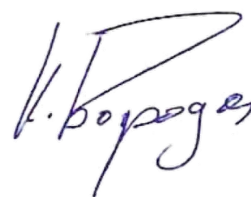


На правах рукописи



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**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Москва – 2026

Работа выполнена на кафедре почвоведения, геологии и ландшафтоведения Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»

Научный руководитель:	Борисов Борис Анорьевич , доктор биологических наук, профессор, профессор кафедры почвоведения, геологии и ландшафтоведения ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева
Официальные оппоненты:	Громовик Аркадий Игоревич , доктор биологических наук, доцент, доцент кафедры экологии и земельных ресурсов медико-биологического факультета ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет» Чинилин Андрей Владимирович , кандидат биологических наук, старший научный сотрудник отдела агроэкологической оценки почв и проектирования агроландшафтов ФГБНУ ФИЦ «Почвенный институт имени В.В. Докучаева»
Ведущая организация:	ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный агротехнологический университет имени Л.Я. Флорентьева»

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

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

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

Автореферат разослан «__» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 35.2.030.05,
кандидат биологических наук, доцент



И.М. Митюшев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 постагроденных 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 распахки залежного участка.

Научная новизна. Впервые получено, что в условиях лесостепной зоны, в черноземе выщелоченном при возврате в пашню за 3-хлетний 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 среднемошного 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, посвященной 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 почвы до проведения комплекса лабораторных исследований, обработки и систематизации полученных данных, написания статей и текста работы.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 9 печатных работ, в том числе 1 – в рецензируемом научном издании, рекомендованном ВАК РФ, 1 – в издании, входящем в международные реферативные базы данных.

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО ПОЧВ И ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ

(аналитический обзор литературы)

В главе рассматриваются исторические аспекты исследования органического вещества почв. Описываются современные подходы к оценке состояния органического вещества, в том числе на основе определения лабильных форм органического углерода и индексных расчетов. Рассматривается вопрос исследования почв залежных участков и перспективы их ввода в сельскохозяйственный оборот.

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.

Климат территории умеренно континентальный, умеренно холодная зима с частыми оттепелями и тёплым летом. Среднегодовая температура +5 °С (± 11 °С), средняя температура января –10 °С, июля +20 °С. Продолжительность периода с положительными температурами составляет 220–225 дней. По климатическим характеристикам территорию области можно разделить на две части: северо-западную, которая характеризуется несколько большей увлажнённой, более мягкой зимой и более прохладным летом, и юго-восточную, отличающуюся меньшей увлажнённой, более жарким летом и холодной зимой. Годовое количество осадков изменяется от 600–650 мм на северо-западе до 450 мм на юго-востоке. В безморозный период выпадает 70 % осадков (максимум в июле). К концу зимы мощность снежного покрова достигает 0,3–0,7 м, почва промерзает на глубину 0,6–0,9 м (Агроклиматический справочник..., 1966; Природа России: национальный портал..., 2025).

На основании проведенного анализа климатических данных за период с 1986-2024 гг. и в сравнении их с годами исследования можно сделать следующие выводы: 2024 год стал рекордно тёплым и сухим, как по средней температуре, так и по общему количеству осадков, 2022 и 2023 – тоже были теплее нормы, но климатические параметры оказались ближе к средним.

Тульская область расположена в северо-восточной части Среднерусской возвышенности и имеет характерные особенности ее рельефа – глубокую расчлененность поверхности гидрографической сетью, всхолмленность, выпуклую форму склонов, вследствие чего эрозия почвы в ряде районов и сельскохозяйственных предприятий имеет значительное развитие.

Почвообразующие породы представлены в приокских районах водно-ледниковыми и древнеаллювиальными песками и моренными суглинками; в центральных и северных районах – тяжелыми бескарбонатными покровными суглинками; в южных и восточных районах – лёссовидными суглинками.

