На правах рукописи

УДК 631.45:631.8:631.445.2:631.41:631.879.2

Васбиева Марина Тагирьяновна

АГРОГЕННАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ПЛОДОРОДИЯ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТЫХ ПОЧВ ПРЕДУРАЛЬЯ

Специальность 4.1.3 Агрохимия, агропочвоведение,
защита и карантин растений

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
доктора биологических наук

Москва 2024

Работа выполнена в лаборатории агротехнологий «Пермского НИИСХ» – филиала Пермского ФИЦ УрО РАН.

Научный консультант:	Доктор биологических наук, доцент **Завьялова Нина Егоровна**
Официальные оппоненты:	**Мамонтов Владимир Григорьевич** доктор биологических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», кафедра почвоведения, геологии и ландшафтоведения, профессор кафедры **Виноградов Дмитрий Валериевич** доктор биологических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева», кафедра агрономии и агротехнологий, заведующий кафедрой **Синявский Игорь Васильевич** доктор биологических наук, доцент ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный аграрный университет», кафедра агротехнологий и экологии, профессор кафедры
Ведущая организация:	ФГБНУ «Верхневолжский Федеральный аграрный научный центр"

Защита диссертации состоится «18» апреля 2024 года в 14.00 час. на заседании диссертационного совета 24.1.006.01 при ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии имени Д.Н. Прянишникова»: 127434, Москва, ул. Прянишникова, 31а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии имени Д.Н. Прянишникова» и на сайте: https://www.vniia-pr.ru/upload/iblock/ab4/2uwdn1gp0k5auzu7wjrcxmr30kxxtlf2/vasbieva_diss_11_12_2023.pdf

Автореферат разослан « » _____ 2024 г.

Приглашаем Вас принять участие в обсуждении диссертации на заседании диссертационного совета. Отзывы на автореферат в 2-х экземплярах, заверенные гербовой печатью учреждения, просим направлять по адресу: 127434, г. Москва, ул. Прянишникова, 31 а, учёному секретарю диссертационного совета, e-mail: dissovet_vniia@mail.ru

Учёный секретарь
диссертационного совета Никитина Любовь Васильевна

Актуальность темы исследований. Одной из важнейших проблем человечества является деградация почв, вызываемая сельскохозяйственным использованием. Основная причина - увеличение разомкнутости биогеохимических циклов биофильных элементов. По данным ФАО, в мире потеряно около 2 млрд. га продуктивных почв, что существенно снижает возможности регенеративного растениеводства (Карпухин и др., 2021, Доклад продовольственной и сельскохозяйственной…, 2021). Высокопродуктивное сельскохозяйственное производство не может функционировать без пополнения запасов в почвах питательных элементов. Результаты многочисленных полевых опытов, проведенных научно-исследовательскими институтами и агрохимической службой, а также результаты работы сельскохозяйственных предприятий свидетельствуют, что подъема урожайности можно добиться только за счет планомерной и целенаправленной работы по повышению плодородия почв путем применения удобрений, химической мелиорации и средств защиты растений (Сычев и др., 2020).

В Предуралье около 70 % площади пашни занимают дерново-подзолистые почвы, характеризующиеся низким уровнем естественного плодородия. Актуальными и стратегическими задачами являются сохранение, воспроизводство и повышение их плодородия, конструирование агроэкосистем, устойчивых к антропогенным нагрузкам через оптимизацию в них круговоротов веществ посредством сбалансированного применения удобрений. Решение таких задач возможно только в рамках длительных экспериментов, т.к. многие изменения в почве происходят медленно и проследить их сложно (Гомонова, Минеев, 2012; Хайдуков и др., 2014; Гамзиков, 2016; Мёрзлая, 2018; Сычёв и др., 2020; Налиухин, 2021; Dai et al., 2017; Wanga et al., 2019).

Степень разработанности. К настоящему времени в Предуралье и ближайших регионах накоплен обширный экспериментальный материал по вопросам применения удобрений на дерново-подзолистых почвах. Данным вопросам посвящены работы М.П. Петухова (1964), Л.В. Дербеневой (1994), А.С. Пискунова (1994), А.И. Калинина (2004); Н.Е. Завьяловой (2007, 2014), А.И. Косолаповой (2007, 2018), Л.А. Михайловой (2008), В.Р. Ямалтдиновой (2011), С.И. Поповой, Ф.М. Зиганьшиной (2013), И.В. Лысковой (2015, 2017), А.Г. Дзюина, Г.П. Дзюина (2018; 2020), Т.Ю. Бортник (2019) и ряда других ученых. Однако, недостаточно комплексных исследований, охватывающих сразу несколько направлений влияния удобрений. Многие данные противоречивы или изучены не достаточно полно, например, показано содержание только подвижных соединений элементов питания, отсутствует информация по изменению других форм. Большинство исследований посвящено изучению пахотного и подпахотного слоев, работ, в которых показано изменение параметров плодородия почвы по профилю немного. Часто выводы о влиянии применения различных систем удобрения на плодородие почвы основываются на сравнении с контрольным вариантом на данный момент времени, а не с исходным уровнем или целинными аналогами, что может привести к искажению трактовки результатов.

В данной работе представлена комплексная оценка количественной и качественной трансформации параметров плодородия дерново-подзолистой почвы в метровом слое с использованием современных методов, изменения продуктивности сельскохозяйственные культур, состава и экофизиологических свойств микробоценоза, накопления тяжелых металлов в почве и растениях в результате длительного применения различных систем удобрений. Выводы сделаны на основе данных трех длительных полевых опытов Геосети (1969-2022 гг.), сравнения целинных и пахотных почв.

Цель исследований – оценка трансформации параметров плодородия дерново-подзолистой почвы на основе комплексных исследований в длительных стационарных опытах и сравнении с целинным аналогом для выявления наиболее эффективных систем удобрения, сохраняющих плодородие почвы и способствующих получению максимальной продуктивности пашни.

Задачи исследований:

1. Изучить изменение основных параметров плодородия дерново-подзолистой почвы в результате длительного (35-50 лет) экстенсивного (без удобрений) сельскохозяйственного использования, провести сравнение с целинным аналогом.
2. Установить влияние длительного применения различных систем удобрения на трансформацию режима органического вещества, основных элементов питания, показателей почвенно-поглощающего комплекса дерново-подзолистой почвы в пахотном слое и по профилю.
3. Определить структуру микробоценоза дерново-подзолистой почвы в зависимости от применяемых систем удобрения.
4. Выявить изменения экофизиологических показателей микробоценоза дерново-подзолистой почвы Предуралья при длительном применении удобрений.
5. Установить эффективность влияния длительного применения различных систем удобрений на урожайность сельскохозяйственных культур.
6. Рассчитать баланс органического углерода и основных элементов питания в полевых севооборотах за период ведения длительных опытов.
7. Выявить влияние длительного применения различных систем удобрения на накопление тяжелых металлов в почве и растениеводческой продукции.

Объекты исследования. Целинная и пахотная дерново-подзолистая почва, системы удобрений, сельскохозяйственные культуры.

Научная новизна. Впервые в Предуралье на основе собственных исследований, обобщения и анализа экспериментальных данных, полученных в длительных стационарных опытах на дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве с 1969 по 2022 гг. определена эффективность многолетнего применения органической, минеральной, органоминеральной систем удобрения (выровненных по элементам питания), NPK-дефицитных систем (N, P, K, PK, NK, NP), осадков сточных вод. Выявлены особенности трансформации органического вещества, общего (валового) азота, фосфора, калия и их различных соединений при длительном применении различных видов, доз и

соотношения органических и минеральных удобрений. Установлено влияние длительного использования различных систем удобрений на распределение органического углерода, биогенных элементов по профилю, определены запасы углерода, азота, фосфора и калия в метровом слое почвы. Определены структурные особенности и выявлены изменения экофизиологических показателей микробоценоза дерново-подзолистой почвы Предуралья при длительном применении удобрений. Изучено влияние применения различных систем удобрения на продуктивность парозернопропашного, парозернотравяного севооборотов и отдельных культур за четыре-пять ротаций. Рассчитан баланс органического углерода и элементов питания за 21-40-летний период возделывания сельскохозяйственных культур. Впервые в регионе определена углерод-секвестрирующая способность культур севооборота при различных системах удобрения и углеродпротекторная емкость пахотных дерново-подзолистых тяжелосуглинистых почв. Определено влияние длительного применения осадков сточных вод на накопление в почве тяжёлых металлов в метровом слое и сделана оценка их поступления в растения за ротацию семипольного полевого севооборота.

Теоретическая и практическая значимость. Полученные экспериментальные данные при сравнении целинных и пахотных дерново-подзолистых почв позволили оценить возможность устойчивого функционирования агроценозов в условиях длительного экстенсивного сельскохозяйственного использования пашни. Расширены и углублены представления о роли минеральных и органических удобрений в воспроизводстве плодородия дерново-подзолистых почв, установлены агроэкологические последствия длительного применения различных систем удобрений (органической, минеральной, органоминеральной, NPK-дефицитных систем, осадков сточных вод) в климатических условиях Предуралья. Установлено количество секвестрируемого углекислого газа из атмосферы культурами севооборота, выявлен высокий потенциал дерново-подзолистых тяжелосуглинистых почв для накопления и депонирования углерода в почве. Предложены виды, дозы и сочетания минеральных и органических удобрений для сохранения и улучшения плодородия пахотных почв, обеспечения устойчивого производства растениеводческой продукции. Показано, что внесение азотных удобрений в чистом виде способствует получению высокой урожайности сельскохозяйственных культур, при этом их длительное использование ведет к существенному ухудшению плодородия почвы. Выявлено, что наиболее эффективным на озимой ржи и овсе (с учетом окупаемости 1 кг д.в. удобрений 1 кг основной продукции) является применение азотных удобрений N_{90}, картофеле $(NPK)_{30\text{-}60}$, яровой пшенице - $(NPK)_{60}$, яровом ячмене - $(NPK)_{30}$. Сведения о выносе, балансе элементов питания и коэффициенты использования NPK из удобрений в полевых севооборотах могут быть использованы в справочно-нормативной документации. Полученные новые знания могут быть использованы в

образовательном процессе студентов высших и средних специальных учебных заведений.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Характер, направленность трансформации режима органического вещества и основных элементов питания, физико-химических и биологических свойств дерново-подзолистой почвы по профилю (0-100 см) при длительном экстенсивном возделывании сельскохозяйственных культур (35-50 лет) в сравнении с целинным аналогом.

2. Закономерности изменения параметров почвенного плодородия по профилю и во времени в результате длительного применения (1969-2022 гг.) органической, минеральной и органоминеральной систем удобрения (выровненных по элементам питания), NPK-дефицитных систем удобрения (N, P, K, PK, NK, NP), возрастающих доз полного минерального удобрения $(NPK)_{30\text{-}150}$ и нетрадиционного органического удобрения – осадков сточных вод.

3. Состав и структура микробоценоза дерново-подзолистой почвы Предуралья, микробная биомасса и дыхательная активность микроорганизмов при длительном применении удобрений.

4. Количественные параметры аккумуляции углекислого газа из атмосферы культурами севооборота, почвенная секвестрация углерода при использовании различных систем удобрения и углеродпротекторная ёмкость пахотных дерново-подзолистых почв.

5. Продуктивность полевых культур парозернопропашного, парозернотравяного севооборотов при длительном использовании различных систем удобрения и её зависимость от изученных параметров плодородия почвы.

6. Баланс органического углерода и элементов питания при различных системах удобрения в полевых севооборотах за три-пять ротаций.

7. Изменение содержания Cd, Pb, Zn, Cu, Co, Ni и Mn в почве в результате длительного экстенсивного возделывания сельскохозяйственных культур и применения удобрений (навоз КРС, ОСВ, NPK) и тенденции накопления тяжелых металлов в растительной продукции.

Степень достоверности и апробация работы. Степень достоверности представленных результатов подтверждается проведением исследований в длительных стационарных опытах с соблюдением количества повторностей, ежегодной приёмкой полевых опытов, использованием современных методов лабораторных анализов в соответствии с ГОСТами, математической обработкой результатов исследований, публикацией основных положений диссертации.

Основные результаты исследовательской работы доложены на всероссийских и международных научно-практических конференциях: ФГБОУ ВО Ижевская ГСХА (Ижевск, 2009), ФГОУ ВПО Башкирский ГАУ (Уфа, 2011), ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ (Барнаул, 2013), ФГБОУ ВО «МГУ им. Н.П. Огарёва» (Саранск, 2014), ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ (Краснодар, 2015, 2018, 2021), ФГБОУ ВО Пермский ГАТУ (Пермь, 2019), ФГБОУ ВО «Марийский

государственный университет» (Йошкар-Ола, 2021), ФГБНУ «ВНИИ агрохимии» (Москва, 2010, 2021), Пермский НИИСХ – филиал ПФИЦ УрО РАН (Пермь, 2013, 2023), ИПА СО РАН (Новосибирск, 2023), на международном симпозиуме «AGROSYM» (Bosnia and Herzegovina, 2015, 2021), Белорусском агрохимическом форуме (Солигорск, 2023).

Организация исследований и личный вклад соискателя. Автору принадлежит формулировка темы работы, цели, задач, разработка программы исследований, проведение полевых и лабораторных исследований, анализ литературных источников, формулировка выводов работы. Автор проводил наблюдения и исследования в длительных опытах с 2007 по 2022 год, был ответственным исполнителем опыта «Использование отходов промышленных предприятий и осадка сточных вод в качестве удобрений сельскохозяйственных культур», обобщил, проанализировал накопленные экспериментальные данные трёх опытов с 1969 по 2022 год. Публикация результатов автором осуществлена лично и совместно с другими исполнителями опытов Н.Е. Завьяловой, В.Р. Ямалтдиновой, Д.С. Фоминым, Д.Г. Шишковым. Закладка длительных полевых опытов в Пермском НИИСХ была проведена под руководством С.И. Поповой и Ф.М. Зиганьшиной, ответственными исполнителями опытов в разное время являлись А.И. Косолапова, Е.М. Митрофанова, И.Д. Соснина.

Автор работает в должности старшего научного сотрудника лаборатории агротехнологий Пермского НИИСХ – филиала ПФИЦ УрО РАН, проводил исследования в рамках государственного задания по теме «Разработка научных основ систем земледелия и животноводства в условиях интенсивной антропогенной нагрузки на почвы и сельскохозяйственные угодья в Предуралье (АААА-А19-119032190059-8) и грантов РФФИ «Теоретические и прикладные аспекты трансформации органического вещества и азота пахотных дерново-подзолистых почв Предуралья» (№ 17-45-590166 р_а, 2018-2020 гг.), «Научные основы рационального использования традиционных и новых калийных удобрений на дерново-подзолистых почвах Предуралья» (№ 2045596005 р_НОЦ_Пермский край, 2021-2023 гг.).

Публикации по теме диссертации. По материалам исследований опубликовано 43 печатных работы, в том числе 27 – в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, 10 – в системе цитирования WoS и Scopus.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа изложена на 437 страницах компьютерного текста, состоит из введения, 10 глав и заключения, включает 125 таблиц, 41 рисунок и 20 приложений. Список литературы включает 612 источников, в том числе 107 иностранных.

Благодарности. Автор выражает глубокую признательность и благодарность за ценные советы, и постоянную поддержку научному консультанту, доктору биологических наук, доценту, главному научному сотруднику Завьяловой Нине Егоровне. Автор благодарит за помощь в проведении исследований сотрудников лабораторий агротехнологий и

прецизионных технологий в сельском хозяйстве Ямалтдинову В.Р., Фомина Д.С., Шишкова Д.Г., Останину И.Н., Минину О.В., Брюхову Т.С.

Содержание работы

1 Обзор литературы

В первой главе рассмотрены вопросы влияния длительного экстенсивного сельскохозяйственного использования пашни и применения удобрений на изменение плодородия почвы. Показано влияние различных систем удобрения на продуктивность полевых культур. Рассмотрены экологические аспекты применения удобрений.

2 Условия и методика проведения исследований

2.1 Объекты и методика исследований. Диссертационная работа выполнена в Пермском НИИСХ – филиале ПФИЦ УрО РАН на базе трех длительных полевых опытов 1969, 1976, 1978 гг. закладки. Оценка характера изменений пахотных почв, получена при сравнении данных агроценозов с целинным аналогом (злаково-разнотравный луг). Стационарные участки на лугу, который непосредственно примыкают к опытному полю, были заложены в 2011 году. Ботанический состав травостоя: 62,0 - злаковые, 13,5 - бобовые, 24,5% - разнотравье. Травостой не отчуждался.

Закладка полевых опытов проведена по общепринятым методикам на дерново-слабоподзолистых тяжелосуглинистых почвах.

Полевой опыт №1. Изучение системы удобрения на подзолистых почвах Предуралья (год закладки 1969). Аттестат длительного опыта № 19. Схема опыта включает 26 вариантов. Для исследований были выбраны следующие варианты: 1. без удобрений (контроль), 2. навоз 10 т/га в год, 3. навоз 20 т/га в год, 4. NPK эквивалентно 10 т навоза, 5. NPK эквивалентно 20 т навоза, 6. навоз 5 т + NPK эквивалентно 5 т навоза, 7. навоз 10 т + NPK эквивалентно 10 т навоза, 8. навоз 20 т + NPK эквивалентно 20 т навоза.

