежь (2 год)	0,02	0,17
Распаханная залежь (1 год)	Распаханная залежь (3 год)	0,18	0,21
Распаханная залежь (2 год)	Распаханная залежь (3 год)	0,16	0,15
Целина 2022 г.	Целина 2023 г.	0,05	0,20
Целина 2022 г.	Целина 2024 г.	1,06	0,20
Целина 2023 г.	Целина 2024 г.	1,01	0,21

Зелёным цветом обозначены варианты, разница между которыми является существенной по критерию НСР(LSD)₀₅

Красным цветом обозначены варианты, разница между которыми не существенна по критерию НСР(LSD)₀₅

Средние значения и параметры рядов для актуальной кислотности (рНводн.) чернозема выщелоченного в нижней части гумусового горизонта (А 20–40 см) по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

Названия групп (выборок)	Средние значения	Количество повторностей	Стандартные ошибки средних	Доверительные интервалы	Стандартные отклонения
Пашня 2022 г.	6,62	4	0,02	0,03	0,03
Пашня 2023 г.	6,82	4	0,04	0,09	0,08
Пашня 2024 г.	7,37	4	0,02	0,05	0,05
Мн. травы 2022 г.	6,75	4	0,04	0,08	0,08
Мн. травы 2023 г.	7,05	4	0,03	0,07	0,06
Мн. травы 2024 г.	7,22	4	0,05	0,09	0,09
Распаханная залежь (1 год)	6,71	4	0,04	0,08	0,07
Распаханная залежь (2 год)	6,75	4	0,05	0,10	0,10
Распаханная залежь (3 год)	7,17	4	0,04	0,08	0,08
Целина 2022 г.	6,89	6	0,04	0,07	0,09
Целина 2023 г.	7,04	6	0,03	0,06	0,07
Целина 2024 г.	8,14	4	0,10	0,20	0,19

Оценка значимости различий между выборками с использованием критерия $HCP(LSD)_{05}$ актуальной кислотности (рНводн.) чернозема выщелоченного в нижней части гумусового горизонта (А 20–40 см) по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

Переменная 1	Переменная 2	Разница средних	$HCP(LSD)_{05}$
Пашня 2022 г.	Пашня 2023 г.	0,19	0,11
Пашня 2022 г.	Пашня 2024 г.	0,75	0,07
Пашня 2023 г.	Пашня 2024 г.	0,56	0,12
Мн. травы 2022 г.	Мн. травы 2023 г.	0,30	0,12
Мн. травы 2022 г.	Мн. травы 2024 г.	0,47	0,15
Мн. травы 2023 г.	Мн. травы 2024 г.	0,17	0,14
Распаханная залежь (1 год)	Распаханная залежь (2 год)	0,04	0,15
Распаханная залежь (1 год)	Распаханная залежь (3 год)	0,46	0,13
Распаханная залежь (2 год)	Распаханная залежь (3 год)	0,42	0,15
Целина 2022 г.	Целина 2023 г.	0,15	0,10
Целина 2022 г.	Целина 2024 г.	1,26	0,24
Целина 2023 г.	Целина 2024 г.	1,11	0,23

Зелёным цветом обозначены варианты, разница между которыми является существенной по критерию $HCP(LSD)_{05}$

Красным цветом обозначены варианты, разница между которыми не существенна по критерию $HCP(LSD)_{05}$

Средние значения и параметры рядов значений гидролитической кислотности (мг-экв/100 г почвы) чернозема выщелоченного в верхней части гумусового горизонта (Апах 0–20 см, для целины А 5–20 см) по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