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 до 40 см) и еще менее распространены мощные виды (А+АВ свыше 80 см). Гранулометрический состав черноземов представлен тяжелыми и частично средними иловато-пылеватými суглинками. Содержание гумуса в пахотном горизонте черноземов Тульской области по данным для подтипа оподзоленного 5,2–7,1 %, для выщелоченного 6,1–8,7%.

По данным базы единого государственного реестра почвенных ресурсов (Единый государственный реестр почвенных ресурсов..., 2014) расположение объекта исследований приурочено к ареалу распространения преимущественно черноземов выщелоченных (Классификация и диагностика почв СССР, 1977).

3. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования являлся чернозем выщелоченный среднегумусный среднемощный тяжелосуглинистый на тяжелых лессовидных суглинках (Классификация и диагностика почв СССР, 1977), который располагался в пределах территории пахотных угодий и залежного участка Тульского НИИСХ филиал ФИЦ «Немчиновка» Плавского района Тульской области. По классификации почв России (Классификация почв России, 2004) чернозем глинисто-иллювиальный типичный среднемощный сильногумусированный тяжелосуглинистый на лессовидном тяжелом суглинке. По международной системе классификации почв WRB: Luvic Chernic Phaeozems (Siltic, Pachic) (Мировая реферативная база почвенных ресурсов..., 2024).

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 в 2024 году были замещены озимой пшеницей; распаханная залежь – участок, бывший в залежи более 40 лет и введенный в оборот в 2022 году с посевом яровых культур; целина – участок с разнотравной растительностью, который не использовался под пашню. Почва на всех участках представлена черноземом выщелоченным среднегумусным среднемощным тяжелосуглинистым на тяжелых лессовидных суглинках. На каждом участке были заложены разрезы и отобраны образцы из верхней части гумусового горизонта (Апах 0–20 см, для целины А 5–20 см) и нижней части гумусового горизонта (А 20–40 см) на глубину 0–20 и 20–40 см соответственно. 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.

Для уточнения истории залежного и целинного участков использовались данные ретроспективного анализа, проведенного в работе Королевой (Королева, 2023).

Таким образом, план эксперимента предполагал комплекс наблюдений за свойствами почв, в первую очередь, за состоянием органического вещества, за 3-х летний период в разных условиях землепользования, что позволило проследить динамику изменения состояния за этот период с использованием новых методов.

Лабораторные методы исследования

Определение органического углерода гумуса проводилось по методу И.В. Тюрина в модификации В.Н. Симакова (ГОСТ 26213-2021, 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 определялась 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) (ГОСТ 12536-2014).

Определение суммы обменных оснований проводили методом Каппена–Гильковица (ГОСТ 27821-2020), а определение гидролитической кислотности по Каппену (в модификации ЦИНАО по ГОСТ 26212-2021). Емкость катионного обмена (ЕКО) и степень насыщенности почв основаниями вычислялась по показателям суммы обменных оснований и гидролитической кислотности. Величину pH водной и солевой суспензии определяли потенциометрическим методом.

Определение подвижного фосфора и обменного калия проводилось по методу Чирикова (в модификации ЦИНАО по ГОСТ 26204-91).

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

4.1 Динамика содержания гумуса

Определение содержания гумуса в черноземе выщелоченном среднегумусном среднемощном тяжелосуглинистом на тяжелых лессовидных суглинках показало существенные различия в его динамике при разных типах землепользования. В таблице 1 приведено содержание гумуса в исследуемом черноземе по вариантам с разным характером землепользования на экспериментальных участках за 2022–2024 гг.