Повторность вариантов четырехкратная, размещение рендомизированное. Опыт был заложен в двух последовательных во времени закладках (1969 г., 1970 г.). Изучаемая схема в опыте сложилась со второй ротации севооборота (1977 г., 1978 г.), поэтому основные результаты исследований приведены за последние 5 ротаций (II-VI ротации, 1977-2017 гг.). Общая площадь делянки 115,5 $м^2$. Исследования проводили в полевом восьмипольном парозернопропашном севообороте с чередованием культур: пар чистый, озимая рожь, яровая пшеница с подсевом клевера, клевер 1 года пользования (г.п.), клевер 2 г. п., ячмень, картофель, овес.

Навоз КРС вносили в севообороте в два приема: под рожь и картофель (разовые дозы составили 20, 40 и 80 т/га). Минеральные удобрения, рассчитанные по эквивалентному содержанию в навозе, распределяли, в зависимости от количества под озимую рожь, пшеницу, ячмень, картофель и овес. Клевер не удобряли, учитывали последействие. За пять ротаций севооборота с навозом при насыщенности пашни 10 т/га в год в почву поступило N - 1400, P - 950, K- 2070 кг/га ($N_{35}P_{25}K_{50}$ в год или $N_{55}P_{40}K_{80}$ под зерновые и картофель), при насыщенности 20 т/га – 2800, 1900 и 4140 кг/га,

соответственно ($N_{70}P_{50}K_{100}$ в год или $N_{110}P_{75}K_{165}$ под зерновые и картофель). В первой ротации севооборота в опыте было проведено известкование (по 1,0 Нг).

Полевой опыт №2. Изучение влияния доз и соотношений минеральных удобрений на урожай и качество полевых культур (год закладки 1978). Аттестат опыта № 106. Полевой опыт заложен по неполной факториальной схеме 1/9(6x6x6), которая включает 24 варианта и два повторения. Для исследований были выбраны следующие варианты: 1. без удобрений (контроль), 2. N_{90}, 3. $P_{90,}$ 4. K_{90}, 5. $(NP)_{90}$, 6. $(NK)_{90}$, 7. $(PK)_{90}$, 8. $(NPK)_{90}$, 9. $(NPK)_{30}$, 10. $(NPK)_{60}$, 11. $(NPK)_{120}$, 12. $(NPK)_{150}$.

Опыт представлен в двух закладках (1978 г., 1980 г.). Общая площадь делянки – 120 $м^2$. Исследования проводили в полевом восьмипольном парозернопропашном севообороте с чередованием культур: чистый пар, озимая рожь, картофель, яровая пшеница с подсевом клевера, клевер 1 г.п., клевер 2 г.п., ячмень, овес. Перед закладкой опыта проводили известкование (по 1,0 Нг).

Полевой опыт №3. Использование отходов промышленных предприятий и осадка сточных вод в качестве удобрений сельскохозяйственных культур (год закладки 1976). Аттестат опыта № 59. Для исследований были выбраны следующие варианты: 1. без удобрений (контроль), 2. навоз, 3. ОСВ, 4. NPK – фон, 5. фон + навоз, 6. фон + ОСВ.

Органические удобрения (осадки сточных вод, навоз КРС) по 40 т/га натуральной влажности (насыщенность 5,7 т/га в год) вносили в пару 1 раз в ротацию севооборота. Осадки сточных вод (ОСВ) применяли в I-VI ротациях, навоз в III-VI ротациях севооборота. Минеральные удобрения (I ротация – $(NPK)_{120}$, II ротация - $(NPK)_{90}$, III-VI ротации - $(NPK)_{60}$) вносили под зерновые культуры, на клевере изучали последействие. Повторность вариантов в опыте трехкратная, расположение делянок систематическое. Общая площадь делянки 47,5 $м^2$. Наблюдения проводили в полевом семипольном парозернотравяном севообороте с чередованием культур: чистый (занятый – I ротация) пар, озимая рожь, яровая пшеница с подсевом клевера, клевер 1 г.п., клевер 2 г.п., ячмень, овес. Химический состав навоза и ОСВ в среднем за III-VI ротации (на абсолютно сухое вещество): содержание органического вещества – 75 и 66 %, $N_{общ}$ – 1,8 и 2,0 %, $P_{общ}$ – 2,1 и 3,1 %, $K_{общ}$ – 1,0 и 0,5 %, pH_{KCl} 7,3 и 6,5, влажность – 72 и 63 %, соответственно. ОСВ, применяемые в опыте в V-VI ротациях севооборота, по агрохимическим показателям и содержанию тяжелых металлов (ТМ) соответствовали требованиям ГОСТ Р. 17.4.3.07-2001. ОСВ по содержанию ТМ относились к осадкам II группы, т.е. могут быть использованы под зерновые, зернобобовые, зернофуражные и технические культуры. Известкование в опыте не проводили.

Солома в опытах после уборки до 2013 года отчуждалась. Формы удобрений – аммонийная селитра или мочевина, двойной или простой суперфосфат, калий хлористый. Минеральные удобрения в опытах под яровые зерновые и картофель вносили весной перед посевом, под озимую рожь дробно – осенью и весной (азотные) в подкормку. Агротехника в опытах

общепринятая для Пермского края. Сорта полевых культур районированные, семена высших репродукций.

Площадка с бессменным чистым паром была заложена в 1977 году в рамках длительного стационарного опыта с севооборотами. Здесь ежегодно осуществляли механическую обработку почвы с заделкой сорной растительности. Посев сельскохозяйственных культур не проводили.

2.2 Методика наблюдений и анализов. Лабораторные исследования выполнены в аналитической лаборатории Пермского НИИСХ, в ИТХ УрО РАН, ИЭГМ УрО РАН, ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока и ФГБУ «ГЦАС «Пермский». Отбор образцов почвы в опытах проводили систематически, осенью, после уборки культуры и/или окончания ротации севооборота в пахотном слое (0-20 см) или по слоям до глубины 1 метр (0-20, 20-40, 40-60, 60-80 и 80-100 см). Отбирали индивидуальные образцы в 3-5 точках на каждой делянке. На лугу наблюдения и отбор почвенных образцов (верхнего слоя 0-20 см, по слоям до глубины 1 метр или по генетическим горизонтам) проводили в течение 2011-2021 гг. Анализы в воздушно-сухих почвенных образцах выполнены с использованием существующих ГОСТов и стандартных методик. Определение общего содержания азота в почве проводили по методу Къельдаля, фракционный состав по Э.И. Шконде, И.Е. Королёвой, общего содержания фосфора, его минеральных и органических соединений методом прокаливания Сэндерса и Вильямса, фракционного состава минеральных фосфатов методом Гинзбург-Лебедевой (Агрохимические методы…, 1975). Определение валового содержания калия определяли после мокрого озоления в смеси концентрированной серной кислоты и перекиси водорода (Способ определения валовых…, 2013), легкоподвижной формы калия в вытяжке 0,01М $CaCl_2$, необменной - по Гедройцу. Расчет содержания необменных соединений определяли по разности содержания калия в 10% HCl вытяжке и подвижных по методу Кирсанова. Валовое содержание ТМ и их формы (вытяжка 1Н HCI и ацетатно-аммонийный буфер (ААБ) с pH-4,8) определяли на атомно-абсорбционном спектрометре iCE 3500 с пламенной атомизацией (Thermo Scientific (США)) (Методические указания…, 1992). Препараты гуминовых кислот выделены по классической методике Российской школы почвоведов.

Методика оценки субстрат-индуцированного, базального дыхания почвы и формула расчета углерода микробной биомассы представлены в работах Н.Д. Ананьевой с соавторами (2009, 2011). Потенциальную активность азотфиксации определяли ацетиленовым методом (Эмер и др., 2014). Численность микроорганизмов основных эколого-трофических групп почвы определяли методом посева на среды (Практикум по микробиологии, 2005). В качестве модельной группы микроорганизмов для выявления структурных перестроек микробного сообщества использовали актиномицеты (Гаузе и др., 1983). Морфологические признаки исследовали при помощи светового микроскопа Leica DM 2500 (Carl Zeiss, Германия). Таксономическое положение выборочно отобранных штаммов (культуры с различными морфотипами

колоний) определяли на основе анализа фрагментов 16S рРНК в НПК “Синтол” (г. Москва).

Расчет углеродпротекторной ёмкости (СРС) выполнен по трем уравнениям линейной регрессии (Hassink, 1997; Six et al., 2002) через содержание в почве тонкодисперсных гранулометрических фракций размером 0,05 (0,02) мм. Пересчет содержания фракций размером <0,02 мм проводили по кумулятивной кривой распределения их содержания в зависимости от логарифма диаметра частиц (Когут, Семёнов, 2020).

Урожайность зерновых культур в полевых опытах учитывали сплошным методом с каждой делянки, клевера – сплошным методом или пробными снопами, картофеля – сплошным методом или косвенным. Содержание углерода в растениях определяли на элементном анализаторе Elementary Vario ElCub. Расчёт баланса органического углерода проводили по методике, предложенной А.М. Лыковым (1979). Поступление биологического азота с клевером рассчитывали как 2/3 от выноса культурой. Запасы в почве органического углерода и элементов питания рассчитывали через плотность. Статистическую обработку результатов исследований, корреляционно-регрессионные анализы проводили по Б.А. Доспехову (1985) с использованием *Microsoft Excel* (Яковлев, 2005).

2.3 Почвенные условия проведения исследований. Почва исследуемых объектов – дерново-подзолистая тяжелосуглинистая (Классификация и диагностика почв, 1977 г.). Почвообразующая порода - желто-бурая некарбонатная покровная глина. Характерной особенностью почвы, сформированной на богатых в минералогическом отношении пермских глинах, является высокое содержание обменных форм кальция и магния, которое увеличивается с глубиной, как и сумма поглощенных оснований (Коротаев, 1962; Глазовская и др., 2004).

2.4 Климатические условия проведения исследований. Исследования проводили в IV агроклиматическом районе (центральная часть) Пермского края (Шкляев, 1963). За время проведения исследований в опытах (1977-2022 гг. – период наблюдений за растениями) на избыточно увлажнённые годы (ГТК >1,3) пришлось около 50 %, годы с нормальным увлажнением (ГТК=1,0-1,3) – 30 % и засушливые годы (ГТК <1,0) – 20%. Сумма средних суточных активных температур выше 10^0 варьировала от 1223 (1992 г.) до 2148 (2021 г.)°С. Период исследований охватывал как благоприятные, так и экстремальные по количеству тепла и влаги годы. Влияние погодных условий зависело от вида культуры, сорта и соблюдения агротехнологий возделывания культур.

3 Режим органического вещества дерново-подзолистой почвы при длительном сельскохозяйственном использовании пашни и применении удобрений

3.1 Содержание органического углерода в почве. Содержание органического углерода ($C_{орг}$) в почве под лугом в период исследований с 2011 по 2018 гг. варьировало в слое 0-20 см от 1,22 до 1,30 %, что соответствует исходному содержанию $C_{орг}$ в длительных опытах (1,22-1,33%) перед

закладкой. Длительное экстенсивное (без применения удобрений) возделывание сельскохозяйственных культур в полевом севообороте (35-50 лет) привело к уменьшению его содержания в почве. Относительно исходного уровня потери составили 13-14 %. Запасы $C_{орг}$ в пахотном слое почвы уменьшились на 4-5 т/га. В работах других исследователей (Литвинский и др., 2010) потери $C_{орг}$ отмечаются более существенные. В наших опытах наличие двух полей клевера в севообороте ослабляло интенсивность процессов дегумификации.

Минимальным уровнем $C_{орг}$ для данной климатической зоны характеризовалась почва, находящаяся под чистым паром с 1977 года. Обработка почвы, отсутствие покровной растительности привели к существенным потерям $C_{орг}$. Наибольшие потери отмечены в первые 10 лет (с 1,22 до 0,92 %). В следующие 35 лет (1986-2021 гг.) содержание $C_{орг}$ в почве бессменного пара менялось незначительно и варьировало от 0,78 до 0,94 %. Это связано с поступлением различного количества биомассы сорной растительности и гидротермическим режимом вегетационных периодов.

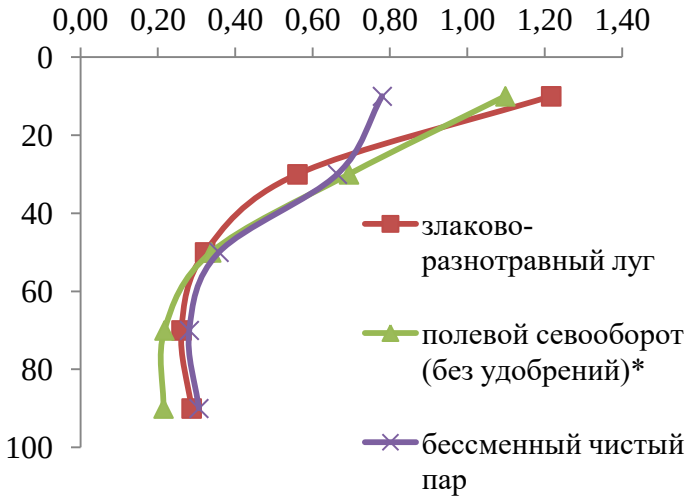
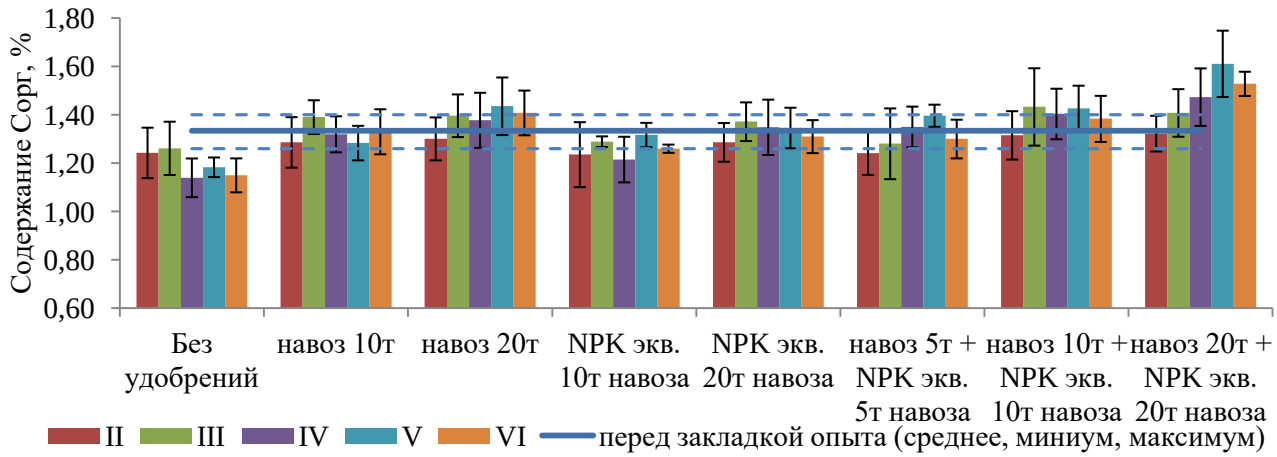


Рисунок 1 - Содержание $C_{орг}$ по профилю почвы при различных типах землепользования (*полевой севооборот (без удобрений) - усредненные данные контрольных вариантов опытов 1-3)

Оценка изменения содержания $C_{орг}$ по профилю почвы (0-100 см) показала, что длительное экстенсивное использование пашни, как и бессменное парование, оказало существенное влияние только на верхний слой (0-20 см) (рис. 1).

В *опыте 1* изучали влияние на режим органического вещества (ОВ) почвы органической, минеральной и органоминеральной систем удобрения. Поддержание содержания $C_{орг}$ на исходном уровне в пахотном слое почвы наблюдали в вариантах «навоз 10 т/га в год» и «NPK экв. 20 т/га в год навоза» (рис. 2). Минеральные удобрения могут поддерживать уровень содержания ОВ в почве за счет увеличения количества пожнивно-корневых остатков. При более низкой насыщенности минеральными удобрениями (NPK экв. навозу 10 т/га) в отдельные ротации севооборота наблюдали уменьшение $C_{орг}$ до 10% от исходного. Тенденция к росту содержания $C_{орг}$ отмечена при насыщенности пашни навозом 20 т/га в год и внесении навоза 10 т в год + NPK экв. навозу. В варианте с максимальной насыщенностью пашни удобрениями «навоз 20 т/га в год + NPK экв. навозу» отмечено увеличение содержания $C_{орг}$ выше исходного уровня на 15 %. Запасы $C_{орг}$ в пахотном слое почвы повысились на 5 т/га. Достоверное увеличение $C_{орг}$ в почве отмечено с IV ротации севооборота.



«усики» на графике – здесь и далее - доверительный интервал, p<0,05.

Рисунок 2 - Изменение содержания $C_{орг}$ в пахотном слое почвы (0-20 см) при длительном применении различных систем удобрений (среднее по двум закладкам, II-VI ротации, 1977-2017 гг.), % *(опыт 1)*

В варианте «навоз 5 т/га + NPK экв. навозу» наблюдали как уменьшение, так и увеличение количества $C_{орг}$ относительно исходного уровня, что связано с варьированием урожайности культур по ротациям. Кроме того динамика может быть обусловлена наличием аналитической ошибки, пространственной вариабельностью и сезонной составляющей.