Названия групп (выборок)	Средние значения	Количество повторностей	Стандартные ошибки средних	Доверительные интервалы	Стандартные отклонения
Пашня 2022 г.	6,1	4	0,2	0,3	0,3
Пашня 2023 г.	5,1	4	0,1	0,3	0,3
Пашня 2024 г.	2,2	4	0,1	0,2	0,2
Мн. травы 2022 г.	6,3	4	0,1	0,2	0,2
Мн. травы 2023 г.	4,5	4	0,1	0,3	0,3
Мн. травы 2024 г.	1,8	4	0,1	0,3	0,3
Распаханная залежь (1 год)	5,9	4	0,1	0,3	0,3
Распаханная залежь (2 год)	4,4	4	0,2	0,4	0,3
Распаханная залежь (3 год)	2,4	4	0,1	0,2	0,2
Целина 2022 г.	4,4	4	0,2	0,4	0,4
Целина 2023 г.	1,4	4	0,3	0,6	0,6
Целина 2024 г.	0,2	4	0,1	0,2	0,2

Оценка значимости различий между выборками с использованием критерия $HCP(LSD)_{05}$ значений гидролитической кислотности (мг-экв/100 г почвы) чернозема выщелоченного в верхней части гумусового горизонта (Апах 0–20 см, для целины А 5–20 см) по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

Переменная 1	Переменная 2	Разница средних	$HCP(LSD)_{05}$
Пашня 2022 г.	Пашня 2023 г.	0,9	0,5
Пашня 2022 г.	Пашня 2024 г.	3,8	0,5
Пашня 2023 г.	Пашня 2024 г.	2,9	0,5
Мн. травы 2022 г.	Мн. травы 2023 г.	1,9	0,4
Мн. травы 2022 г.	Мн. травы 2024 г.	4,5	0,4
Мн. травы 2023 г.	Мн. травы 2024 г.	2,6	0,5
Распаханная залежь (1 год)	Распаханная залежь (2 год)	1,5	0,6
Распаханная залежь (1 год)	Распаханная залежь (3 год)	3,5	0,5
Распаханная залежь (2 год)	Распаханная залежь (3 год)	2,0	0,5
Целина 2022 г.	Целина 2023 г.	3,0	0,8
Целина 2022 г.	Целина 2024 г.	4,3	0,6
Целина 2023 г.	Целина 2024 г.	1,3	0,8

Зелёным цветом обозначены варианты, разница между которыми является существенной по критерию $HCP(LSD)_{05}$

Красным цветом обозначены варианты, разница между которыми не существенна по критерию $HCP(LSD)_{05}$

Средние значения и параметры рядов значений гидролитической кислотности (мг-экв/100 г почвы) чернозема выщелоченного в нижней части гумусового горизонта (А 20–40 см) по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

Названия групп (выборки)	Средние значения	Количество повторностей	Стандартные ошибки средних	Доверительные интервалы	Стандартные отклонения
Пашня 2022 г.	5,9	4	0,3	0,6	0,6
Пашня 2023 г.	5,3	4	0,3	0,7	0,7
Пашня 2024 г.	1,3	4	0,3	0,7	0,7
Мн. травы 2022 г.	7,5	4	0,4	0,7	0,7
Мн. травы 2023 г.	4,8	4	0,2	0,5	0,5
Мн. травы 2024 г.	1,7	4	0,1	0,2	0,2
Распаханная залежь (1 год)	5,7	4	0,2	0,5	0,4
Распаханная залежь (2 год)	4,8	4	0,1	0,2	0,2
Распаханная залежь (3 год)	3,1	4	0,1	0,2	0,2
Целина 2022 г.	3,4	4	0,2	0,3	0,3
Целина 2023 г.	3,0	4	0,2	0,4	0,4
Целина 2024 г.	0,3	4	0,2	0,4	0,4

Оценка значимости различий между выборками с использованием критерия НСР(LSD)₀₅ значений гидролитической кислотности (мг-экв/100 г почвы) чернозема выщелоченного в нижней части гумусового горизонта (А 20–40 см) по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