Таблица 1 – Содержание гумуса (%) в черноземе выщелоченном по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

Вариант	Горизонт, глубина, см	2022 год	2023 год	2024 год	HCP(LSD) ₀₅
Пашня	A _{пах 0-20}	6,00±0,18	6,07±0,25	6,10±0,28	0,29
	A ₂₀₋₄₀	5,95±0,50	5,83±0,45	5,28±0,53	0,59
Многолетние травы	A _{пах 0-20}	7,12±0,27	6,99±0,48	6,03±0,43	0,49
	A ₂₀₋₄₀	6,01±0,30	6,06±0,45	4,77±0,50	0,51
Распаханная залежь	A _{пах 0-20}	7,42±0,19	7,11±0,16	6,99±0,33	0,28
	A ₂₀₋₄₀	5,69±0,03	5,30±0,47	5,58±0,39	0,48
Целина	A ₅₋₂₀	6,68±0,30	6,64±0,28	6,69±0,26	0,34
	A ₂₀₋₄₀	5,57±0,29	5,5±0,29	5,29±0,52	0,46

На пашне в верхней части гумусового горизонта наблюдалось стабильное содержание гумуса. Начальные показатели 2022 года (6,00%) незначительно

возросли к 2024 году до 6,1%. В то же время в нижней части горизонта (20–40 см) зафиксировано некоторое снижение: с 5,95% в 2022 году до 5,28% в 2024 году, которое связано, по-видимому, с внутренней неоднородностью свойств горизонта по сравнению с обрабатываемой частью.

В почве под многолетними травами была наиболее выражена динамика к снижению содержания гумуса. В верхнем горизонте на 3-ий год после распашки произошло значительное уменьшение содержания гумуса с 7,12% до 6,03%, обусловленное усилением минерализации.

На распаханной залежи отмечалось менее выраженное снижение содержания органического вещества в исследуемый период. В верхнем горизонте содержание гумуса уменьшилось с 7,42% до 6,99%, что связано с изменением землепользования (распашкой) исследуемого участка, при этом в нижней части горизонта (20–40 см) наблюдались колебания от 5,69% до 5,58%.

Наиболее стабильные показатели отмечены на целинном участке. В верхней части гумусового горизонта (5–20 см) содержание гумуса оставалось практически неизменным на уровне 6,6%, а в нижней части горизонта (20–40 см) наблюдалось лишь незначительное снижение с 5,57% до 5,29%.

Во всех исследуемых вариантах прослеживается общая закономерность: содержание гумуса в верхнем горизонте значительно превышает его количество в нижнем слое. При этом характер динамики содержания гумуса зависел от типа землепользования. Наименьшие колебания содержания гумуса наблюдаются на участке целины и пашни, указывая на стабильность состояния органического вещества. Распашка залежи привела к снижению содержания гумуса за 3 года наблюдения. Возделывание многолетних трав положительно сказалось на содержании гумуса, но после их распашки содержание быстро возвратилось к показателям почвы под пашней.

4.2 Лабильное органическое вещество

Исследование содержания легкоразлагаемого органического вещества (ЛОВ), представляющего собой легкую фракцию, в черноземе выщелоченном показало существенные различия в его содержании и динамике при разных типах землепользования (табл. 2).

Таблица 2 – Содержание ЛОВ (%) в черноземе выщелоченном по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

Вариант	Горизонт, глубина, см	2022 год	2023 год	2024 год	HCP(LSD) ₀₅
Пашня	A _{пах 0-20}	0,38±0,08	0,36±0,08	0,35±0,11	0,11
	A ₂₀₋₄₀	0,27±0,07	0,26±0,15	0,24±0,14	0,15
Многолетние травы	A _{пах 0-20}	1,07±0,58	1,04±0,34	0,46±0,08	0,47
	A ₂₀₋₄₀	0,41±0,13	0,36±0,12	0,36±0,15	0,16
Распаханная залежь	A _{пах 0-20}	0,69±0,33	0,62±0,28	0,39±0,12	0,30
	A ₂₀₋₄₀	0,30±0,08	0,24±0,04	0,25±0,09	0,09
Целина	A ₅₋₂₀	0,69±0,18	0,70±0,37	0,73±0,37	0,39
	A ₂₀₋₄₀	0,32±0,07	0,32±0,12	0,32±0,06	0,11

Анализ содержания легкоразлагаемого органического вещества в черноземе выщелоченном демонстрирует существенные различия в зависимости от типа землепользования.