Длительное применение органической и органоминеральной систем удобрения привело к накоплению содержания $C_{орг}$ в слое 0-40 см (запасы относительно контрольного варианта возросли на 17-46 %) (табл. 1). Максимальная насыщенность пашни удобрениями «навоз 20 т/га в год + NPK экв. навозу» способствовала достоверному увеличению количества $C_{орг}$ в слое 0-60 см. В результате запасы $C_{орг}$ в слое 0-100 см повысились на 40%. Углерод, накопленный в глубинных слоях почвы, будет храниться более длительно, т.е. находиться на депонировании.

Таблица 1 - Изменение содержания $C_{орг}$ по профилю почвы при длительном применении различных систем удобрения (VI ротация, 2016-2017 гг.) *(опыт 1)*

Вариант	Содержание $C_{орг}$, %					Запасы $C_{орг}$, т/га		
	0-20	20-40	40-60	60- 80	80-100	0-20	0-40	0-100
Без удобрений	1,15	0,58	0,38	0,36	0,34	30	46	79
Навоз 10 т/га	1,33	0,72	0,33	0,22	0,22	35	54	78
Навоз 20 т/га	1,41	0,81	0,39	0,20	0,20	37	59	82
NPK экв. 10 т навоза	1,26	0,59	0,41	0,20	0,16	33	49	72
NPK экв. 20 т навоза	1,31	0,61	0,39	0,35	0,41	34	51	86
Навоз 5 т+NPK экв.	1,30	0,83	0,43	0,21	0,09	34	56	78
Навоз 10 т + NPK экв.	1,38	0,84	0,36	0,24	0,29	36	59	86
Навоз 20 т + NPK экв.	1,53	1,00	0,69	0,40	0,36	40	67	111
$НСР_{05}$	0,15	0,12	0,21	$F_ф<F_т$	$F_ф<F_т$	4	7	10

В *опыте 2* изучали влияние на режим ОВ почвы видов, доз и соотношений минеральных удобрений. Установлено, что длительное применение азотных удобрений в чистом виде (N_{90}) привело к уменьшению содержания $C_{орг}$ в пахотном слое почвы относительно исходного уровня на 14 % (рис. 3). Максимальные потери произошли в I ротации севооборота.

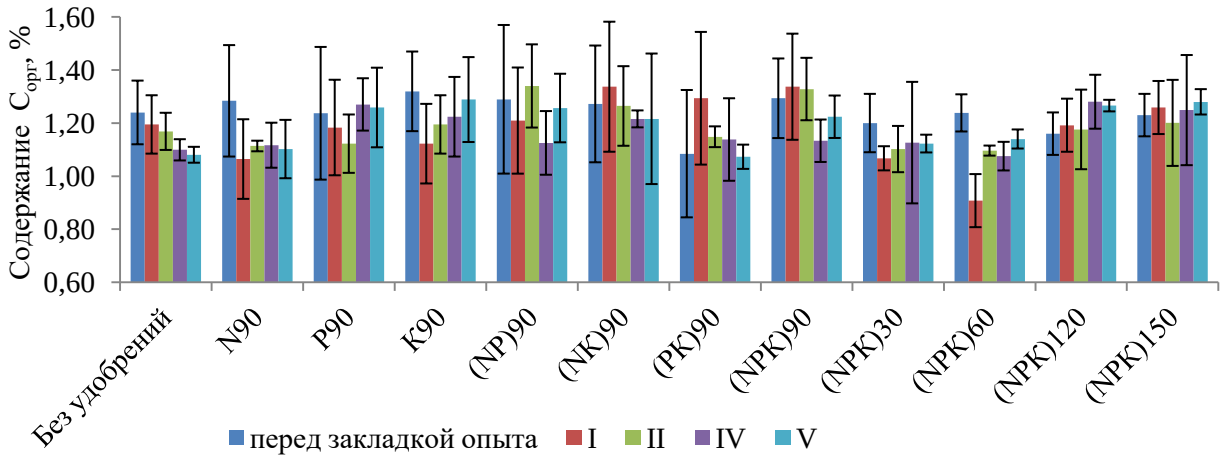


Рисунок 3 – Изменение содержания $C_{орг}$ в пахотном слое почвы (0-20 см) при длительном применении минеральных удобрений (среднее по двум закладкам, I-V ротации, 1978-2019 гг.), % (*опыт 2*)

Применение фосфорных и калийных удобрений в чистом виде (P_{90}, K_{90}) в первые ротации привело к уменьшению содержания $C_{орг}$. Однако в IV-V ротациях выявлено небольшое увеличение или выравнивание с исходным уровнем. Возможно, улучшение калийного и фосфатного питания растений повлияло на количество и качество послеуборочных остатков, поступающих в почву. Также при бездефицитном калийном балансе в почве значительно увеличивается количество фиксированного аммония (Якименко, 2011, 2012). Закрепление в почве соединений азота может способствовать поддержанию $C_{орг}$ на исходном уровне.

При внесении $(NK)_{90}$, $(PK)_{90}$, $(NP)_{90}$ и полного минерального удобрения $(NPK)_{90}$ наблюдали существенное варьирование содержания $C_{орг}$ по ротациям. Тренд изменения количества $C_{орг}$ – циклически-флуктуационный.

При внесении возрастающих доз $(NPK)_{30\text{-}150}$ поддержание содержания $C_{орг}$ на исходном уровне отмечено только при использовании высоких доз $(NPK)_{120}$ и $(NPK)_{150}$. При более низких дозах выявлена тенденция к уменьшению количества $C_{орг}$ в почве.

Установлено, что длительное применение азотных удобрений в чистом виде, получение высоких урожаев культур в данном варианте при сохранении количества $C_{орг}$ в пахотном слое на относительно стабильном уровне в течение последних ротаций севооборота, привели к истощению нижележащих слоев почвы (табл. 2). Отмечено достоверное уменьшение содержания $C_{орг}$ в слоях почвы – 20-40 и 40-60 см, в результате запасы $C_{орг}$ в слое 0-40 см уменьшились с 50 до 37 т/га и в слое 0-100 см с 77 до 56 т/га.

При внесении калия хлористого (K_{90}) в чистом виде, а также сочетании $(NK)_{90}$ отмечается тенденция увеличения $C_{орг}$ в метровом слое почвы. Запасы $C_{орг}$ в слое 0-100 см в данных вариантах возросли на 40 %. Полученные результаты могут быть связаны с взаимодействием хлорид-ионов с ОВ почвы (Водяницкий, Макаров, 2017). При внесении полного минерального удобрения $(NPK)_{90}$ не наблюдается значимого увеличения по профилю почвы $C_{орг}$,

возможно внесение суперфосфата способствует стабилизации содержания $C_{орг}$ в почве.

Таблица 2 - Изменение содержания $C_{орг}$ по профилю почвы при длительном применении минеральных удобрений (VI ротация, 2021 г.) *(опыт 2)*

Вариант	Содержание $C_{орг}$, %					Запасы $C_{орг}$, т/га		
	0-20	20-40	40-60	60- 80	80-100	0-20	0-40	0-100
Без удобрений	1,12	0,76	0,42	0,28	0,19	29	50	77
N_{90}	1,10	0,30	0,24	0,24	0,15	29	37	56
P_{90}	1,20	0,65	0,33	0,25	0,16	31	49	71
K_{90}	1,38	0,81	0,57	0,59	0,50	36	59	110
$(NP)_{90}$	1,29	0,78	0,49	0,46	0,38	34	55	96
$(NK)_{90}$	1,28	1,07	0,58	0,49	0,46	33	62	109
$(PK)_{90}$	1,07	0,76	0,58	0,57	0,41	28	49	96
$(NPK)_{90}$	1,33	0,86	0,57	0,45	0,36	34	58	99
$(NPK)_{30}$	1,13	0,57	0,55	0,44	0,32	29	45	85
$(NPK)_{60}$	1,21	0,80	0,39	0,32	0,26	32	53	82
$(NPK)_{120}$	1,34	0,71	0,52	0,34	0,29	35	54	89
$(NPK)_{150}$	1,37	0,80	0,44	0,33	0,32	36	57	91
$НСР_{05}$	0,19	0,23	0,18	0,20	0,30	5	9	31

В *опыте 3* изучали влияние на режим ОВ почвы нетрадиционного органического удобрения – ОСВ. Применение ОСВ в дозе 40 т/га (насыщенность 5,7 т/га в год) позволило поддерживать содержание $C_{орг}$ в почве на исходном уровне (рис. 4). Внесение навоза КРС 40 т/га замедлило процесс потери ОВ в почве. Более существенное влияние в опыте ОСВ, чем навоза, на содержание ОВ почвы связано с качеством поступающего органического материала.

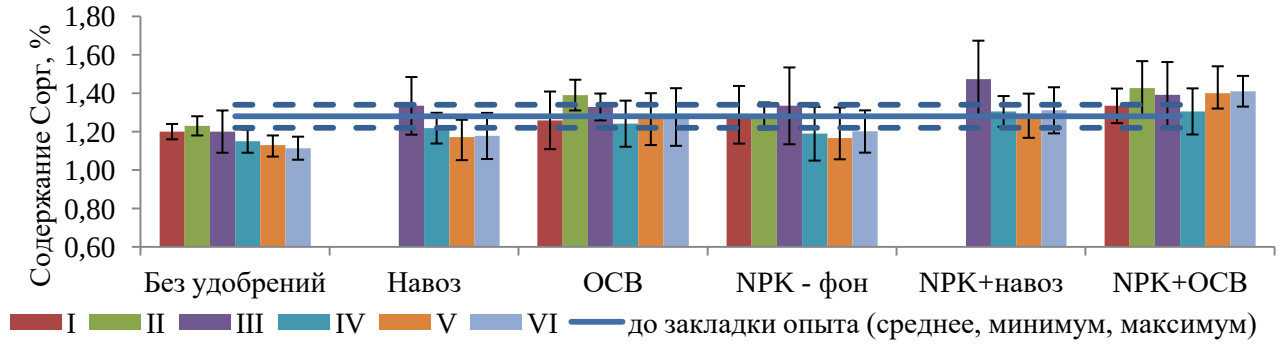


Рисунок 4 – Изменение содержания $C_{орг}$ в почве (0-20 см) при длительном применении ОСВ (I-VI ротации, 1976-2018 гг.), % *(опыт 3)*

Длительное внесение ОСВ по фону минеральных удобрений достоверно повысило содержание $C_{орг}$ в пахотном и подпахотном слоях почвы. Запасы $C_{орг}$ в слое почвы 0-40 см возросли на 30% (к фону).

3.2 Аккумуляция атмосферного углерода полевыми культурами, почвенная секвестрация при использовании различных систем удобрения и углеродпротекторная емкость почвы. Расчетные данные (*опыты 1-3*) показали, что культуры полевых севооборотов без применения удобрений в среднем в год (вегетационный период) поглощали из атмосферы в процессе фотосинтеза 9,7-10,7 т/га углекислого газа (CO_2) или 2,7-2,9 т С/га. Накопление

углерода в биомассе растений в результате применения удобрений увеличивалось на 9-31%.

Максимальное накопление углерода в растительной биомассе (основная, побочная продукция и пожнивно-корневые остатки) в опытах отмечено у озимой ржи (3,43-5,68 т/га), минимальное у картофеля (2,05-2,98 т/га). Аккумуляция углерода в растениях яровой пшеницы, ячменя и овса варьировала в зависимости от применяемых удобрений от 2,40 до 4,59, от 3,18 до 4,24 и 2,31 до 4,62 т/га, соответственно. Накопление углерода в растениях клевера 1 г.п. составило 3,06-4,60 т/га, 2 г.п. -2,90-3,68 т/га. Основная часть углерода отчуждалась с основной и побочной продукцией сельскохозяйственных культур. Доля накопления углерода в зерне и соломе зерновых культур в зависимости от применяемых удобрений в опытах варьировала от 65 до 79 %, в клубнях картофеля составила 70-76 %, сене клевера – 41-56 %. Основной источник поступления углерода в пахотные почвы – пожнивно-корневые остатки (ПКО) полевых культур. Количество привносимого в почву углерода с ПКО убывало в ряду клевер луговой (1,70-2,01 т С/га) > озимая рожь (1,15-1,42 т С/га) > ячмень (0,97-1,23 т С/га) > яровая пшеница и овес (0,77-1,12 и 0,75-1,17 т С/га, соответственно) > картофель (0,61-0,88 т С/га). В сумме за два года с ПКО клевера в почву поступало от 2,86 до 3,85 т С/га. Всего с ПКО полевых культур за ротацию восьмипольного севооборота в почву поступало от 8,2 до 9,0 т С/га, семипольного севооборота - от 7,4 до 8,4 т С/га. При этом считается, что 90% первичного ОВ, поступившего в почву, минерализуется и возвращается в атмосферу (Körschens, 2018).

Оценку накопления углерода в почве проводили двумя способами - по изменению запасов $C_{орг}$ в метровом слое почвы и по балансу. Результаты опытов *1-3* показали, что максимальная почвенная секвестрация CO_2 происходила в условиях полевого восьмипольного севооборота при использовании навоза 20 т/га в год и экв. количества NPK, в условиях полевого семипольного севооборота - применении ОСВ по фону NPK. Здесь можно говорить о депонировании (накоплении в глубинных горизонтах и длительном хранении) углерода в ОВ почвы. По мнению некоторых ученых секвестрация $C_{орг}$ в почве требует определенного срока (~100 лет), чтобы повышение его содержания можно было считать устойчивым по сравнению с исходным (Stockmann, 2013).

Углеродпротекторная емкость пахотных дерново-подзолистых тяжелосуглинистых почв в *опытах 1-3* варьировала от 27 до 33 г С/кг (или 70-84 т/га) и существенно не зависела от применяемых видов, доз (насыщенности) удобрений. Насыщенность пахотного слоя почвы $C_{орг}$ при экстенсивном возделывании сельскохозяйственных культур составила 35-40%. Наибольшая насыщенность $C_{орг}$ (50-52%) отмечена при применении навоза 20 т/га в год + NPK экв. навозу и внесении ОСВ по фону NPK. Пахотные дерново-подзолистые тяжелосуглинистые почвы обладают высоким потенциалом для секвестрации атмосферного углерода, его накопления и депонирования в почве.

3.3 Элементный состав и структура гуминовых кислот дерново-подзолистой почвы. По данным элементного состава и ИК- спектроскопии препаративно выделенных гуминовых кислот пахотных почв в *опытах 1-3* установлено, что невысокое насыщение пашни навозом КРС 5,7 т/га в год привело к накоплению и формированию компонентов ОВ с более разветвлённой алифатической структурой, что говорит о его большей подвижности и доступности. Насыщенность пашни навозом 10 т/га в год способствовала повышению доли ароматических фрагментов, что свидетельствует о более глубоких процессах гумификации ОВ. При внесении минеральных удобрений (NPK) отмечено преобладание структурных фрагментов алифатической природы. Однако при длительном внесении высокой дозы $(NPK)_{150}$ состав ОВ характеризуется бóльшим количеством ароматических компонентов, что может быть обусловлено снижением темпов минерализации ОВ. Применение навоза, ОСВ способствовало накоплению и формированию органического вещества, обогащенного азотом. Сравнение использования ОСВ и навоза показало, что при внесении ОСВ в составе ОВ наблюдали более высокое содержание ароматических фрагментов, что может быть связано со свойствами поступающего органического материала.

4 Азотный режим дерново-подзолистой почвы при длительном сельскохозяйственном использовании пашни и применении удобрений

Содержание общего азота ($N_{общ}$) в целинной почве в слое 0-20 см составило 1490 (±130) мг/кг. Степень обогащённости ОВ азотом высокая: C:N – 8. Запасы $N_{общ}$ в верхнем слое составили 3,4 т/га (почти 40 % от его запасов в метровом слое). Большая часть общих запасов азота целинной почвы (74 %) представлена негидролизуемой фракцией ($N_{нг)}$ (более стойкие к гидролизу и микробиологическому разложению органические азотсодержащие соединения, необменный аммоний). Трудногидролизуемая фракция ($N_{тг}$) составила 17 %, легкогидролизуемая ($N_{лг}$) – 8 %, минеральная ($N_{мин}$) - всего 1 %. Суммарное содержание $N_{лг}$ и $N_{тг}$ представляет собой гидролизуемый азот почвы - источник пополнения запасов его минеральных форм.

Изучение азотного режима почвы в звене севооборота «клевер луговой 2 г.п. – ячмень – картофель – овёс» показало, что изменение содержания $N_{общ}$ и его фракционного состава зависело от возделываемой культуры. Максимальное количество $N_{общ}$ в пахотном слое отмечено под клевером. Поступление ОВ с пожнивно-корневыми остатками, а также отсутствие механизированной обработки почвы в течение двух лет способствовало поддержанию и стабилизации азотного режима, содержание $N_{общ}$ и соотношение его фракций в почве было наиболее близким к целинному аналогу. Распашка пласта клевера и возделывание последующих культур привели к уменьшению содержания $N_{общ}$ в почве (за счет фракции негидролизуемого азота). В итоге его количество на конец ротации полевого севооборота в слое 0-20 см при экстенсивном возделывании сельскохозяйственных культур было на 18-23 % ниже, чем в целинной почве. Запасы $N_{общ}$ уменьшились на 0,3-0,5 т/га (луг – 3,4 т/га). При этом наблюдали снижение обогащённости ОВ азотом (C:N – 10). Изменения в

пахотной почве связаны с выносом азота, минерализацией ОВ, припахиванием нижележащего горизонта. Общее содержание азота было минимальным в бессменном чистом пару – 980 (±90) мг/кг. Запасы относительно целинного аналога уменьшились на 0,9 т.