Переменная 1	Переменная 2	Разница средних	НСР(LSD) ₀₅
Пашня 2022 г.	Пашня 2023 г.	0,5	1,1
Пашня 2022 г.	Пашня 2024 г.	4,6	1,1
Пашня 2023 г.	Пашня 2024 г.	4,0	1,1
Мн. травы 2022 г.	Мн. травы 2023 г.	2,7	1,1
Мн. травы 2022 г.	Мн. травы 2024 г.	5,8	0,9
Мн. травы 2023 г.	Мн. травы 2024 г.	3,1	0,6
Распаханная залежь (1 год)	Распаханная залежь (2 год)	0,8	0,6
Распаханная залежь (1 год)	Распаханная залежь (3 год)	2,5	0,6
Распаханная залежь (2 год)	Распаханная залежь (3 год)	1,7	0,4
Целина 2022 г.	Целина 2023 г.	0,4	0,6
Целина 2022 г.	Целина 2024 г.	3,1	0,6
Целина 2023 г.	Целина 2024 г.	2,7	0,6

Зелёным цветом обозначены варианты, разница между которыми является существенной по критерию НСР(LSD)₀₅

Красным цветом обозначены варианты, разница между которыми не существенна по критерию НСР(LSD)₀₅

Средние значения и параметры рядов значений суммы обменных оснований (мг-экв/100 г почвы) чернозема выщелоченного в верхней части гумусового горизонта (Апах 0–20 см, для целины А 5–20 см) по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

Названия групп (выборок)	Средние значения	Количество повторностей	Стандартные ошибки средних	Доверительные интервалы	Стандартные отклонения
Пашня 2022 г.	33,5	4	0,8	1,6	1,5
Пашня 2023 г.	34,6	4	0,6	1,3	1,3
Пашня 2024 г.	40,6	4	0,4	0,9	0,8
Мн. травы 2022 г.	32,7	4	0,5	1,1	1,1
Мн. травы 2023 г.	35,6	4	0,4	0,7	0,7
Мн. травы 2024 г.	38,5	4	0,3	0,6	0,6
Распаханная залежь (1 год)	35,3	4	0,5	0,9	0,9
Распаханная залежь (2 год)	36,8	4	0,6	1,2	1,2
Распаханная залежь (3 год)	41,4	4	0,6	1,2	1,2
Целина 2022 г.	33,6	4	0,4	0,8	0,8
Целина 2023 г.	34,7	4	0,4	0,9	0,9
Целина 2024 г.	48,3	4	0,8	1,7	1,7

Оценка значимости различий между выборками с использованием критерия $HCP(LSD)_{05}$ значений суммы обменных оснований (мг-экв/100 г почвы) чернозема выщелоченного в верхней части гумусового горизонта (Апах 0–20 см, для целины А 5–20 см) по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

Переменная 1	Переменная 2	Разница средних	$HCP(LSD)_{05}$
Пашня 2022 г.	Пашня 2023 г.	1,1	2,4
Пашня 2022 г.	Пашня 2024 г.	7,1	2,1
Пашня 2023 г.	Пашня 2024 г.	6,0	1,9
Мн. травы 2022 г.	Мн. травы 2023 г.	2,9	1,6
Мн. травы 2022 г.	Мн. травы 2024 г.	5,8	1,5
Мн. травы 2023 г.	Мн. травы 2024 г.	2,9	1,1
Распаханная залежь (1 год)	Распаханная залежь (2 год)	1,5	1,8
Распаханная залежь (1 год)	Распаханная залежь (3 год)	6,1	1,8
Распаханная залежь (2 год)	Распаханная залежь (3 год)	4,6	2,0
Целина 2022 г.	Целина 2023 г.	1,1	1,5
Целина 2022 г.	Целина 2024 г.	14,8	2,3
Целина 2023 г.	Целина 2024 г.	13,7	2,4

Зелёным цветом обозначены варианты, разница между которыми является существенной по критерию $HCP(LSD)_{05}$

Красным цветом обозначены варианты, разница между которыми не существенна по критерию $HCP(LSD)_{05}$

Средние значения и параметры рядов значений суммы обменных оснований (мг-экв/100 г почвы) чернозема выщелоченного в нижней части гумусового горизонта (А 20–40 см) по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