На пашне наблюдалось стабильное содержания легкоразлагаемого органического вещества в обоих горизонтах. В верхней части гумусового горизонта (0–20 см) показатель уменьшился незначительно с 0,38% до 0,35%, а в нижней (20–40 см) – с 0,27% до 0,24%.

Под многолетними травами отмечена наиболее контрастная динамика. В верхней части гумусового горизонта (0–20 см) зафиксировано резкое снижение с 1,07% до 0,46% на 3-й год наблюдений, тогда как в нижней (20–40 см) содержание легкоразлагаемого органического вещества оставалось относительно стабильным на уровне 0,36–0,41%.

На распаханной залежи наблюдалось постепенное уменьшение содержания легкоразлагаемого органического вещества. В верхней части гумусового горизонта (0–20 см) показатель снизился за три года после распашки с 0,69% до 0,39%, а в нижней (20–40 см) – с 0,30% до 0,25%.

Целинные участки демонстрировали наиболее стабильную картину. В верхней части гумусового горизонта (5–20 см) содержание легкоразлагаемого органического вещества оставалось практически неизменным (0,69–0,73%), а в нижней (20–40 см) сохранялось на уровне 0,32%.

Для всех типов землепользования прослеживалась общая закономерность: содержание легкоразлагаемого органического вещества в верхней части гумусового горизонта превышало показатели нижней части. Наиболее интенсивное снижение наблюдалось под многолетними травами, что связано с их распашкой на 3 год, и коррелировало с уменьшением содержания гумуса. Распашка залежного участка приводит к снижению содержания ЛОВ в связи с изменением поступления органических остатков. Более медленное снижение содержания ЛОВ на распаханной залежи по сравнению с многолетними травами обусловлено, по-видимому, качественными различиями растительности. Целинный участок сохраняет наиболее стабильные показатели содержания легкоразлагаемого органического вещества.

4.3 Элементный состав ЛОВ

В работе проведено исследования образцов легкой фракции органического вещества почв после центрифугирования с помощью сканирующей микроскопии и проведено озоление для пересчета на углерод.

Растровая микроскопия показывает преобладание кислорода и углерода: в сумме они дают до 70% массы. Это позволяет перейти к содержанию углерода ЛОВ. Также после озоления проведен пересчет на углерод, с учетом, что его содержится 50% в составе потерянной органики после прокаливания (Борисов, Ганжара, 2015). Результаты сравнения методов представлены в таблице 3.

Результаты, полученные разными методами, показали высокую сходимость, наибольшие расхождения наблюдались в образцах ЛОВ в варианте многолетних трав в 2022 г. (до 0,09%), что может быть связано, в значительной степени, с локальными особенностями образца, тогда как для пашни различия были

минимальны (0,00–0,01%). В основном, различия не превышают величин стандартного отклонения. Таким образом, возможно применение растровой микроскопии для изучения ЛОВ, определения в ней содержания углерода и получения развернутой картины по элементному составу. Однако, необходимо уделять особое внимание процедуре отмывки органических остатков от тяжелой жидкости.

Таблица 3 – Сравнительная характеристика методик определения содержание углерода в образцах ЛОВ (%) по вариантам исследования

Горизонт (глубина, см)	2022 год			2023 год			2024 год		
	По потерям при прокаливании	По растровой микроскопии	Различия между методами	По потерям при прокаливании	По растровой микроскопии	Различия между методами	По потерям при прокаливании	По растровой микроскопии	Различия между методами
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

4.4 Перманганат-окисляемый углерод

Активный углерод (РОХС) служит индикатором здоровья почвы и определяется путем окисления перманганатом, он считается одной из лабильных форм органического углерода, характеризующих способность органического вещества к микробному разложению. В последнее время интерес к этому методу возрос из-за его экономичности, скорости проведения анализа и надежности благодаря стандартизированному подходу. Этот метод позволяет оценить активный пул почвенного органического углерода и помогает в определении стратегий землепользования, способствующих накоплению или потере почвенного органического углерода.