Содержание $N_{общ}$ и всех его фракций вниз по профилю почвы постепенно уменьшалось, как в пахотной, так и целинной почве. Длительное экстенсивное возделывание культур привело к повышению подвижности азотного фонда в метровом слое почвы. В сравнении с целинным аналогом наблюдали уменьшение доли негидролизуемой фракции (0-20 см - в среднем с 74 до 68 %; 80-100 см - с 63 до 51%), увеличение доли гидролизуемой (0-20 см - с 25 до 29 %; 80-100 см - с 36 до 47%) и минеральной фракций. При внесении удобрений отмечено, как сдерживание данных процессов, так и усиление.

В *опыте 1* умеренная насыщенность пашни удобрениями (навоз 10 т/га в год; NPK экв. 10 т навоза; навоз 5 т/га + NPK экв. навозу) способствовала увеличению в пахотном слое почвы содержания доступных для растений форм азота ($N_{лг}$ и $N_{мин}$) относительно контрольного варианта в 1,1-1,4 раза. В вариантах с более высокой насыщенностью пашни удобрениями (навоз 20 т/га в год, NPK экв. 20 т навоза, навоз 10 и 20 т/га в год + NPK экв. навозу) отмечено достоверное повышение в почве $N_{общ}$ и всех его фракций (в 1,1-1,6 раза) (табл. 3). Запасы $N_{общ}$ в пахотном слое почвы возросли на 0,5-1,2 т/га. Интенсивность баланса азота в данных вариантах составила 113-193 %.

Таблица 3 - Влияние длительного применения различных систем удобрений на азотный режим почвы (0-20 см) (VI ротация, 2016-2017 гг.) *(опыт 1)*

Вариант	Содержание, мг/кг					Запасы, т/га					C:N
	$N_{общ}$	$N_{нг}$	$N_{тг}$	$N_{лг}$	$N_{мин}$	$N_{общ}$	$N_{нг}$	$N_{тг}$	$N_{лг}$	$N_{мин}$	
Без удобрений	1220	824	236	152	8	3,1	2,1	0,6	0,4	0,02	9
Навоз 10 т/га	1331	818	317	187	9	3,3	2,1	0,8	0,5	0,02	10
Навоз 20 т/га	1413	911	293	199	11	3,7	2,4	0,8	0,5	0,03	10
NPK экв. 10 т навоза	1235	818	201	206	10	3,1	2,1	0,5	0,5	0,02	10
NPK экв. 20 т навоза	1390	883	314	183	10	3,6	2,3	0,8	0,5	0,03	9
Навоз 5 т+NPK экв.	1301	809	279	204	9	3,3	2,1	0,7	0,5	0,02	10
Навоз 10 т + NPK экв.	1555	1027	314	205	10	4,0	2,7	0,8	0,5	0,02	9
Навоз 20 т + NPK экв.	1653	1024	372	244	12	4,3	2,7	1,0	0,6	0,03	9
$НСР_{05}$	168	59	57	30	2	0,4	0,2	0,1	0,1	0,01	-

Длительное применение различных систем удобрения оказало влияние на накопление $N_{мин}$ (сумма нитратного и аммонийного азота) по профилю почвы (VI ротация, 2016-2017 гг.). Практически во всех вариантах отмечено достоверное увеличение $N_{мин}$ в верхнем слое почвы 0-40 см и в слое 80-100 см. Повышение минерального азота по всему метровому слою почвы в 1,3-2,0 раза отмечено при максимальной насыщенности пашни удобрениями (навоз 20 т/га + NPK экв. навозу). Запасы в слое почвы 0-100 см увеличились со 179 (контроль) до 289 кг/га.

Результаты *опыта 2* показали, что длительное применение азотных удобрений (N_{90}, $(NK)_{90}$, $(NP)_{90}$, $(NPK)_{90}$) привело к увеличению относительно контрольного варианта общего содержания азота в почве на 10-25 % и его

отдельных фракций – в 1,3-2,7 раза (табл. 4). В данных вариантах существенно возросла доля минерального азота в составе общего (с 1-2 до 3-6%). Максимальное увеличение содержания $N_{общ}$ отмечено при длительном внесении полного минерального удобрения $(NPK)_{90}$.

Содержание $N_{общ}$ (за счёт негидролизуемой фракции) было достоверно выше контроля (на 12 %) при длительном внесении K_{90}. В состав $N_{нг}$ входит необменный аммоний. Известно, что высокое содержание калия в почве может приводить к блокированию потребления фиксированного аммония.

Таблица 4 - Влияние длительного применения минеральных удобрений на азотный режим почвы (0-20 см) (V ротация, 2016-2018 гг.) *(опыт 2)*

Вариант	Содержание, мг/кг					Запасы, т/га					C:N
	$N_{общ}$	$N_{нг}$	$N_{тг}$	$N_{лг}$	$N_{мин}$	$N_{общ}$	$N_{нг}$	$N_{тг}$	$N_{лг}$	$N_{мин}$	
Без удобрений	1148	757	225	139	27	3,0	2,0	0,6	0,4	0,07	10
N_{90}	1323	856	231	178	58	3,3	2,2	0,6	0,5	0,15	8
P_{90}	1255	808	259	162	26	3,2	2,1	0,7	0,4	0,07	10
K_{90}	1283	915	202	148	18	3,3	2,4	0,5	0,4	0,05	10
$(NP)_{90}$	1267	829	221	145	72	3,3	2,2	0,6	0,4	0,19	10
$(NK)_{90}$	1330	875	242	169	45	3,4	2,3	0,6	0,4	0,12	9
$(PK)_{90}$	1071	682	239	125	25	2,8	1,8	0,6	0,3	0,07	10
$(NPK)_{90}$	1432	969	237	158	68	3,6	2,5	0,6	0,4	0,18	8
$НСР_{05}$	119	113	Фф<Фт	Фф<Фт	18	0,3	0,2	Фф<Фт	Фф<Фт	0,05	-

Длительное использование азотных удобрений (N_{90}, $(NK)_{90}$, $(NP)_{90}$, $(NPK)_{90}$) повлияло на накопление минерального азота (сумма нитратного и аммонийного азота) по профилю почвы (рис. 5). Запасы увеличились в слое 0-20 см с 27 до 48-78 кг/га и в слое 0-100 см с 89 до 177-242 кг/га (в 2-3 раза). При этом различное сочетание N, P, K по-разному влияло на количественные изменения и глубину миграции $N_{мин}$ в метровом слое.

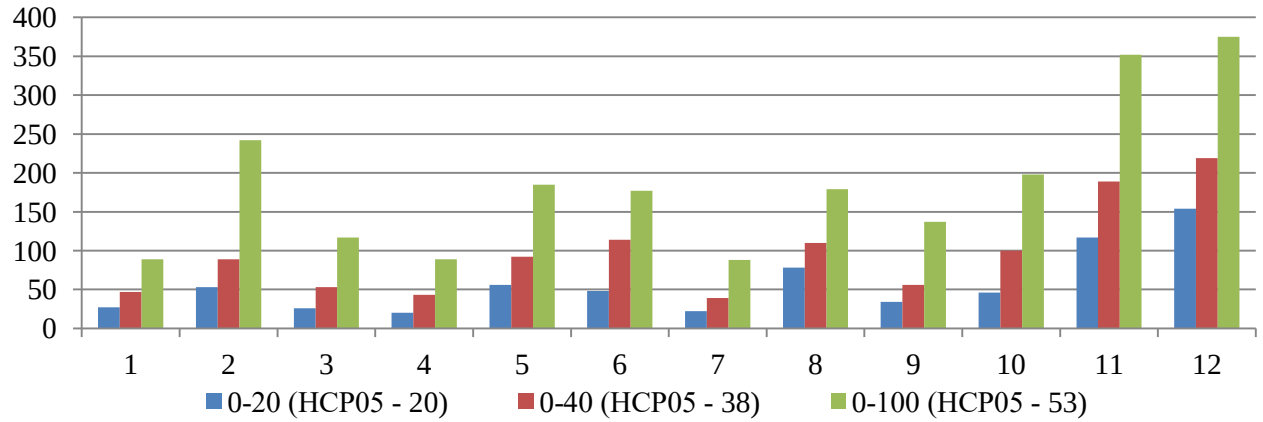


Рисунок 5 - Запасы минерального азота по слоям почвы, кг/га (VI ротация, 2021 г.) *(опыт 2)*, 1-12 – варианты опыта (в соответствии со схемой)

Применение возрастающих доз NPK от 60 до 150 кг д.в. каждого элемента питания на гектар способствовало достоверному увеличению относительно контрольного варианта в пахотном слое почвы содержания $N_{общ}$ (в 1,2-1,6 раза) и всех его фракций (в 1,2-5,3 раза). Максимальное накопление $N_{общ}$ (1760 мг/кг) отмечено в варианте $(NPK)_{150}$. Степень обогащенности азотом

ОВ в вариантах $(NPK)_{90-150}$ высокая C:N - 6-8 (без удобрений - 10). При применении высоких доз $(NPK)_{120-150}$ происходит избыточное накопление нитратов и обменного аммония по профилю почвы, что может привести к загрязнению сопредельных сред.

В *опыте 3* при длительном внесении ОСВ (насыщенность 5,7 т/га в год) в течение пяти ротаций полевого севооборота содержание $N_{общ}$ в пахотном слое почвы было на 20 % выше контрольного варианта (1176 мг/кг), его фракций в 1,1-1,7 раза. Достоверных изменений изучаемых показателей в более глубоких слоях почвы не выявлено. При внесении навоза (насыщенность 5,7 т/га в год) наблюдали тенденции к уменьшению содержания $N_{общ}$ в отдельных слоях почвы. Интенсивность баланса азота при использовании ОСВ и навоза составила 71 и 68 %, соответственно. ОСВ имеют сложный неоднородный состав, возможно при его использовании в почву поступило больше азота, чем показывают расчетные данные. Внесение минеральных удобрений обеспечило относительно контрольного варианта увеличение на 10-25 % содержания $N_{общ}$ в слое 0-40 см, $N_{лг}$ и $N_{мин}$ в метровом слое почвы (в 1,1-2,1 раза). Эффективность применения ОСВ и навоза на показатели азотного режима почвы возросла на фоне NPK.

Поддержание содержания (запасов) $N_{общ}$ в почве (0-20 см) на уровне целинного аналога (или выше) наблюдали в результате применения навоза 20 т/га в год, NPK экв. 20 т навоза, навоза 10 и 20 т/га + NPK экв. навозу, внесении $(NPK)_{90-150}$, использовании ОСВ. Интенсивность баланса в вариантах N_{90}, $(NK)_{90}$, $(NP)_{90}$, $(NPK)_{90}$ была одинаковой - 95-97 %, при этом сохранение содержания $N_{общ}$ в почве на уровне целинного аналога наблюдали только при использовании полного минерального удобрения.

5 Фосфатный режим дерново-подзолистой почвы при длительном сельскохозяйственном использовании пашни и применении удобрений

5.1 Содержание общего фосфора, его органических, минеральных и подвижных соединений. Общее содержание фосфора ($P_{общ}$) в целинной почве в слое 0-20 см составило 1350 (±36) мг/кг (625 мг/кг – органические; 725 мг/кг – минеральные соединения). При длительном экстенсивном возделывании культур его количество было ниже на 17-42 %, в основном отмечено уменьшение органической части фосфора. Общие запасы фосфора в слое 0-20 см уменьшились с 3,1 (луг) до 2,0-2,8 т/га, органического с 1,4 до 0,8-1,1 т/га. Доля органического ($P_{орг}$) и минерального ($P_{мин}$) фосфора в среднем составила в целинной почве - 46 и 54 %, при длительном экстенсивном использовании пашни - 37 и 63%, соответственно. Минимальная доля $P_{орг}$ отмечена в почве бессменного чистого пара – 25 % (0-20 см). В целинной почве выявлена очень высокая корреляционная связь между $P_{общ}$ и $P_{орг}$ (r=0,96). Экстенсивное возделывание культур изменило данную зависимость, установлена только прямая корреляционная связь средней силы для $P_{общ}$ и $P_{мин}$ (r=0,59).

Содержание подвижных соединений фосфора ($P_{подв}$) в верхнем слое почвы (0-20 см) под лугом составило 290 (±31) мг/кг. В пахотной почве (без

удобрений) количество $P_{подв}$ было ниже в 1,3-1,6 раза, запасы уменьшились с 0,7 (луг) до 0,3-0,5 т/га.

В целинной почве распределение общего фосфора в глубь по профилю убывающее. Доля $P_{орг}$ начиная с горизонта B_1 (28-76 см) не превышала 10 % от валового количества. Содержание $P_{подв}$ с глубиной возрастало. Общие запасы фосфора, его минеральных и органических соединений в пахотной почве в вариантах без удобрений были меньше относительно целинного аналога на 10-35 % в слое 0-40 см. Уменьшение $P_{подв}$ в почве при экстенсивном возделывании сельскохозяйственных культур наблюдали в слое 0-80 см, что обусловлено выносом растениями и вероятно изменением режима кислотности почвы. Запасы подвижного фосфора по Кирсанову в метровом слое почвы были меньше относительно целинного аналога на 0,6-0,8 т/га (луг – 3,9 т/га). Выявлено уменьшение доли $P_{подв}$ от его валового количества в метровом слое почвы: слой 0-20 см с 22 (луг) до 16 %, слой 80-100 см с 47 до 35-40 %.

За время проведения длительных опытов (35-50 лет) количество $P_{подв}$ в пахотном слое контрольных вариантов от исходного уровня уменьшилось незначительно. При сложившемся высоком отрицательном балансе данного элемента за пять-шесть ротаций севооборотов (минус 600-970 кг/га) запасы $P_{подв}$ в почве уменьшились всего на 30-125 кг. Исследуемая почва способна поддерживать определённый уровень подвижных соединений за счёт других форм, нижележащих горизонтов и материнской породы.

В *опыте 1* общее содержание фосфора в пахотном слое почвы при длительном применении органической, минеральной и органоминеральной систем удобрения было выше контрольного варианта на 30-75% (табл. 5). Во всех вариантах отмечено достоверно более высокое количество $P_{мин}$. Повышение $P_{орг}$ наблюдали только при более высокой насыщенности пашни удобрениями – в вариантах «навоз 20 т/га в год», «NPK экв. 20 т навоза», «навоз 10 и 20 т/га + NPK экв. навозу» (в 1,4-1,9 раза). При использовании систем удобрения «навоз 10 и 20 т/га + NPK экв. навозу» отмечено накопление органофосфатов и в подпахотном слое.

Общее содержание фосфора в почве было выше контрольного варианта в основном в слое 0-40 см при умеренной насыщенности пашни удобрениями, в слое 0-60 см - при более высокой насыщенности. Увеличение $P_{общ}$ в слое 40-60 см происходило только за счёт его минеральной части. Общие запасы фосфора в почве во всех вариантах были выше контрольного в слое 0-20 см - на 28-76 %, в слое 0-40 см – на 25-67 % (контрольный вариант – 2,5 и 4,8 т/га).

Содержание $P_{подв}$ в почве при длительном применении минеральной и органоминеральной системы удобрений было выше контрольного варианта в слоях 0-40, 0-60 или 0-80 см. Полученные результаты могут быть связаны с повышением уровня кислотности почвы в результате применения азотных удобрений. Использование органической системы удобрения привело к увеличению содержания в почве $P_{подв}$ только в пахотном слое (0-20 см).

В *опыте 2* длительное внесение суперфосфата (P_{90}, $(PK)_{90}$, $(NP)_{90}$, $(NPK)_{90}$) способствовало увеличению $P_{общ}$ и его минеральной части

(относительно контрольного варианта) в пахотном слое почвы в 1,3-1,8 раза (табл. 6). При внесении $(PK)_{90}$ накопление $P_{общ}$ и его минеральной части было менее существенным. При этом баланс фосфора в данных вариантах был примерно одинаковым (29-34 кг/га в год).

Внесение суперфосфата (P_{90}, $(PK)_{90}$, $(NP)_{90}$, $(NPK)_{90}$) привело к повышению содержания $P_{подв}$ на начало VI ротации севооборота в слое 0-20 см относительно исходного уровня в 1,9-2,7 раза. Различное сочетание P с N и K влияло на изменение его количества по профилю. Содержание $P_{подв}$ в почве было достоверно выше контрольного варианта при длительном применении $(NP)_{90}$ только в слое 0-20 см, P_{90} - в слое 0-60 см, $(NPK)_{90}$ - в слое 0-80 см и $(PK)_{90}$ - в слое 0-100 см. Запасы в метровом слое почвы в данных вариантах были выше контрольного в 1,4-1,5 раза (контроль – 3,3 т/га). Полученные результаты свидетельствуют о том, что калий хлористый в сочетании с суперфосфатом способствует миграции фосфора из удобрений по профилю и/или замещению фосфора из его труднодоступных соединений.

Применение азотных удобрений и калия хлористого (N_{90}, $(NK)_{90}$, $(NPK)_{90}$) обеспечивает обогащение почвы $P_{орг}$. В варианте $(NK)_{90}$ запасы $P_{орг}$ в слое 0-20 см составили 1,9 т/га (луг – 1,4 т/га). При внесении N_{90}, K_{90}, $(NK)_{90}$ не наблюдали уменьшения $P_{общ}$ в почве относительно контрольного варианта. В данных вариантах, как и в контрольном, баланс изучаемого элемента составил минус 23-25 кг/га в год.