Названия групп (выборок)	Средние значения	Количество повторностей	Стандартные ошибки средних	Доверительные интервалы	Стандартные отклонения
Пашня 2022 г.	32,8	4	0,5	1,1	1,0
Пашня 2023 г.	33,5	4	0,4	0,9	0,8
Пашня 2024 г.	38,6	4	0,3	0,7	0,7
Мн. травы 2022 г.	31,8	4	0,3	0,6	0,6
Мн. травы 2023 г.	33,5	4	0,4	0,8	0,8
Мн. травы 2024 г.	35,5	4	0,5	1,0	0,9
Распаханная залежь (1 год)	33,0	4	0,3	0,7	0,7
Распаханная залежь (2 год)	33,7	4	0,3	0,6	0,6
Распаханная залежь (3 год)	35,2	4	0,3	0,6	0,6
Целина 2022 г.	33,3	4	0,4	0,9	0,9
Целина 2023 г.	34,6	4	0,4	0,9	0,9
Целина 2024 г.	49,4	4	0,5	1,1	1,1

Оценка значимости различий между выборками с использованием критерия $HCP(LSD)_{05}$ значений суммы обменных оснований (мг-экв/100 г почвы) чернозема выщелоченного в нижней части гумусового горизонта (А 20–40 см) по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

Переменная 1	Переменная 2	Разница средних	$HCP(LSD)_{05}$
Пашня 2022 г.	Пашня 2023 г.	0,7	1,6
Пашня 2022 г.	Пашня 2024 г.	5,8	1,5
Пашня 2023 г.	Пашня 2024 г.	5,1	1,3
Мн. травы 2022 г.	Мн. травы 2023 г.	1,8	1,2
Мн. травы 2022 г.	Мн. травы 2024 г.	3,8	1,3
Мн. травы 2023 г.	Мн. травы 2024 г.	2,0	1,5
Распаханная залежь (1 год)	Распаханная залежь (2 год)	0,7	1,1
Распаханная залежь (1 год)	Распаханная залежь (3 год)	2,2	1,1
Распаханная залежь (2 год)	Распаханная залежь (3 год)	1,5	1,1
Целина 2022 г.	Целина 2023 г.	1,4	1,5
Целина 2022 г.	Целина 2024 г.	16,1	1,7
Целина 2023 г.	Целина 2024 г.	14,7	1,7

Зелёным цветом обозначены варианты, разница между которыми является существенной по критерию $HCP(LSD)_{05}$

Красным цветом обозначены варианты, разница между которыми не существенна по критерию $HCP(LSD)_{05}$

Средние значения и параметры рядов для содержания подвижного фосфора (P_2O_5) (мг/кг почвы) в верхней части гумусового горизонта (Апах 0–20 см, для целины А 5–20 см) чернозема выщелоченного по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

Названия групп (выборок)	Средние значения	Количество повторностей	Стандартные ошибки средних	Доверительные интервалы	Стандартные отклонения
Пашня 2022 г.	178	9	8	16	23
Пашня 2023 г.	161	9	8	15	23
Пашня 2024 г.	144	9	7	14	21
Мн. травы 2022 г.	83	9	4	8	12
Мн. травы 2023 г.	99	9	5	10	16
Мн. травы 2024 г.	154	9	5	10	14
Распаханная залежь (1 год)	63	9	4	8	12
Распаханная залежь (2 год)	110	7	6	12	16
Распаханная залежь (3 год)	111	7	7	14	18
Целина 2022 г.	69	7	6	11	15
Целина 2023 г.	74	5	9	17	19
Целина 2024 г.	81	6	9	18	21

Оценка значимости различий между выборками с использованием критерия $HCP(LSD)_{05}$ содержания подвижного фосфора (P_2O_5) (мг/кг почвы) в верхней части гумусового горизонта (Апах 0–20 см, для целины А 5–20 см) чернозема выщелоченного по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