Результаты определения содержания перманганат-окисляемого углерода (РОХС) в черноземе выщелоченном при различных типах землепользования приведены в таблице 4.

Значения активного углерода РОХС для верхней части гумусового горизонта по вариантам землепользования не обнаружили достоверных различий ни по одному из вариантов. В отличие от содержания ЛОВ по Ганжаре и Борисову, которое показало достоверное снижение легкой фракции на 3-й год после распашки

многолетних трав или после возвращения залежи в обработку, данный метод не оказался чувствительным к таким изменениям в характере землепользования. В целом, уровень содержания перманганат-окисляемого углерода по всем вариантам за трёхлетний период наблюдений оставался практически на одном и том же высоком уровне, таким образом, для исследуемой черноземной почвы данный показатель не был чувствителен к изменению характера землепользования.

Таблица 4 – Содержание РОХС (мг/кг) в черноземе выщелоченном по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

Вариант	Горизонт, глубина, см	2022 год	2023 год	2024 год	HCP(LSD) ₀₅
Пашня	A _{пах 0-20}	954±204	1032±163	1055±220	238
	A ₂₀₋₄₀	833±81	726±45	715±51	74
Многолетние травы	A _{пах 0-20}	1019±164	1029±230	1046±209	245
	A ₂₀₋₄₀	813±123	852±69	760±128	133
Распаханная залежь	A _{пах 0-20}	1042±180	984±175	1110±171	212
	A ₂₀₋₄₀	849±103	821±110	791±95	124
Целина	A ₅₋₂₀	1120±189	1008±198	1028±140	214
	A ₂₀₋₄₀	766±85	760±95	773±107	115

Ожидаемо для нижележащей части гумусового горизонта также отсутствовали статистически значимые различия в уровнях содержания РОХС по годам и вариантам. За трёхлетний период наблюдений не обнаружено различий по уровням содержания активного углерода в нижней части гумусового горизонта чернозема выщелоченного после возврата залежи в пашню.

Однозначно можно отметить разницу между содержанием РОХС в верхней и нижней частях гумусового горизонта, которая составила 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, т.е. показатель содержания перманганат-окисляемого углерода характеризовался высоким уровнем во всем гумусовом горизонте.

4.5 Сравнительная характеристика содержания углерода разных форм органического вещества

В работе проведен обобщающий анализ состояния органического вещества с точки зрения содержания разных форм органического углерода (табл. 5), 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.

В верхней части гумусового горизонта пашни (0–20 см) наблюдается постепенное увеличение содержания углерода гумуса с 3,48±0,10% в 2022 году до 3,54±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.

Таблица – 5 Таблица содержания разных 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 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%).

В верхней части гумусового горизонта целинных земель (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 целинных землях и распаханной залежи. Во всех типах почв 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.

5. СТРУКТУРНОЕ СОСТОЯНИЕ ЧЕРНОЗЕМА ВЫЩЕЛОЧЕННОГО ПРИ РАЗНОМ ХАРАКТЕРЕ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ

5.1 Агрегатный анализ по методу Н.И. Саввинова

Исследование структурного состояния чернозема выщелоченного показало значительные различия в зависимости от типа землепользования (табл. 6).

На пашне наблюдалась умеренная стабильность структуры с содержанием агрономически ценных агрегатов 61,3–65,0% в нижнем горизонте и 68,4% в верхнем в 2024 году. Водопрочность агрегатов в пахотном слое составляла 64–68%.

Наиболее благоприятное структурное состояние отмечается на целинных участках, где содержание ценных агрегатов достигает 80–85% в верхнем горизонте и 75–80% в нижнем. Водопрочность структуры здесь максимальна – 80–94%.

Почвы под многолетними травами демонстрируют высокое качество структуры (до 92% ценных агрегатов), однако после распахки трав показатели довольно быстро снижались. В нижнем горизонте на участке многолетних трав зафиксировано 64–78% агрономически ценных агрегатов.