Длительное применение азотных и калийных удобрений (N_{90}, K_{90}, $(NK)_{90}$) с течением времени привело к увеличению в пахотном слое почвы количества $P_{подв}$. В вариантах N_{90} и $(NK)_{90}$ в первые две ротации севооборота наблюдали тенденции к уменьшению содержания $P_{подв}$ в почве на 10-35 % (относительно исходного уровня) (рис. 6). В IV-VI ротациях отмечено увеличение $P_{подв}$ в почве до исходного уровня или его превышение на 23-44 %. В варианте K_{90} наблюдали в I и II ротациях сохранение содержания $P_{подв}$ на исходном уровне, в IV-VI ротациях отмечены тенденции к увеличению в 1,5-1,7 раза. При использовании азотных удобрений это может быть связано с подкислением почвы. При применении калийных удобрений - в результате вытеснения фосфора с занимаемых им позиций в ППК ионами калия или хлора. Также возможен перенос фосфора растениями и его потребление из нижележащих слоёв. В вариантах N_{90} и $(NK)_{90}$ отмечено достоверное уменьшение количества $P_{подв}$ в подпахотном слое (20-40 см) на 27-34 %.

Общее содержания фосфора в пахотном слое почвы при длительном применении $(NPK)_{30\text{-}150}$ было выше контрольного варианта в 1,1-1,6 раза, его подвижной части относительно исходного уровня (на начало VI ротации) - в 1,6-3,1 раза. Увеличение происходило прямо пропорционально повышению дозы удобрений. Количество $P_{подв}$ в почве при применении $(NPK)_{90\text{-}150}$ было выше контрольного варианта в слое 0-80 см.

В *опыте 3* при длительном использовании ОСВ содержание $P_{общ}$ в почве было выше контрольного варианта в 1,1-1,4 раза по всему метровому слою, в основном за счёт его минеральной части.

Таблица 5 - Влияние длительного применения различных систем удобрения на фосфатный режим почвы (VI ротация, среднее по двум закладкам, 2016-2017 гг.) *(опыт 1)*

Вариант	Содержание фосфора, мг/кг																			
	общий					минеральный					органический					подвижный				
	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100
Без удобрений	960	850	800	950	850	660	625	700	850	775	300	225	100	100	75	153	180	203	267	300
Навоз 10 т/га	1240	1075	900	960	1000	890	775	740	740	850	350	300	160	220	150	220	221	229	254	343
Навоз 20 т/га	1350	960	1000	815	960	900	700	775	815	925	450	260	225	0	35	272	203	215	235	284
NPK экв. 10 т навоза	1250	1000	950	1075	700	850	700	850	850	700	400	300	100	225	0	216	230	229	229	242
NPK экв. 20 т навоза	1375	1000	1000	950	850	910	850	850	700	775	465	150	150	250	75	245	320	300	250	291
Навоз 5 т+NPK экв.	1400	1150	1000	1000	900	1040	850	850	975	800	360	300	150	25	100	227	283	241	286	256
Навоз 10 т + NPK экв.	1340	1400	1000	925	900	925	925	810	775	850	415	475	190	150	50	269	261	213	258	232
Навоз 20 т + NPK экв.	1675	1360	1010	1000	950	1110	960	815	815	815	565	400	195	185	135	472	335	320	320	270
НСР $_{05}$	180	205	195	Фф<Ft	Фф<Ft	125	140	105	Фф<Ft	Фф<Ft	150	150	Фф<Ft	Фф<Ft	Фф<Ft	30	43	74	51	Фф<Ft

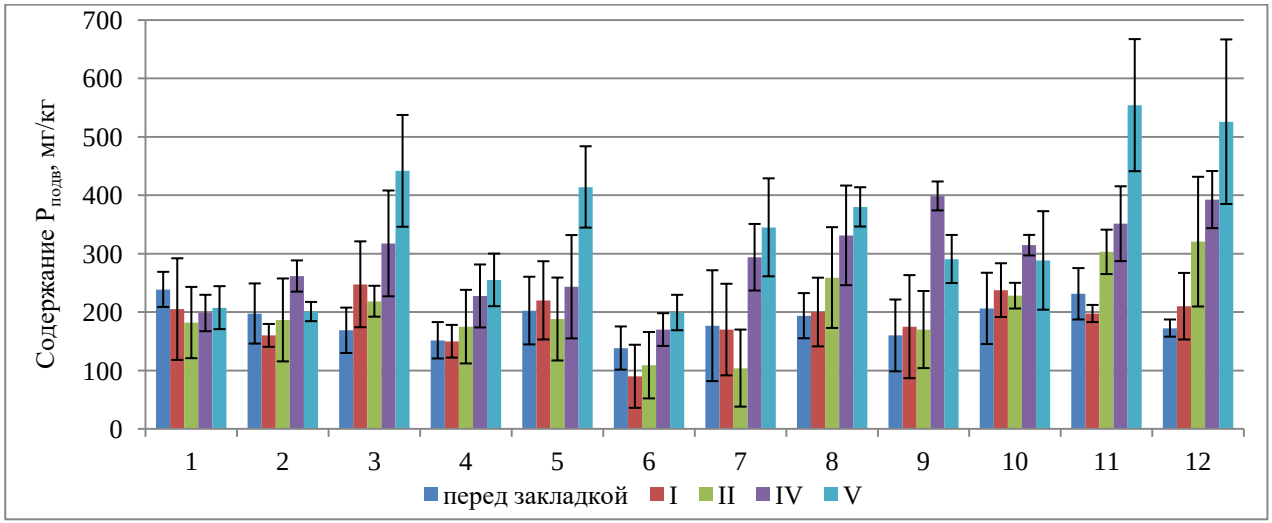


Рисунок 6 - Изменение содержания подвижных соединений фосфора в почве (0-20 см) при длительном применении минеральных удобрений (среднее по двум закладкам, 1978-2019 гг.), мг/кг *(опыт 2)*, 1-12 – варианты опыта (в соответствии со схемой).

Таблица 6 - Изменение показателей фосфатного режима почвы при длительном применении минеральных удобрений, 0-20 см (V ротация, 2016-2018 гг.) *(опыт 2)*

Вариант	Содержание, мг/кг			Запасы, т/га		
	$P_{общ}$	$P_{мин}$	$P_{орг}$	$P_{общ}$	$P_{мин}$	$P_{орг}$
Без удобрений	1120	700	420	2,9	1,8	1,1
N_{90}	1200	615	585	3,1	1,6	1,5
P_{90}	1720	1240	480	4,5	3,2	1,2
K_{90}	1305	880	425	3,4	2,3	1,1
$(NP)_{90}$	1810	1245	565	4,7	3,2	1,5
$(NK)_{90}$	1330	610	720	3,5	1,6	1,9
$(PK)_{90}$	1430	960	470	3,7	2,5	1,2
$(NPK)_{90}$	1745	1120	625	4,5	2,9	1,6
$НСР_{05}$	305	210	200	0,8	0,5	0,5

Количество $P_{орг}$ при внесении ОСВ было выше контроля только в пахотном слое почвы (на 27 %). Увеличение содержания $P_{подв}$ наблюдали до глубины 60 см – в 1,3-1,9 раза. ОСВ содержат значительное количество фосфора, и поэтому их можно рассматривать, как возможный альтернативный источник данного элемента. Влияние ОСВ на фосфатный режим почвы возросло на фоне минеральных удобрений.

Проведенные исследования в *опытах 1,2* показали, что в I ротацию севооборота даже при внесении высоких доз минеральных (NPK) или органических удобрений в почве не наблюдали достоверного повышения $P_{подв}$, т.к. в почве происходило его быстрое закрепление. Поддержание $P_{подв}$ на исходном уровне, либо его увеличение наблюдали со II, III или IV ротации севооборота, скорость и интенсивность накопления зависели от насыщенности пашни удобрениями, сочетания фосфорных удобрений с азотными и калийными. Рост количества $P_{подв}$ с I ротации севооборота, наблюдали только при внесении суперфосфата в чистом виде. Длительное применение органических и фосфорных удобрений привело к увеличению доли $P_{подв}$ в почве.

Применение фосфорных удобрений (P_{90}, $(PK)_{90}$, $(NP)_{90}$, $(NPK)_{60\text{-}150}$, органических (навоз 10 и 20 т/га в год) удобрений и их сочетание (навоз + NPK, ОСВ+NPK) обеспечило в почве (0-20 см) как минимум поддержание общего содержания (запасов) фосфора в почве на уровне целинного аналога или их существенный рост. Однако увеличение общих запасов в почве происходило в большей степени за счёт его минеральной части. Только при применении навоза 20 т/га в год, навоза 10 и 20 т/га в год + NPK экв. навозу, ОСВ в сочетании с NPK наблюдали поддержание запасов $P_{орг}$ на уровне целинной почвы.

Накопление $P_{общ}$ и его минеральных соединений при длительном внесении удобрений (относительно целинного аналога) наблюдали максимум в слое почвы 0-60 см, органофосфатов в слое 0-40 см. При этом наибольшее закрепление фосфора из удобрений происходило в почве в слое 0-20 см.

5.2 Фракционно-групповой состав минеральных фосфатов почвы. Выявлено, что содержание в почве фракций железофосфатов (Fe–P) и труднорастворимых высокоосновных фосфатов кальция (Ca–P_{III}) в слое 0-20 см при экстенсивном возделывании культур было ниже по сравнению с целинным аналогом в 1,2-1,5 раза. Содержание алюмофосфатов (Al–P) и наиболее доступных для растений фракций фосфатов кальция (Ca–P_I и Ca-P_{II}) в почве варьировало и зависело от возделываемой культуры, интенсивности обработки почвы и проведения известкования (перед закладкой опытов). Сумма минеральных фосфатов в почве без применения удобрений была ниже целинного аналога в 1,3-1,4 раза. Длительное применение удобрений оказало влияние на количественные и качественные изменения минерального состава фосфатов, их переход из одной группы в другую. В почве в результате применения удобрений (*опыты 1-3*) наблюдали относительно контрольного

варианта увеличение доли подвижных фракций фосфатов кальция (сумма Са–$Р_{I}$ и Са-$Р_{II}$). Отмечена тенденция уменьшения доли фракций Fe–P и Са–$Р_{III}$.

6 Калийный режим дерново-подзолистой почвы при длительном сельскохозяйственном использовании пашни и применении удобрений

Валовое содержание калия ($К_{вал}$) в целинной почве в слое 0-20 см составило 19825 (±700) мг/кг, в пахотной почве (севооборот, без удобрений) его количество было на 13-20 % меньше. Запасы в слое 0-20 см уменьшились с 46 (луг) до 41-43 т/га. Количество легкообменных соединений калия ($К_{л/обм}$) в целинной почве (0-20 см) составило 24,1±4,0, подвижных ($К_{подв}$) - 289±45, необменных ($К_{необм}$)– 830±76 мг/кг или 0,1, 1,5 и 4,2 % от его валового содержания, соответственно. Остальные 94,2 % - калий почвенного скелета. Содержание $К_{вал}$ в почве под лугом с глубиной возрастало, количество $К_{л/обм}$, $К_{подв}$, $К_{необм}$ - уменьшалось. При экстенсивном возделывании культур в почве отмечены тенденции снижения содержания $К_{л/обм}$ и $К_{подв}$ в метровом слое - в 1,6-9,7 и 1,1-2,4 раза, соответственно. Запасы легкообменной формы калия уменьшились в метровом слое с 180 (луг) до 68-114 кг/га. Основные потери запасов подвижной формы калия пришлись на слой 0-20 см - с 0,7 до 0,3-0,4 т/га. Не установлено чётких закономерностей в изменении содержания $К_{необм}$ в пахотном слое почвы, с глубины 20-40 см наблюдали увеличение относительно целинного аналога в 1,1-2,3 раза.

Распределение $К_{вал}$ по профилю при бессменном паровании отличалось от целинной почвы. Содержание $К_{вал}$ было меньше относительно почвы под лугом в слоях 0-20 см и 80-100 см, больше в слое 20-40 см (в 1,1-1,2 раза). Закономерности изменения содержания $К_{необм}$, $К_{подв}$ и $К_{л/обм}$ в почве при бессменном паровании были схожими с пахотной почвой (севооборот, без удобрений). При экстенсивном возделывании культур потери $К_{вал}$ в верхнем слое почвы (0-20 см) были более интенсивными, чем при бессменном паровании, что обусловлено выносом растениями. Полученные результаты по изменению количества различных форм калия в почве связаны с миграцией подвижных соединений калий за пределы метрового слоя, переходом одной формы калия в другую, нельзя исключать генетическую неоднородность. Увеличение количества $К_{необм}$ могло происходить в результате разрушения калийных соединений минерального скелета почвы.

Соотношение $К_{необм}$ к $К_{подв}$ в слое почвы 0-20 см при возделывании культур без применения удобрений и бессменном паровании расширилось с 2,9 (луг) до 3,8-8,1. Увеличение соотношения наблюдали в метровом слое. Это говорит о том, что почва истощена в отношении доступных для растений соединений калия.

Количество $К_{подв}$ за время проведения длительных опытов (35-50 лет) в контрольных вариантах (слой 0-20 см) уменьшилось от исходного уровня на 18-42%. Основные потери $К_{подв}$ наблюдали в первые 7-8 лет, далее происходило поддержание его количества примерно на одном уровне. Расчёты балансов показали, что из почвы за время проведения опытов растения вынесли от 2 до 3 т калия. При этом запасы $К_{подв}$ в пахотном слое уменьшились всего на 80-150

кг. Это говорит о том, что в почве происходила мобилизация калия из необменных форм или растения потребляли калий из нижележащих слоёв.

В *опыте 1* содержание $К_{вал}$ в пахотном слое было достоверно выше контрольного варианта (в 1,1 раза) только при высокой интенсивности баланса калия (210 %) в варианте с максимальной насыщенностью пашни удобрениями «навоз 20 т/га в год + NPK экв. навозу» (табл. 7), запасы возросли на 6 т/га. Положительный баланс по калию также отмечен в вариантах – «навоз 20 т/га», «NPK экв. 20 т навоза», «навоз 10 т/га в год + NPK экв. навозу» (+12-17 кг/га в год). При этом содержание $К_{вал}$ в почве находилось на уровне контроля или отмечены лишь тенденции его превышения. Возможно, на изменение данного показателя оказывала влияние механическая обработка почвы.

Умеренная насыщенность пашни удобрениями (навоз 10 т/га в год, NPK экв. 10 т навоза, навоз 5 т/га + NPK экв. навозу) способствовала увеличению к концу VI ротации (относительно контрольного варианта) в пахотном слое почвы содержания $К_{подв}$ и $К_{л/обм}$ в 1,4-1,6 раза. Запасы $К_{подв}$ повысились с 0,4 до 0,6 т/га, легкообменной – с 37 до 50-57 кг/га. Увеличение в пахотном слое почвы содержания $К_{подв}$, $К_{л/обм,}$ а также $К_{необм}$ (в 1,1-2,3 раза) отмечено при высокой насыщенности пашни удобрениями (навоз 20 т/га в год, NPK экв. 20 т/га навоза, навоз 10 т/га в год + NPK экв. навозу). Использование минеральной и органоминеральной системы удобрения (при более высокой насыщенности) способствовало накоплению $К_{подв}$ и $К_{л/обм}$ в подпахотном слое. В результате их запасы в слое 0-40 см увеличились с 0,9 до 1,4 т/га и с 59 до 105-112 кг/га, соответственно. Наибольшее положительное влияние на калийный режим почвы наблюдали при максимальной насыщенности пашни удобрениями.

Изучение динамики $К_{подв}$ по ротациям показало, что достоверное увеличение его количества относительно исходного уровня в пахотном слое почвы наблюдали только спустя 2 ротации с момента наложения данной схемы удобрений, далее его содержание стабилизировалось в зависимости от системы удобрения и насыщенности на новом уровне.

В *опыте 2* изменения в калийном режиме метрового слоя почвы зависели от сочетания и дозы минеральных удобрений. Содержание $К_{вал}$ в пахотном слое почвы было выше варианта без удобрений на 12-21% при длительном применение калия хлористого ($К_{90}$, $(РК)_{90}$, $(NК)_{90}$, $(NPК)_{90}$) (табл. 8), запасы возросли с 41 до 46-50 т/га. Тенденции увеличения $К_{вал}$ в результате применения $К_{90}$ отмечали в слое почвы 0-40 см, $(РК)_{90}$ - в слое 0-60 см и $(NК)_{90}$ - в слое 0-80 см. Содержание $К_{вал}$ при использовании $(NPК)_{90}$ было выше контрольного варианта только в пахотном слое.

Содержание $К_{л/обм}$ при использовании калия хлористого ($К_{90}$, $(РК)_{90}$, $(NК)_{90}$, $(NPК)_{90}$) в пахотном слое почвы (относительно контрольного варианта) возросло в 1,8-2,8 раза, запасы увеличились с 28 до 52-80 кг/га. При этом количество $К_{л/обм}$ в вариантах $(NК)_{90}$ и/или $(NPК)_{90}$ было достоверно выше, чем при использовании $К_{90}$ и $(РК)_{90}$.