Переменная 1	Переменная 2	Разница средних	$HCP(LSD)_{05}$
Пашня 2022 г.	Пашня 2023 г.	18	23
Пашня 2022 г.	Пашня 2024 г.	35	22
Пашня 2023 г.	Пашня 2024 г.	17	22
Мн. травы 2022 г.	Мн. травы 2023 г.	16	14
Мн. травы 2022 г.	Мн. травы 2024 г.	71	13
Мн. травы 2023 г.	Мн. травы 2024 г.	55	15
Распаханная залежь (1 год)	Распаханная залежь (2 год)	47	15
Распаханная залежь (1 год)	Распаханная залежь (3 год)	48	17
Распаханная залежь (2 год)	Распаханная залежь (3 год)	1	20
Целина 2022 г.	Целина 2023 г.	5	23
Целина 2022 г.	Целина 2024 г.	12	23
Целина 2023 г.	Целина 2024 г.	7	28

Зелёным цветом обозначены варианты, разница между которыми является существенной по критерию $HCP(LSD)_{05}$

Красным цветом обозначены варианты, разница между которыми не существенна по критерию $HCP(LSD)_{05}$

Средние значения и параметры рядов для содержания подвижного фосфора (P2O5) (мг/кг почвы) в нижней части гумусового горизонта (А 20–40 см) чернозема выщелоченного по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

Названия групп (выборок)	Средние значения	Количество повторностей	Стандартные ошибки средних	Доверительные интервалы	Стандартные отклонения
Пашня 2022 г.	103	6	4	8	9
Пашня 2023 г.	97	5	4	8	9
Пашня 2024 г.	99	6	5	10	12
Мн. травы 2022 г.	82	5	6	12	14
Мн. травы 2023 г.	78	5	9	18	20
Мн. травы 2024 г.	92	5	6	13	14
Распаханная залежь (1 год)	59	9	3	6	8
Распаханная залежь (2 год)	61	9	3	6	8
Распаханная залежь (3 год)	59	9	4	8	12
Целина 2022 г.	85	9	3	6	9
Целина 2023 г.	79	9	3	6	9
Целина 2024 г.	86	9	4	9	13

Оценка значимости различий между выборками с использованием критерия НСР(LSD)₀₅ содержания подвижного фосфора (P2O5) (мг/кг почвы) в нижней части гумусового горизонта (А 20–40 см) чернозема выщелоченного по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

Переменная 1	Переменная 2	Разница средних	НСР(LSD) ₀₅
Пашня 2022 г.	Пашня 2023 г.	6	13
Пашня 2022 г.	Пашня 2024 г.	5	14
Пашня 2023 г.	Пашня 2024 г.	1	14
Мн. травы 2022 г.	Мн. травы 2023 г.	4	25
Мн. травы 2022 г.	Мн. травы 2024 г.	10	21
Мн. травы 2023 г.	Мн. травы 2024 г.	14	25
Распаханная залежь (1 год)	Распаханная залежь (2 год)	2	8
Распаханная залежь (1 год)	Распаханная залежь (3 год)	1	10
Распаханная залежь (2 год)	Распаханная залежь (3 год)	2	10
Целина 2022 г.	Целина 2023 г.	5	9
Целина 2022 г.	Целина 2024 г.	1	12
Целина 2023 г.	Целина 2024 г.	6	11

Зелёным цветом обозначены варианты, разница между которыми является существенной по критерию НСР(LSD)₀₅

Красным цветом обозначены варианты, разница между которыми не существенна по критерию НСР(LSD)₀₅

Средние значения и параметры рядов для содержания обменного калия (K₂O) (мг/кг почвы) в верхней части гумусового горизонта (Апах 0–20 см, для целины А 5–20 см) чернозема выщелоченного по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

Названия групп (выборок)	Средние значения	Количество повторностей	Стандартные ошибки средних	Доверительные интервалы	Стандартные отклонения
Пашня 2022 г.	128	9	10	20	30
Пашня 2023 г.	121	9	10	21	31
Пашня 2024 г.	122	9	10	19	29
Мн. травы 2022 г.	136	9	6	13	19
Мн. травы 2023 г.	147	9	7	13	20
Мн. травы 2024 г.	133	9	8	15	23
Распаханная залежь (1 год)	114	9	5	11	16
Распаханная залежь (2 год)	106	9	6	12	18
Распаханная залежь (3 год)	117	9	5	11	16
Целина 2022 г.	90	9	6	11	17
Целина 2023 г.	99	9	6	12	18
Целина 2024 г.	97	9	7	14	20