Распаханная залежь характеризуется контрастной динамикой: в первый год после распахки структура близка к целинной, но к третьему году показатели приближаются к пахотным.

Во всех вариантах прослеживается закономерность: в подпахотном горизонте содержание водопрочных агрегатов ниже, чем в верхнем. При этом целинный участок сохраняет более высокое качество структуры по сравнению с другими вариантами землепользования.

Таблица 6 – Агрегатный состав чернозема выщелоченного по результатам сухого и мокрого просеивания по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022–2024 гг.

Вариант	Горизонт, глубина, см	2022 год			2023 год			2024 год		
		Кс*	Ас*	Авп*	Кс*	Ас*	Авп*	Кс*	Ас*	Авп*
Пашня	А _{пах 0-20}	2,3	69,8	68,4	1,5	59,5	55,2	2,2	68,4	69,9
	А ₂₀₋₄₀	1,6	61,3	64,4	1,9	65,0	68,2	1,9	65,0	66,7
Многолетние травы	А _{пах 0-20}	4,2	80,6	72,8	11,5	92,0	75,2	2,2	68,9	78,9
	А ₂₀₋₄₀	2,2	68,9	72,1	3,6	78,4	80,8	1,8	64,2	61,0
Распаханная залежь	А _{пах 0-20}	3,3	76,5	76,9	6,8	87,2	77,7	2,8	73,5	75,9
	А ₂₀₋₄₀	4,5	81,9	67,1	3,4	77,0	56,0	1,8	64,7	71,8
Целина	А ₅₋₂₀	4,5	81,7	87,1	4,6	82,0	88,0	5,4	84,3	93,3
	А ₂₀₋₄₀	3,4	77,5	80,0	4,0	80,0	87,6	3,0	74,8	86,9

*Кс – коэффициент структурности; Ас – содержание агрономически ценных агрегатов 0,25–10 мм, %; Авп – содержание водопрочных агрегатов 0,25–10 мм, %

Многолетние травы оказывают положительное влияние на структурное состояние, но условия постоянной механической обработки почв на пашне приводят к постепенному ухудшению агрегатного состава почвы.

5.2 Микроагрегатный анализ методом Н.А. Качинского

По результатам микроагрегатного анализа верхней части гумусового горизонта четко просматривается 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 различий можно отметить некоторые различия в перераспределении микроагрегатов между фракциями 1–0,25 и 0,25–0,05 мм. Для чернозема выщелоченного на целинном участке отмечается 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.

В нижней части гумусового горизонта в течение трех лет наблюдаются различные изменения в распределении микроагрегатов 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

В зарубежной литературе и при оценке качества землепользования имеет распространение индексный подход на основе отношения почвенного органического углерода к содержанию глинистых частиц (менее 0,002 мм) SOC/CLAY. Были установлены (Hoffland E. et al., 2020) пороговые значения индекса SOC/CLAY как индикатора различных уровней структурного состояния почвы: $>0,125$ – «очень хорошее», $0,125-0,1$ – «хорошее», $0,1-0,077$ «удовлетворительное», $<0,077$ – «плохое». 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 оценивается в ряду пашня < пастбище < постоянные травы $\approx$ лесные почв. Также важно учесть, что у почв с более низким значением коэффициента, потенциал накопления углерода выше, так как есть свободная матрица для его закрепления. 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).

В таблице 7 представлены результаты определения данного индекса для чернозема выщелоченного на исследуемых участках.

Таблица 7 – SOC/CLAY индекс в черноземе выщелоченном по вариантам землепользования на исследуемых участках за 2022-2024 гг.

Вариант	Горизонт, глубина, см	2022 год	2023 год	2024 год
Пашня	A _{пах 0-20}	0,166	0,154	0,162
	A ₂₀₋₄₀	0,165	0,158	0,144
Многолетние травы	A _{пах 0-20}	0,188	0,182	0,158
	A ₂₀₋₄₀	0,167	0,168	0,132
Распаханная залежь	A _{пах 0-20}	0,187	0,186	0,181
	A ₂₀₋₄₀	0,131	0,127	0,145
Целина	A ₅₋₂₀	0,179	0,177	0,180
	A ₂₀₋₄₀	0,148	0,143	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 хорошее», однако индекс не показал существенной разницы между разными вариантами землепользования и, таким образом, в условиях лесостепной зоны на исследуемых черноземных почвах не может служить индикатором условий землепользования.