Таблица 7 - Изменение валового содержания калия и его различных соединений по профилю почвы при длительном применении различных систем удобрения, мг/кг (VI ротация, среднее по двум закладкам, 2016-2017 гг.) *(опыт 1)*

Вариант	Валовое содержание					Содержание легкообменных соединений калия					Содержание подвижных соединений калия					Содержание необменных соединений калия				
	0-20	20-40	40-60	60- 80	80-100	0-20	20-40	40-60	60- 80	80-100	0-20	20-40	40-60	60- 80	80-100	0-20	20-40	40-60	60- 80	80-100
Без удобрений	17250	19100	19400	20800	21650	14,7	8,5	7,6	5,6	5,5	142	191	192	162	163	775	735	805	770	705
Навоз 10 т/га	17000	20424	20529	20996	19907	20,0	10,2	5,1	4,3	3,6	212	190	150	150	128	815	770	645	635	560
Навоз 20 т/га	17500	21064	21251	21147	21112	21,7	9,2	6,7	4,5	3,6	228	189	164	148	139	845	770	625	645	615
NPK экв. 10 т навоза	17600	20556	20990	21122	19680	22,4	12,6	8,3	4,1	2,8	225	201	173	144	131	770	720	680	645	645
NPK экв. 20 т навоза	17000	21650	21300	21050	20150	30,5	13,7	5,9	4,4	3,1	320	214	157	144	130	945	755	610	625	565
Навоз 5 т+NPK экв.	17400	20300	20800	20050	20350	22,9	10,2	5,9	4,4	3,6	233	177	139	124	118	735	750	615	570	510
Навоз 10 т + NPK экв.	18500	19600	20750	19650	19350	25,9	15,3	7,4	4,3	3,6	277	245	180	138	136	935	790	730	650	575
Навоз 20 т + NPK экв.	19400	19150	19200	20450	19850	45,9	20,5	8,9	6,3	4,6	387	271	181	170	144	940	795	655	725	650
$НСР_{05}$	1600	$F_ф<F_т$	$F_ф<F_т$	$F_ф<F_т$	$F_ф<F_т$	4,1	3,4	1,5	$F_ф<F_т$	1,2	35	23	24	13	$F_ф<F_т$	45	$F_ф<F_т$	$F_ф<F_т$	85	$F_ф<F_т$

Таблица 8 - Изменение валового содержания калия и его различных соединений по профилю почвы при длительном применении минеральных удобрений, мг/кг (VI ротация, 2021 г.) *(опыт 2)*

Вариант	Валовое содержание					Содержание легкообменных соединений калия					Содержание подвижных соединений калия					Содержание необменных соединений калия				
	0-20	20-40	40-60	60- 80	80-100	0-20	20-40	40-60	60- 80	80-100	0-20	20-40	40-60	60- 80	80-100	0-20	20-40	40-60	60- 80	80-100
Без удобрений	15900	17800	21600	21250	21200	10,9	8,0	3,2	1,5	1,3	129	116	98	91	82	1040	1065	1435	1400	1230
N_{90}	17000	22200	22000	22500	21850	9,7	5,1	3,9	2,3	1,4	112	101	100	90	79	1030	1260	1295	1245	1050
P_{90}	16550	17350	21350	20750	19900	9,4	6,4	4,1	2,5	1,2	108	95	102	103	82	1115	1100	1330	1240	1130
K_{90}	19000	21200	21700	21000	20250	24,0	7,0	6,7	1,9	1,3	217	129	107	94	85	1285	1395	1335	1235	1050
$(NP)_{90}$	15500	19000	22500	22650	20700	14,3	7,0	4,5	2,0	1,3	109	100	112	104	85	890	1110	1430	1335	1230
$(NK)_{90}$	18250	19700	24200	24050	21650	30,7	13,2	6,5	3,5	1,6	218	135	124	108	91	1080	1055	1505	1535	1345
$(PK)_{90}$	19200	22600	23800	22250	22550	20,1	5,8	3,5	1,7	2,3	195	110	107	88	72	1125	1380	1440	1270	1030
$(NPK)_{90}$	17800	18800	21250	20800	21100	29,4	10,4	6,8	3,7	1,7	230	140	122	102	98	1070	1155	1115	1040	1065
$(NPK)_{30}$	14850	19150	19950	19550	19850	10,2	3,9	2,2	3,3	1,5	133	115	108	89	66	1015	1160	1270	1100	1050
$(NPK)_{60}$	15450	17250	20100	19800	18750	19,9	10,5	4,9	5,4	1,5	178	116	93	86	84	980	1000	1200	1050	1025
$(NPK)_{120}$	17800	18500	20750	20800	20400	19,3	8,1	5,0	2,1	1,6	195	135	116	96	77	990	1025	1250	1230	1065
$(NPK)_{150}$	17500	19900	20700	19700	18650	35,3	15,0	6,7	4,6	3,6	234	161	125	111	91	1165	1250	1230	1140	985
$НСР_{05}$	1600	1800	2100	2300	$F_ф<F_т$	5,9	2,7	Fф<Fт	Fф<Fт	1,5	17	13	18	$F_ф<F_т$	$F_ф<F_т$	70	125	200	235	135

Количество $К_{подв}$ при применении калия хлористого ($К_{90}$, $(РК)_{90}$, $(NК)_{90}$, $(NPК)_{90}$) в пахотном слое почвы (относительно исходного уровня) возросло на 20-39%. Использование $К_{90}$ увеличило содержание $К_{подв}$ в слое 0-40 см, $(NК)_{90}$ и $(NPК)_{90}$ – в слое 0-60 см. Применение азотных удобрений в сочетании с калием хлористым способствовало миграции калийных соединений по профилю. Применение $(РК)_{90}$ оказало влияние только на пахотный слой почвы.

Применение $К_{90}$ привело к увеличению $К_{подв}$ в почве к концу I ротации севооборота со 156 (исходное содержание) до 208 мг/кг (на 35%). Поддержание количества $К_{подв}$ на данном уровне отмечено в следующих ротациях. Достоверное увеличение (на 25-40%) содержания $К_{подв}$ в пахотном слое почвы наблюдали с конца II ротации севооборота в вариантах, где изучали сочетание калия хлористого с азотными удобрениями ($(NК)_{90}$, $(NPК)_{90}$). Фосфорные удобрения по-видимому способствовали закреплению калия в необменной форме, поэтому в течение пяти ротаций увеличение $К_{подв}$ в пахотном слое относительно исходного уровня при внесении $(РК)_{90}$ составляло всего 5-10 % и только на начало VI ротации было зафиксировано увеличение на 20 %.

Содержание $К_{необм}$ было выше контроля в пахотном и подпахотном слоях (в 1,1-1,3 раза) только при длительном использовании $К_{90}$ и $(РК)_{90}$.

Длительное применение физиологически кислых азотных удобрений в чистом виде N_{90} привело к разрушению калийсодержащих минералов и перемещению калийных соединений по профилю. В результате наблюдали увеличение в подпахотном слое почвы валового содержания калия и его необменной формы на 18-25 %.

Внесение азотных и фосфорных удобрений (N_{90}, $Р_{90}$, $(NP)_{90}$) без компенсации выноса калия привело к уменьшению содержания $К_{подв}$ в слое почвы 0-40 см, запасы снизились с 1,0 до 0,8 т/га (на 20%). Максимальные потери $К_{подв}$ в пахотном слое наблюдали уже к концу I ротации. При использовании N_{90} и $(NP)_{90}$ отмечено минимальное количество $К_{подв}$ в пахотном слое почвы. Содержание $К_{подв}$ варьировало во II – начале VI ротациях в пределах 80-110 мг/кг. Применение $(NP)_{90}$ также привело к уменьшению в пахотном слое содержания $К_{необм}$, запасы снизились с 2,7 до 2,3 т/га (на 15%).

Изучение возрастающих доз полного минерального удобрения показало, что валовое содержание калия в пахотном слое почвы было выше варианта без удобрений в 1,1 раза только при использовании $(NPК)_{90\text{-}150}$. В данных вариантах также отмечено увеличение в почве $К_{подв}$ и $К_{л/обм}$. Применение $(NPК)_{60}$ обеспечило поддержание содержания $К_{подв}$ в пахотном слое почвы на исходном уровне, увеличило количество $К_{л/обм}$. При использовании минимальной дозы $(NPК)_{30}$ в пахотном слое отмечено наименьшее содержание $К_{вал}$ в опыте.

В *опыте 3* при использовании ОСВ валовое содержание калия в пахотном слое почвы было достоверно выше контрольного варианта в 1,1 раза, его необменной формы в 1,2 раза (контрольный вариант – 16550 и 464 мг/кг, соответственно). Содержание $К_{подв}$ и $К_{л/обм}$ было на уровне варианта без удобрений. По фону минеральных удобрений внесение ОСВ не оказало существенного влияния на изменение калийного режима почвы.

Длительное применение минеральных удобрений (NPK), органических и их сочетание (*опыты 1, 2*) в большей степени оказывало положительное влияние на калийный режим верхнего слоя почвы (0-40 см), в более глубоких слоях (40-100 см) в сравнении с контролем прослеживали тенденции уменьшения содержания $К_{л/обм}$, $К_{подв}$ и чаще всего $К_{необм}$. Такие результаты наблюдали, как и при низких дозах (насыщенности пашни) удобрений, так и при высоких. В первом случае это может быть связано с потреблением растениями соединений калия из более глубоких слоёв почвы, а во втором разрушением калийсодержащих минералов почвы и их перемещением за пределы метрового слоя. Полученные данные также могут быть связаны с генетической неоднородностью по профилю.

Поддержание $К_{вал}$ в верхнем слое почвы (0-20 см) на уровне целинного аналога наблюдали при внесении навоза 20 т/га + NPK экв. навозу, где с удобрениями в почву поступило около 8,5 т калия (соотношение N:P:K составило 1,5:1:2). Также поддержание валового количества калия в почве на уровне целинной наблюдали при длительном использовании $К_{90}$ и $(РК)_{90}$. Рассчитанный баланс калия в данных вариантах составил минус 12-15 кг в год (интенсивность 80-83 %). Нулевой и положительной баланс калия складывался в вариантах $(NPK)_{120-150}$ (интенсивность 102-121 %), при этом содержание валового калия в верхнем слое было ниже целинного аналога (на 10 %). Полученные результаты возможно связаны с ежегодными непроизводительными потерями калия из почвы при внесении высоких доз азотных удобрений (при соотношении N:P:K – 1:1:1). Запасы валового калия в почве (0-20 см) при внесении $(NPK)_{120-150}$ соответствовали уровню целинного аналога. Сохранение валовых запасов калия также наблюдали при внесении навоза 10 т/га в год + NPK эквивалентно навозу.

7 Физико-химические свойства дерново-подзолистой почвы при длительном сельскохозяйственном использовании пашни и применении удобрений

Почва под лугом (слой 0-20 см) характеризовалась высокой суммой обменных оснований (S-21,1±1,1 смоль(экв)/кг), повышенной степенью насыщенности основаниями (*V*-86 %), высоким содержанием обменных форм кальция и магния (18,0±1,8 и 3,5±0,7 смоль(экв)/кг, соответственно). Данные параметры возрастали с глубиной. Гидролитическая кислотность ($Н_г$) в слое почвы 0-20 см составила 3,4±0,2 смоль(экв)/кг и с глубиной уменьшалась. Показатель pH_{KCL} по профилю варьировал в пределах 4,1(±0,2) – 4,5(±0,3). В результате длительного возделывания культур (без удобрений) в течение 35-50 лет в верхнем слое почвы (0-20 см) отмечены тенденции уменьшения суммы обменных оснований, содержания обменных соединений кальция.

В *опытах 1 и 2*, где было проведено известкование в дозе 1,0 $Н_г$, в контрольных вариантах наблюдали улучшение показателей кислотности почвы (0-20 см). Положительное влияние известкования наблюдали в течение двух ротаций полевого восьмипольного севооборота. Далее почва возвращалась к своему исходному состоянию. В *опыте 3* известкование не проводили. Здесь

наблюдали более существенное подкисление почвы. Показатель pH_{KCL} в контрольном варианте уменьшился от I ротации к V с 4,8 до 4,4, $H_г$ возросла с 3,7 до 4,5 смоль(экв)/кг.

В *опыте 1* применение минеральной системы удобрений привело к существенному подкислению почвы, уменьшению S и *V*. В варианте «NPK экв. 10 т/га навоза» отрицательное влияние (конец VI ротации) на показатели кислотности и *V* наблюдали только в пахотном слое, в варианте «NPK экв. 20 т/га навоза» - в метровом слое. При органической системе наблюдали улучшение физико-химических свойств почвы. Применение органических удобрений способствовало поддержанию эффективности известкования в течение шести ротаций севооборота. Положительное влияние органической системы на показатели кислотности почвы и *V* относительно контрольного варианта наблюдали в слое 0-40 см. Органоминеральная система удобрений по влиянию на физико-химические свойства почвы занимала промежуточное положение. Здесь также наблюдали от ротации к ротации уменьшение показателя pH_{KCL}, S и увеличение $H_г$, как и при внесении минеральных удобрений в эквивалентных количествах, но менее интенсивно.

Существенное подкисление почвы, уменьшение S и *V* наблюдали в результате длительного применения азотных удобрений, как в чистом виде, так и в сочетании с суперфосфатом и калием хлористым (N_{90}, $(NP)_{90}$, $(NK)_{90}$, $(NPK)_{90}$) (*опыт 2)*. Ухудшение показателей кислотности в пахотном слое почвы отмечено также как и в контрольном варианте с конца II ротации, однако процесс подкисления был более ярко выражен. Сочетание азотных удобрений с калием хлористым ($(NK)_{90}$, $(NPK)_{90}$) оказало более сильное отрицательное влияние на физико-химические свойства почвы. Увеличение $H_г$, уменьшение показателя pH_{KCL} и *V* в вариантах N_{90} и $(NP)_{90}$ наблюдали до глубины 60 см, в вариантах $(NK)_{90}$ и $(NPK)_{90}$ в метровом слое. Длительное внесение калийных удобрений в чистом виде способствовало поддержанию кислотности почвы на исходном уровне, что возможно связано с замещением ионов водорода в ППК на ионы калия. Применение P_{90}, $(PK)_{90}$ не оказало существенного влияния на изменение физико-химических свойств почвы.

При сравнении различных доз полного минерального удобрения установлено, что применение $(NPK)_{60\text{-}150}$ привело к существенному подкислению пахотного слоя почвы и уменьшению *V*, отрицательные изменения наблюдали с конца II ротации. Наибольшее отрицательное влияние на физико-химические свойства почвы отмечено при использовании максимальной дозы $(NPK)_{150}$. Наблюдения, проведённые по профилю почвы, показали, что при длительном применении $(NPK)_{90\text{-}150}$ подкисление почвы и уменьшение *V* происходило в метровом слое, при использовании невысокой дозы $(NPK)_{60}$ - в слое 0-40 см.

Наблюдения, проведённые в конце V ротации в *опыте 3* в метровом слое почвы, показали, что длительное применение ОСВ в чистом виде не оказало существенного влияния на изменение показателей кислотности почвы. Отмечено повышение S в пахотном слое почвы (с 17,5 до 19,9 смоль(экв)/кг).

При внесении ОСВ по фону минеральных удобрений наблюдали увеличение $H_г$ в пахотном слое почвы с 5,6 (фон) до 6,1 смоль(экв)/кг.

8 Микробиологические показатели дерново-подзолистой почвы при длительном сельскохозяйственном использовании пашни и применении удобрений

8.1 Численность микроорганизмов основных эколого-трофических групп почвы. В пахотной почве (севооборот, без удобрений) в сравнении с целинным аналогом отмечена более низкая численность олиготрофных микроорганизмов (на ПА) и целлюлозолитиков - в 1,6 и 2,3 раза (табл. 9). Численность актиномицетов возросла почти в 5 раз. Полученные результаты связаны с изменением количества и качества поступающих в почву растительных остатков. Коэффициент минерализации (КАА/МПА) увеличился с 1,3 (луг) до 1,7, педотрофности (ПА/МПА) уменьшился с 2,0 до 1,5, что свидетельствует о нарушении гомеостатического состояния микробоценоза почвы. Анализ структуры комплекса актиномицетов показал, что в пахотной почве (без удобрений), в сравнении с почвой под лугом, произошло расширение видового спектра стрептомицетов с трех до шести секций рода *Streptomyces*.

Таблица 9 - Количество микроорганизмов различных эколого-трофических групп в целинной и пахотной почве (0-20 см), 2016-2017 гг.