Оценка значимости различий между выборками с использованием критерия НСР(LSD)₀₅ содержания обменного калия (K₂O) (мг/кг почвы) в верхней части гумусового горизонта (Апах 0–20 см, для целины А 5–20 см) чернозема выщелоченного по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

Переменная 1	Переменная 2	Разница средних	НСР(LSD) ₀₅
Пашня 2022 г.	Пашня 2023 г.	7	31
Пашня 2022 г.	Пашня 2024 г.	6	29
Пашня 2023 г.	Пашня 2024 г.	1	30
Мн. травы 2022 г.	Мн. травы 2023 г.	11	19
Мн. травы 2022 г.	Мн. травы 2024 г.	3	21
Мн. травы 2023 г.	Мн. травы 2024 г.	14	22
Распаханная залежь (1 год)	Распаханная залежь (2 год)	8	17
Распаханная залежь (1 год)	Распаханная залежь (3 год)	3	16
Распаханная залежь (2 год)	Распаханная залежь (3 год)	11	18
Целина 2022 г.	Целина 2023 г.	8	18
Целина 2022 г.	Целина 2024 г.	7	19
Целина 2023 г.	Целина 2024 г.	1	19

Зелёным цветом обозначены варианты, разница между которыми является существенной по критерию НСР(LSD)₀₅

Красным цветом обозначены варианты, разница между которыми не существенна по критерию НСР(LSD)₀₅

Средние значения и параметры рядов для содержания обменного калия (K₂O) (мг/кг почвы) в нижней части гумусового горизонта (А 20–40 см) чернозема выщелоченного по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

Названия групп (выборок)	Средние значения	Количество повторностей	Стандартные ошибки средних	Доверительные интервалы	Стандартные отклонения
Пашня 2022 г.	92	9	9	19	28
Пашня 2023 г.	107	9	8	15	23
Пашня 2024 г.	79	9	7	14	21
Мн. травы 2022 г.	100	9	8	16	23
Мн. травы 2023 г.	81	9	8	15	23
Мн. травы 2024 г.	101	9	3	7	10
Распаханная залежь (1 год)	93	9	5	10	15
Распаханная залежь (2 год)	93	9	6	13	19
Распаханная залежь (3 год)	87	9	6	12	17
Целина 2022 г.	88	9	6	11	17
Целина 2023 г.	88	9	5	10	15
Целина 2024 г.	86	9	6	12	18

Оценка значимости различий между выборками с использованием критерия НСР(LSD)₀₅ содержания обменного калия (K₂O) (мг/кг почвы) в нижней части гумусового горизонта (А 20–40 см) чернозема выщелоченного по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

Переменная 1	Переменная 2	Разница средних	НСР(LSD) ₀₅
Пашня 2022 г.	Пашня 2023 г.	15	26
Пашня 2022 г.	Пашня 2024 г.	13	25
Пашня 2023 г.	Пашня 2024 г.	28	22
Мн. травы 2022 г.	Мн. травы 2023 г.	19	23
Мн. травы 2022 г.	Мн. травы 2024 г.	2	18
Мн. травы 2023 г.	Мн. травы 2024 г.	20	18
Распаханная залежь (1 год)	Распаханная залежь (2 год)	0	18
Распаханная залежь (1 год)	Распаханная залежь (3 год)	5	16
Распаханная залежь (2 год)	Распаханная залежь (3 год)	5	18
Целина 2022 г.	Целина 2023 г.	0	16
Целина 2022 г.	Целина 2024 г.	2	18
Целина 2023 г.	Целина 2024 г.	2	17

Зелёным цветом обозначены варианты, разница между которыми является существенной по критерию НСР(LSD)₀₅

Красным цветом обозначены варианты, разница между которыми не существенна по критерию НСР(LSD)₀₅