5.4 Оценка плотности, плотности твердой фазы и общей пористости

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 образцы также были отбраны уже после обработки, для нее отмечена несколько большая плотность, что обусловлено, по-видимому, постепенной трансформацией физических показателей после распашки залежного участка. Плотность под многолетними травами соответствовала равновесной и типична для хорошей пашни. Для целины отмечался наиболее высокий показатель плотности, но почва не была переуплотнена. Общая пористость во всех вариантах находилась в пределах 55–65%, что характеризует отличную пористость для пахотных почв. Во всех вариантах землепользования наблюдалось закономерное увеличение плотности и снижение пористости с глубиной. Плотность твердой фазы отражает среднюю плотность входящих в ее состав минералов и органического вещества, ее схожие значения отражают идентичность условий формирования чернозема выщелоченного на исследуемых участках.

6. АГРОХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Анализ агрохимических показателей чернозема выщелоченного в зависимости от типа землепользования представлен в таблице 8.

На пашне наблюдалась тенденция к повышению величины рН и снижению гидролитической кислотности. В верхнем горизонте (0–20 см) величина рН солевой суспензии выросла с 5,53 до 6,24, а гидролитическая кислотность снизилась с 6,1 до 2,2 мг-экв/100 г почвы. В нижнем горизонте (20–40 см) аналогичные показатели увеличились с 5,56 до 6,33 и снизились с 5,9 до 1,3 мг-экв/100 г почвы соответственно. Сумма обменных оснований в верхнем слое возросла с 33,5 до 40,6 мг-экв/100 г почвы, в нижнем – с 32,7 до 38,6 мг-экв/100 г почвы.

На участке многолетних трав наблюдалась схожая динамика, но с более низкими начальными показателями. В верхнем горизонте величина рН солевой суспензии увеличилась с 5,45 до 6,44, а гидролитическая кислотность снизилась с 6,3 до 1,9 мг-экв/100 г почвы. Содержание обменных оснований возросло с 32,7 до 38,5 мг-экв/100 г почвы.

На распаханной залежи отмечались наиболее высокие значения рН_{сол}. В верхнем горизонте величина рН солевой суспензии варьировала от 5,79 до 6,03, гидролитическая кислотность снизилась с 5,9 до 2,4 мг-экв/100 г почвы. Сумма обменных оснований увеличилась с 35,3 до 41,3 мг-экв/100 г почвы.

Таблица 8 – Агрохимические показатели чернозема выщелоченного на исследуемых участках за 2022-2024 гг.

Год	Горизонт (глубина, см)	pНсол,	pНводн,	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

Целинный участок демонстрирует наиболее значительные изменения физико-химических свойств во времени. В верхнем горизонте (5–20 см) рН солевой суспензии вырос с 5,81 до 6,53, а в нижнем (20–40 см) – с 6,24 до 6,86. Гидролитическая кислотность практически исчезла, снизившись до 0,2–0,3 мг-экв/100 г почвы. Сумма обменных оснований достигла максимальных значений: 48,4 мг-экв/100 г почвы в верхнем и 49,3 мг-экв/100 г почвы в нижнем горизонте.

Для всех типах землепользования прослеживалась общая тенденция к снижению кислотности и увеличению суммы обменных оснований в почвах.

Наиболее значительные изменения происходили на целинном участке, где к 2024 году достигнута практически полная насыщенность основаниями (до 100%).