Вариант	Общая численность на средах						Общее кол-во, млн. КОЕ/г в.с.п.
	МПА (аммони-фикаторы)	КАА (амило-литики)	ПА (олиго-трофы)	КГА (актино-мицеты)	Гетчинсона (целлюло-золитики)	Чапека (микро-мицеты)	
	млн. КОЕ/г в.с.п.			тыс. КОЕ/г в.с.п.			
Луг	1,5±0,3	2,0±0,9	3,0±1,4	165±160	185±75	25±12	6,9
Бессменный пар	1,7±0,3	3,5±2,7	2,2±1,0	365±310	75±25	12±10	7,9
Опыт 1							
Без удобрений	1,3±0,5	2,1±1,0	1,9±1,3	765±500	80±65	23±20	6,2
Навоз 10 т/га	3,7±1,6	2,9±1,4	3,5±2,4	1050±670	130±70	38±18	11,2
Навоз 20 т/га	2,2±1,9	1,8±0,8	1,6±0,6	785±340	105+35	25±16	6,5
NPK экв. 10 т навоза	1,0±0,1	1,1±0,5	0,7±0,2	1315±1165	105±30	25±6	4,2
NPK экв. 20 т навоза	0,8±0,2	0,8±0,2	0,5±0,1	920±795	65±10	33±10	3,1
Навоз 5 т+NPK экв.	1,3±0,2	3,0±2,6	1,1±0,2	1450±1105	105±40	25±23	6,9
Навоз 10 т + NPK экв.	4,0±1,0	3,8±0,9	4,7±2,0	600±275	125±35	40±13	13,2
Навоз 20 т + NPK экв.	2,5±0,9	2,5±0,9	4,5±1,0	950±545	195±20	83±41	10,7

Существенные изменения в структуре микробиологического комплекса определены в почве бессменного чистого пара. Общая численность микрофлоры, использующая минеральные формы азота (на КАА), и актиномицетов, участвующих в разложении наиболее трудногидролизуемых органических соединений, увеличилась в почве бессменного чистого пара по сравнению с целинным аналогом в 1,7 и 2,2 раза, соответственно. Численность олиготрофных бактерий, целлюлозолитиков и микромицетов уменьшилась в 1,4-2,5 раза. В почве бессменного чистого пара отмечены виды четырех секций и серий рода *Streptomyces*, изменились доминирующие виды, как в сравнении с целинной почвой, так и пахотной (севооборот, без удобрений).

В *опыте 1* наиболее благоприятные условия для роста и размножения

микрофлоры почвы сформировались при применении органической (при насыщенности пашни навозом 10 т/га в год) и органоминеральной (навоз 10 и 20 т/га + NPK экв. навозу) систем удобрения. Наблюдали увеличение численности микроорганизмов изученных эколого-трофических групп относительно варианта без удобрений в 1,2-3,1 раза. Органическая и органоминеральная система удобрений способствовали развитию микроорганизмов с самыми разнообразными функциями и, соответственно, более интенсивной и глубокой переработке ОВ в почве. В то же время, при максимальной насыщенности пашни удобрениями (навоз 20 т/га + NPK экв. навозу) получен высокий коэффициент педотрофности – 1,8, что возможно свидетельствует о замедлении процессов деструкции ОВ и о переходе системы в более устойчивое состояние. В варианте «навоз 5 т/га + NPK экв. навозу» отмечен наибольший коэффициент минерализации в опыте – 2,2, что говорит об интенсивно протекающих в почве процессах разложения ОВ, а также усиленной иммобилизации минерального азота.

Длительное внесение минеральных удобрений по результатам *опытов 1,2* не зависимо от вида удобрения (N, P, K) и их сочетания (NP, PK, NK, NPK) существенно повлияло на микробоценоз почвы. Во всех случаях наблюдали уменьшение в почве численности аммонифицирующей и олиготрофной (олигонитрофильной) микрофлоры на 21-95%. Изменения в численности амилолитической микрофлоры, целлюлозолитиков и микромицетов имело различные направления: сохранялась, увеличивалась или уменьшалась. При этом общее количество (полученное путём суммирования) микроорганизмов в почве при внесении минеральных удобрений уменьшилось на 27-73 %. В *опыте 1* наибольшее уменьшение общего количества микроорганизмов отмечено при высокой насыщенности пашни NPK (экв. 20 т навоза), в *опыте 2* при длительном применении фосфорных удобрений в чистом виде.

Наибольшее разнообразие актиномицетов и наиболее широкий спектр доминантов по результатам *опытов 1,2* наблюдали при применении органоминеральной системы удобрений (навоз 5 и 10 т/га + NPK экв. навозу) и при внесении полного минерального удобрения $(NPK)_{90}$.

8.2 Экофизиологические параметры микробоценоза почвы. Скорость базального дыхания (БД) микроорганизмов в почве под лугом составила 2,8±0,3, субстрат-индуцированного (СИД) - 7,6±0,8 мкг $C–CO_2$/(г ч), содержание углерода микробной биомассы ($C_{мик}$) - 570±60 мкг/г. Скорость БД микроорганизмов в пахотной почве (севооборот, без удобрений) была почти на 20 % ниже в сравнении с целинным аналогом. При этом потенциальная активность микроорганизмов (СИД) в почве и количество $C_{мик}$ существенно не изменились. Потенциальная азотфиксирующая активность микробных сообществ целинной почвы составила 62,1 мкг C_2H_4/кг час. Длительное сельскохозяйственное использование пашни (без удобрений) существенно повлияло на процессы азотфиксации в почве. Отмечено уменьшение потенциальной азотфиксирующей активности почти в 2 раза.

Нарушение в функционировании микробиологического сообщества почвы наблюдали при её бессменном паровании. Отмечено уменьшение скорости БД до 1,6±0,6, СИД – до 4,9±1,2 мкг С–CO_2/(г ч) и содержания $С_{мик}$ – до 365±90 мкг/г (на 36-43 % меньше, чем под лугом). Уменьшение содержания $С_{мик}$ свидетельствует о снижении запасов $С_{орг}$ и преобладании процессов минерализации. В бессменном пару зафиксирован наименьший уровень фиксации молекулярного азота (11,5 мкг C_2H_4/кг час).

В *опыте 1* применение органической системы удобрения (навоз 10 и 20 т/га в год) способствовало повышению активности микроорганизмов в почве, отмечено увеличение относительно контрольного варианта на 22-46% скорости БД и СИД, содержание $С_{мик}$, что обусловлено непосредственным поступлением в почву органического субстрата. Кроме того органические удобрения сами являются источником микроорганизмов.

Влияние минеральной системы удобрений на экофизиологические параметры микробного сообщества почвы зависело от насыщенности пашни NPK. Скорость БД микроорганизмов существенно не изменилась при умеренной насыщенности пашни минеральными удобрениями (NPK экв. 10 т/га навоза) и почти на 50 % повысились скорость СИД и содержание $С_{мик}$ (контрольный вариант – 2,1±0,2, 7,2±1,0 мкг CO_2-С /г ч и 540±80 мкг/г, соответственно). Уменьшение скорости БД микроорганизмов на 25 % отмечено в варианте с высокой насыщенностью пашни NPK (экв. 20 т/га навоза). При этом показатели скорости СИД и содержание $С_{мик}$ также были высокими – на 63 % выше варианта без удобрений. Увеличение потенциальной активности микроорганизмов в почве, на фоне уменьшения скорости БД говорит об ухудшении условий для развития микроорганизмов. Переход в состояние покоя распространенная стратегия, используемая организмами для преодоления неблагоприятных условий окружающей среды.

Существенного изменения в экофизиологических параметрах микробоценоза почвы не установлено при применении органоминеральной системы удобрений. Однако в варианте «навоз 20 т/га в год + NPK экв. навозу» наблюдали тенденцию уменьшения скорости СИД, содержания $С_{мик}$. Здесь также было получено наиболее высокое значение микробного метаболического коэффициента – 5,5 мкг CO_2-С /мг $С_{мик}$ час (контрольный вариант – 3,8 мкг CO_2-С /мг $С_{мик}$ час), что свидетельствует о высоких затратах углерода при обороте питательных веществ. Рост содержания $С_{орг}$ в почве в данном варианте может быть связан с торможением процессов минерализации ОВ. Возможно, дополнительное изучение кинетических характеристик роста микроорганизмов позволило бы наиболее полно объяснить полученные закономерности.

В *опыте 2* длительное применение фосфорных и калийных удобрений в чистом виде ($Р_{90}$ и $К_{90}$) привело к угнетению деятельности микроорганизмов в почве. Отмечено достоверное уменьшение скорости БД на 18-26% (контрольный вариант – 2,3±0,2). Здесь также отмечено уменьшение доли $С_{мик}$ в составе ОВ почвы. Это говорит о нарушении процессов минерализации ОВ. Ухудшение микробиологической деятельности может являться основной

причиной поддержания содержание $C_{орг}$ в почве на исходном уровне в данных вариантах. Длительное применение N_{90} привело к увеличению потенциальной активности микроорганизмов и $C_{мик}$ почти в 2 раза (с 7,6±1,0 (без удобрений) до 14,4±1,9 мкг CO_2-C /г ч и с 570±70 до 1080±145 мкг/г, соответственно). Повышение скорости СИД и содержания $C_{мик}$ почвы отмечено при внесении полного минерального удобрения $(NPK)_{90}$ (на 64%). При длительном внесении $(NPK)_{150}$ показатели скорости СИД и $C_{мик}$ в почве были ниже, чем при $(NPK)_{90}$. Не выявлено существенных изменений в дыхании почвы и содержании $C_{мик}$ в вариантах $(NP)_{90}$, $(NK)_{90}$ и $(PK)_{90}$.

В *опыте 3* применение ОСВ не оказало существенного влияния на дыхание микроорганизмов и содержание $C_{мик}$ (табл. 10). Отмечено уменьшение скорости БД, СИД и содержания $C_{мик}$ на 29-37% в результате длительного внесения минеральных удобрений. Более кислая реакция почвенной среды при отсутствии известкования привела к более существенному влиянию NPK на активность микроорганизмов в сравнении с другими опытами.

Таблица 10 - Экофизиологические показатели микробиологического сообщества почвы при длительном применении ОСВ (VI ротация, 2018 г.) *(опыт 3)*

Вариант	БД	СИД	$C_{мик}$, мкг/г	qCO_2, мкг CO_2-C / мг $C_{мик}$ час
	мкг CO_2-C /г ч			
Без удобрений	2,4±0,2	6,2±0,9	465±85	5,2
Навоз	2,0±0,1	6,0±1,0	450±75	4,6
ОСВ	2,0±0,2	5,7±1,0	430±75	4,7
NPK – фон	1,7±0,2	3,9±0,8	290±55	5,8
Фон + навоз	2,9±0,7	5,0±0,7	370±55	7,7
Фон + ОСВ	3,6±0,5	4,6±0,7	350±55	10,3
$НСР_{05}$	0,6	1,3	100	-

Установлено по результатам корреляционного анализа, что ухудшение кислотно-основных свойств почвы и уменьшение содержания в ней необменной формы калия ведёт к нарушению функционирования микробного сообщества почвы.

9 Влияние применения удобрений на продуктивность сельскохозяйственных культур, баланс органического углерода и элементов питания

9.1 Урожайность полевых культур. В *опыте 1* в среднем за 5 ротаций урожайность зерна озимой ржи при применении различных систем удобрений возросла на 21-28 %, яровой пшеницы – 14-52 %, ячменя – 10-13 %, овса – 17-25 %, урожайность клубней картофеля - 24-58 % (табл. 11). Наиболее отзывчивыми на применение удобрений в севообороте были яровая пшеница и картофель. В вариантах «NPK экв. 20 т навоза», «навоз 10 т + NPK экв. навозу» и «навоз 20 т + NPK экв. навозу» урожайность данных культур в отдельные ротации увеличивалась на 70-80 %. На яровой пшенице минеральная система удобрений была более эффективна, чем органическая или органоминеральная. На картофеле минеральная и органоминеральная система удобрений по эффективности были равнозначны и обеспечивали прибавку урожая на 15-20 % выше, чем органическая система удобрений. Яровой ячмень был наименее отзывчивым среди зерновых культур на применение удобрений в данном

опыте, прибавки урожайности не зависели от системы удобрений и не превышали в среднем за 5 ротаций 13 %, в отдельные ротации 23 %, что связано с размещением по хорошему предшественнику - клеверу. Урожайность сена клевера 1 г.п. зависела от урожайности покровной культуры (в среднем по ротациям r=-0,7). Хорошее развитие покровной культуры приводило к ослаблению и изреживанию всходов клевера.

Таблица 11 – Урожайность сельскохозяйственных культур, продуктивность полевого севооборота и окупаемость применения удобрений (среднее по 2 закладкам, 1977-2017 гг.) *(опыт 1)*

Вариант	Урожайность, т/га							Продуктивность, т з. ед. в год	Окупаемость 1кг д.в. NPK, кг з. ед.
	озимая рожь (зерно)	яровая пшеница (зерно)	клевер 1 г.п. (сено 16 %)	клевер 2 г.п. (сено 16 %)	ячмень (зерно)	картофель (клубни)	овёс (зерно)		
Без удобрений	2,9	2,1	4,5	2,9	3,1	16,1	2,4	2,58	-
Навоз 10 т/га	3,5	2,4	4,7	3,1	3,4	19,9	2,8	2,97	3,5
Навоз 20 т/га	3,7	2,6	4,9	3,0	3,5	20,6	2,9	3,10	2,4
NPK экв. 10 т навоза	3,5	2,8	4,4	3,1	3,4	22,5	2,9	3,17	5,4
NPK экв. 20 т навоза	3,7	3,2	4,2	3,2	3,4	24,1	3,0	3,30	3,3
Навоз 5 т+NPK экв.	3,6	2,7	4,6	3,3	3,4	22,8	2,8	3,17	5,3
Навоз 10 т + NPK экв.	3,7	3,0	4,2	3,3	3,4	24,1	3,0	3,27	3,1
Навоз 20 т + NPK экв.	3,6	3,2	3,9	3,4	3,5	25,4	3,0	3,36	1,8
$НСР_{05}$	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	1,2	0,2	0,06	-

Продуктивность полевого парозернопропашного севооборота в среднем за пять ротаций во всех вариантах достоверно увеличилась на 15-30 %. Наибольшая продуктивность получена при применении минеральной и органоминеральной систем удобрения. В отдельные ротации севооборотов более эффективной была органоминеральная, в другие минеральная система удобрений, что в первую очередь связано с метеорологическими условиями вегетационных периодов сельскохозяйственных культур.

Минеральные удобрения в опыте в ранние фазы обеспечивали более высокие запасы нитратного азота в почве, что может быть одной из причин наиболее высокой их эффективности. На почвах с повышенной ёмкостью катионного обмена аммонийный азот прочно связан с почвенно-поглощающим комплексом. Определяющую роль в питании растений на таких почвах играет накопленный нитратный азот в ранний период вегетации культур.

Наибольшая окупаемость 1 кг д.в. NPK в среднем за 5 ротаций получена в вариантах «NPK экв. 10 т навоза» и «навоз 5 т/га + NPK экв. навозу» ($N_{35}P_{25}K_{50}$ в год).

В *опыте 2* в среднем за 5 ротаций на озимой ржи и овсе наиболее эффективным (с учетом окупаемости 1 кг д.в. NPK 1 кг основной продукции) было применение азотных удобрений N_{90}, отмечено увеличение урожайности культур на 16-34 %. На картофеле, яровой пшенице и ячмене было эффективно применение полного минерального удобрения. На картофеле выделились варианты $(NPK)_{30\text{-}60}$, пшенице - $(NPK)_{60}$, ячмене - $(NPK)_{30}$, урожайность культур

возросла на 21-56%. Максимальная продуктивность севооборота в среднем за 5 ротаций получена в варианте $(NPK)_{60}$, а наибольшая окупаемость получена при внесении азотных удобрений в чистом виде N_{90}, оплата 1 кг д.в. составила 8,9 кг з.ед. (табл. 12).

Таблица 12 - Урожайность полевых культур, продуктивность севооборота и окупаемость применения удобрений (среднее по 2 закладкам, 1978-2019 гг.) *(опыт 2)*

Вариант	Урожайность, т/га							Продуктивность, т з. ед. в год	Окупаемость 1кг д.в. NPK, кг з. ед.
	озимая рожь (зерно)	картофель (клубни)	яровая пшеница (зерно)	клевер 1 г.п. (сено 16 %)	клевер 2 г.п. (сено 16 %)	ячмень (зерно)	овёс (зерно)		
Без удобрений	3,2	16,4	1,6	4,3	3,8	2,7	3,1	2,65	-
N_{90}	3,7	20,0	2,1	4,1	4,2	3,1	3,7	3,15	8,9
P_{90}	3,3	18,5	1,7	3,7	4,0	3,1	2,9	2,76	2,0
K_{90}	3,6	18,0	1,8	4,4	3,9	2,9	2,9	2,82	3,0
$(NP)_{90}$	3,5	21,7	2,1	3,3	3,7	2,8	3,5	3,02	3,3
$(NK)_{90}$	3,7	22,4	2,1	4,2	3,8	3,0	3,4	3,11	4,1
$(PK)_{90}$	3,6	19,0	1,8	5,0	3,9	3,2	3,0	2,97	2,8
$(NPK)_{90}$	3,6	22,8	2,5	4,0	3,3	3,2	3,6	3,23	3,4
$(NPK)_{30}$	3,6	20,7	2,1	3,4	3,7	3,2	3,3	3,01	6,2
$(NPK)_{60}$	3,7	23,4	2,6	4,0	4,3	3,3	3,6	3,31	5,9
$(NPK)_{120}$	3,7	23,7	2,4	3,3	3,7	3,3	3,4	3,18	2,4
$(NPK)_{150}$	3,7	25,4	2,5	3,2	3,7	3,3	3,4	3,26	2,1
$НСР_{05}$	0,3	2,7	0,3	Fф<Fт	Fф<Fт	0,4	0,5	0,17	-

В *опыте 3* применение ОСВ обеспечило достоверное увеличение урожайности зерновых культур (в среднем за III-VI ротации) на 0,5-0,7, сена клевера на 0,8-1,1 т/га и не уступило действию навоза КРС (табл. 13).