Такая тенденция изменения физико-химических свойств связана с особенностью водного режима чернозема выщелоченного, который характеризуется как периодически промывной, для него обычна выщелоченность карбонатов, которые по данным морфологических описаний обнаруживаются в пределах 1 метра. 2024 год характеризовалась как наиболее сухой из 3 лет наших наблюдений и даже среди многолетних наблюдений по осадкам на 38% ниже среднемноголетнего показателя за период с 1986 г. Такая климатическая ситуация, вероятно, привела к перенаправлению тока влаги на восходящий режим, что, в свою очередь, вызвало подъем 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 замещению ионов H^+ составе ППК основаниями, что можно наблюдать по резкому падению величины 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 усиливает восходящий ток влаги и растворенных в ней катионов. Эффект от постоянной растительности вдвое сильнее, чем на пашне. Обработка почвы и непостоянство растительного покрова несколько ослабляют эффект сухого года.

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

Содержание подвижного фосфора на пашне в верхнем слое снизилось с 178 до 144 мг/кг, при этом концентрация обменного калия оставалась относительно стабильной на уровне 120–122 мг/кг. В нижнем горизонте (20–40 см) содержание фосфора уменьшилось с 103 до 99 мг/кг, а калия снизилось с 92 до 79 мг/кг.

Участок с многолетними травами показывал схожую динамику. В верхнем горизонте содержание фосфора увеличилось с 83 до 154 мг/кг, а калия варьировалось в пределах 136–147 мг/кг. В нижнем слое содержание фосфора колебалось от 78 до 92 мг/кг, калия – от 81 до 101 мг/кг.

На распаханной залежи содержание фосфора в верхнем горизонте увеличилось с 63 до 111 мг/кг, калия оставалось относительно стабильным на

уровне 114–117 мг/кг. В нижнем слое содержание фосфора стабилизировалось на уровне 59–61 мг/кг, калия – 87–93 мг/кг.

Целинные участки демонстрировали наименее значительные изменения показателей. Содержание фосфора в верхнем горизонте оставалось относительно стабильным (69–81 мг/кг), в нижнем колебалось от 79 до 86 мг/кг. Концентрация калия в верхнем слое варьировалась от 90 до 97 мг/кг, в нижнем – от 65 до 73 мг/кг.

Содержание питательных веществ в верхних горизонтах превышало показатели нижних слоёв. Наиболее высокие показатели фосфора и калия наблюдались на пашне, тогда как на целинном участке отмечено относительно стабильное содержание элементов питания. Однако, статистически значимых различий не наблюдалось. Введение залежи в оборот и применяемые агротехнические приемы не показали значимого влияния на содержание питательных элементов.

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 части 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 среднесиловатого 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 среднесиловатого 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 среднесиловатом среднесиловатом 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 среднесиловатом 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 рН, 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 распахкой 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 распахки 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 РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ (ДИССЕРТАЦИИ)

В рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. **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.

Публикации в изданиях, индексируемых в международных цитатно-аналитических базах данных

2. **Бородина, К.С.** Оценка структуры чернозема выщелоченного Тульской области при различном характере землепользования / К.С. Бородина, Н.В. Минаев, Б.А. Борисов // Journal of Agriculture and Environment. – 2026. – №5 (69). – URL: <https://jae.cifra.science/archive/5-69-2026-may/10.60797/JAE.2026.69.5> (дата обращения: 19.05.2026). – DOI: 10.60797/JAE.2026.69.5

В сборниках научных трудов, научных докладов, материалов конференций

3. **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.

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

5. **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 выдающегося ученого, одного из основоположников агрономического почвоведения В.Р. Вильямса (1863-1939), Москва, 30 ноября 2023 года. – Москва: Российский государственный аграрный университет - Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева, 2023. – С. 43-45.

6. **Бородина, К.С.** Дизайн эксперимента по оценки 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, 05–07 июня 2023 года. – Москва: Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К.А. Тимирязева, 2023. – С. 391-396.

7. **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.

8. **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.

9. **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. 2024» Сборник тезисов докладов восьмой конференции молодых ученых Почвенного института им. В.В. Докучаева. Москва, 16-20 сентября 2024 г., – Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2024. – С. 116-117.