Таблица 13 - Влияние ОСВ на урожайность сельскохозяйственных культур и продуктивность полевого севооборота (среднее за III -VI ротации, 1993-2020 гг.) *(опыт 3)*

Вариант	Урожайность, т/га						Продуктивность, т з. ед. в год
	озимая рожь (зерно)	яровая пшеница (зерно)	клевер 1 г.п. (сено 16 %)	клевер 2 г.п. (сено 16 %)	ячмень (зерно)	овёс (зерно)	
Без удобрений	2,1	1,6	5,1	3,6	2,6	1,7	2,08
Навоз	2,7	2,0	6,2	4,4	3,2	2,1	2,59
ОСВ	2,8	2,1	6,2	4,4	3,2	2,3	2,65
NPK – фон	2,8	2,2	5,3	3,8	3,8	2,9	2,73
Фон + навоз	3,1	2,6	5,8	4,0	3,9	3,0	2,92
Фон + ОСВ	2,9	2,7	5,6	4,3	3,6	3,3	2,97
$НСР_{05}$	0,2	0,3	0,5	0,4	0,4	0,2	0,17

Продуктивность полевого семипольного севооборота при внесении ОСВ и навоза возросла на 25-27 %. Применение ОСВ и навоза по фону NPK увеличило продуктивность пашни на 7-9 % (к фону).

9.2 Балансы органического углерода и NPK. Возделывание культур в полевом севообороте без применения удобрений за 35-50 лет привело к потере из почвы 3,5-5,5 т $C_{орг}$, 1,5-2,0 т азота, 0,6-0,9 т фосфора и 2,0-3,0 т калия.

В *опыте 1* положительный баланс $C_{орг}$ сформировался в вариантах с органической и органоминеральной системой удобрений при насыщении пашни навозом 10 и 20 т/га в год (рис. 7). Положительный баланс по азоту (с учетом двух полей клевера) и калию сформировался при применении навоза 20 т/га в год, NPK экв. 20 т навоза, навоза 10 и 20 т/га в год + NPK экв. навозу. По фосфору складывался нулевой или положительный баланс при применении всех изученных систем удобрения.

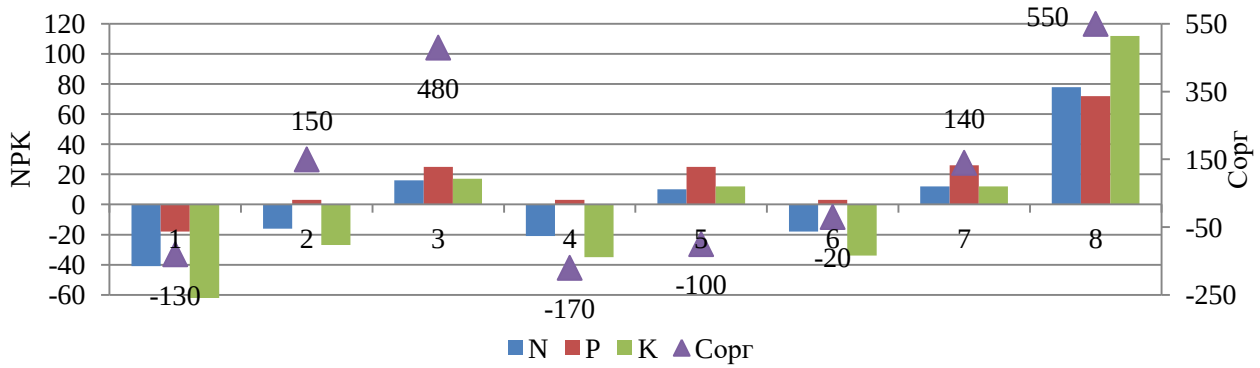


Рисунок 7 – Баланс $C_{орг}$, азота, фосфора и калия в полевом севообороте, кг/га в год (среднее за 5 ротаций, 1977-2017 гг.) *(опыт 1),* 1-8 – варианты (в соответствии со схемой)

В *опыте 2* баланс углерода в вариантах с дозой азотных удобрений 90 кг д.в./га (N_{90}, $(NP)_{90}$, $(NK)_{90}$ и $(NPK)_{90}$) составил минус 0,01-0,03 т/га в год, при использовании более высоких доз $(NPK)_{120-150}$ - +0,06-0,13 т/га в год. Баланс азота близкий к нулевому сформировался при внесении азотных удобрений в дозе 90 кг д.в./га, положительный – при дозе 120-150 кг д.в./га. Положительный баланс по фосфору получен при внесении суперфосфата в дозе 60 кг д.в. /га и выше. Нулевой и положительный баланс по калию сложился при применении калия хлористого в дозе 120-150 кг д.в./га (рис. 8).

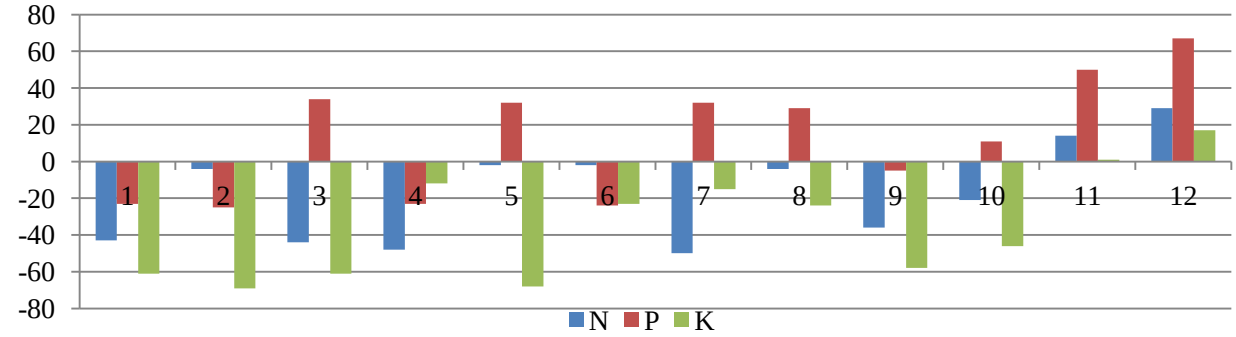


Рисунок 8 – Баланс азота, фосфора и калия в полевом севообороте, кг/га в год (среднее за 5 ротаций, 1978-2019 гг.) *(опыт 2),* 1-12 – варианты (в соответствии со схемой)

В *опыте 3* применение ОСВ (насыщенность 5,7 т/га в год) обеспечило в полевом семипольном севообороте баланс близкий к нулевому по $C_{орг}$ (0,06 т/га в год) и положительный по фосфору (32 кг/га). Баланс по азоту близкий к нулевому получен при использовании ОСВ по фону NPK. Баланс по калию сложился отрицательный как при использовании ОСВ в чистом виде, так и по фону NPK (минус 65 и 47 кг/га, соответственно).

Отмечено снижение коэффициентов использования элементов питания из удобрений при увеличении их доз (расчет проведен разностным способом).

9.3 Корреляционно-регрессионный анализ между урожайностью культур и показателями плодородия почвы. Корреляционные связи между продуктивностью севооборота (урожайностью культур) и содержанием в почве $C_{орг}$, общего (валового) азота, фосфора, калия и их различных соединений по опытам сильно варьировали – от очень слабых (недостоверных) до очень высоких. В большей степени наличие достоверных корреляционных связей (r=0,7-1,0) между продуктивностью и данными показателями плодородия почвы наблюдали при изучении органических, органоминеральных и минеральных (NPK) систем удобрения, где происходило комплексное окультуривание. В опыте, где проводили изучение применения азотных, фосфорных и калийных удобрений в чистом виде и их сочетаний чаще всего наблюдали не достоверные корреляционные связи слабой силы. По результатам всех трёх опытов установлены достоверные средние, высокие и очень высокие (r=0,6-0,9) корреляционные зависимости между продуктивностью севооборотов (урожайностью культур) и запасами $N_{мин}$ (в слое 0-40 см и 0-100 см), запасами $P_{подв}$ (в слое 0-20 см).

10 Экологическая оценка длительного применения удобрений

Длительное возделывание культур в севообороте (без удобрений) способствовало в первую очередь повышению «подвижности» ТМ в почве. Отмечено увеличение на 15-65 % содержания кислоторастворимых (1М HCL) и/или подвижных форм (ААБ pH 4,8) Cd, Pb, Zn, Ni, Co и Mn. Изменения отмечены в метровом слое почвы. Это может быть связано с минерализацией ОВ, изменением в физико-химических свойствах почвы и механической обработкой почвы. Валовое содержание ТМ изменилось в меньшей степени. Валовая концентрация Ni и Co была ниже (в сравнении с целинным аналогом) в отдельных слоях почвы на 10-20%. Наблюдали изменение в распределении валового содержания Mn по профилю. Отмечено более низкое валовое содержание Cu и её доступных форм для растений. Валовые запасы меди в метровом слое уменьшились с 480 (луг) до 380, подвижной формы с 20 до 10, кислоторастворимой формы со 120 до 80 кг/га.

Внесение органических удобрений (насыщенность почвы навозом 10 и 20 т/га в год) способствовало увеличению в почве (0-20 см) подвижных и/или кислоторастворимых форм Zn, Cu, Co и Mn в 1,1-1,4 раза. В отдельных случаях наблюдали уменьшение в почве подвижной формы Cd, Pb и Ni на 10-30 %. Использование NPK в дозе от 60 до 150 кг д.в. каждого элемента/га привело к увеличению в почве подвижных и/или кислоторастворимых форм Cd, Pb, Zn, Co, Mn и Ni в 1,1-2,4 раза. При длительном внесении высокой дозы $(NPK)_{150}$ отмечено уменьшение в почве на 20% валового содержания Cu в слое 0-40 см и на 10-20 % Ni – в метровом слое.

Применение ОСВ привело к увеличению в почве валового содержания Cd, Pb, Zn, Co, Ni и Cu, их подвижных и кислоторастворимых форм в 1,1-3,3 раза. Изменения отмечены в большей степени в слое 0-40 см. В более глубоких

слоях выявлено увеличение подвижной формы Cu и кислоторастворимой формы Ni. При внесении ОСВ отмечено снижение подвижности в почве Mn.

ОСВ можно рассматривать как источник микроэлементов в почве. Применение ОСВ способствовало переходу почвы по обеспеченности цинком из группы «низкое содержание» в группу «среднее содержание» и медью – из группы «среднее содержание» в группу «высокое содержание». При внесении ОСВ валовые запасы меди, её доступных для растений форм в метровом слое почвы приблизились к уровню целинного аналога.

Использование навоза КРС, ОСВ и минеральных удобрений не привело к загрязнению почвы и растительной продукции ТМ – содержание изученных элементов было ниже установленных нормативов. Исключение составило валовое содержание Ni и подвижных соединений Mn в почве. Превышение ПДК по данным элементам наблюдали, как в пахотной, так и целинной почве. Высокое валовое количество Ni в почве может быть обусловлено атмосферным загрязнением, геохимическими особенностями исследуемой почвы. Содержание подвижных соединений Mn в почве по годам исследований сильно варьировало и в отдельных случаях наблюдали превышение ПДК, что возможно связано с погодными условиями. Использование ОСВ по фону NPK привело к накоплению кислоторастворимой формы Cd в почве и зерне яровой пшеницы выше ПДК. При этом превышения МДУ для кормов не выявлено, продукцию можно использовать на зернофураж.

Заключение

1. Длительное (35-50 лет) экстенсивное сельскохозяйственное использование дерново-подзолистой почвы привело к ухудшению параметров её плодородия (относительно целинного аналога или исходного уровня). Отмечено уменьшение в верхнем слое (0-20 см) почвы запасов органического углерода, общего азота, общего и органического фосфора, валового и подвижного калия (на 10-43 %), в метровом слое - подвижного фосфора (на 15-20 %) и легкообменного калия (на 37-62 %). Наблюдали снижение степени обогащённости органического вещества азотом. Установлено нарушение сложившегося равновесия между различными соединениями элементов питания в почве. Выявлены тенденции уменьшения суммы обменных оснований, обменной формы кальция. Отмечено изменение в составе и структуре основных эколого-трофических групп микроорганизмов (уменьшение в 1,6 и 2,3 раза олиготрофных микроорганизмов и целлюлозолитиков, увеличение почти в 5 раз – актиномицетов). Наблюдали снижение в почве скорости БД, потенциальной азотфиксирующей активности микроорганизмов. Выявлено уменьшение валовых запасов меди и её подвижной формы в метровом слое почвы на 21 и 50 %, соответственно. Отмечено повышение «подвижности» ТМ в почве.

Минимальным содержанием $C_{орг}$ (0,78-0,94 %), $N_{общ}$ (980 мг/кг), углерода микробной биомассы (365±90 мкг/г), наименьшей скоростью БД, СИД, азотфиксацией (11,5 мкг C_2H_4/кг час) характеризовалась почва (слой 0-20 см), находящаяся под чистым паром с 1977 года.

За время проведения длительных опытов (35-50 лет) количество $Р_{подв}$ в пахотном слое почвы контрольных вариантов практически не изменялось, $К_{подв}$ уменьшилось на 18-42% от исходного уровня. При этом основные потери $К_{подв}$ наблюдали в первые 7-8 лет, далее происходило поддержание содержания примерно на одном уровне. Мобилизация фосфора и калия в почве происходила из других форм и нижележащих слоев.

2. Сравнение органической, минеральной и органоминеральной систем удобрения (выровненных по элементам питания) показало, что (относительно исходного уровня или контрольного варианта):

– Аккумулятивно-насыщающий тренд изменения содержания в почве $С_{орг}$ отмечен только при очень высоком насыщении почвы удобрениями - навоз 20 т/га в год + NPK экв. навозу. Равновесно-сбалансированный тренд наблюдали при насыщенности пашни навозом 10-20 т/га в год, NPK экв. 20 т навоза и навозом 10 т/га + NPK экв. навозу.

– Умеренная насыщенность пашни удобрениями (навоз 10 т/га в год; NPK экв. 10 т навоза; навоз 5 т/га + NPK экв. навозу) способствовала увеличению в пахотном слое почвы содержания доступных для растений форм азота и калия ($N_{лг}$, $N_{мин}$, $К_{подв}$, $К_{л/обм}$), общего и минерального фосфора в 1,1-1,7 раза. Повышение количества общего азота, органофосфатов, необменных соединений калия наблюдали только при высокой насыщенности пашни удобрениями. Использование минеральной и/или органоминеральной системы удобрения (особенно при более высокой насыщенности) оказало влияние на изменение содержания различных соединений азота, фосфора и калия по профилю почвы, органической – в основном в пахотном слое.

– Применение минеральной системы удобрений привело к существенному подкислению почвы, уменьшению суммы обменных оснований и степени насыщенности почвы основаниями (при более высокой насыщенности NPK – в метровом слое). При органической системе наблюдали улучшение физико-химических свойств почвы (в слое 0-40 см).

3. Изучение различного сочетания азотных удобрений, суперфосфата и калия хлористого (N_{90}, $Р_{90}$, $К_{90}$, $(РК)_{90}$, $(NK)_{90}$, $(NP)_{90}$, $(NPK)_{90}$) показало, что (относительно контрольного варианта или исходного уровня):

– Использование азотных удобрений наряду с улучшением показателей азотного режима почвы привело к её подкислению, увеличению растворимости минеральных соединений фосфора, разрушению калийсодержащих минералов и переносу калийных соединений по профилю почвы. Отмечено уменьшение содержания $С_{орг}$ в слое 0-60 см при применении азотных удобрений в чистом виде (N_{90}), запасы в метровом слое снизились на 27 %.

– Применение суперфосфата соответственно повышало в почве содержание общего, минерального и подвижного фосфора, а также способствовало закреплению калия в необменной форме, оказывало положительное влияние на процессы стабилизации ОВ в почве.

– Длительное внесение калия хлористого наряду с улучшением показателей калийного режима почвы повлияло на миграцию ОВ, фосфорных и

калийных соединений по профилю почвы. Использование азотных удобрений и калия хлористого привело к накоплению в почве органофосфатов.

– При внесении N_{90} и $(NP)_{90}$ установлен минимальный уровень подвижных соединений калия в пахотном слое почвы (80-110 мг/кг).

– Наиболее оптимальным являлось применение полного минерального удобрения. Каждый из элементов выполнял свою роль в стабилизации функционирования агроэкосистем.

4. При сравнении возрастающих доз полного минерального удобрения выявлено, что поддержание содержания $C_{орг}$ в почве на исходном уровне происходило только при использовании высоких доз $(NPK)_{120-150}$, что согласуется с балансом ОВ. Улучшение в пахотном слое показателей азотного, фосфатного и калийного режимов почвы (относительно контроля) обеспечивало внесение $(NPK)_{90-150}$. Накопление подвижных форм элементов питания ($N_{мин}$, $P_{подв}$, $K_{подв}$) наблюдали в слое 0-60, 0-80 или 0-100 см. При этом использование $(NPK)_{90-150}$ привело к ухудшению физико-химических свойств почвы в метровом слое.

5. Использование ОСВ (насыщенность 5,7 т/га в год) позволило поддерживать содержание $C_{орг}$ в пахотном слое почвы на исходном уровне, обеспечило улучшение показателей азотного, фосфатного и калийного режимов почвы (относительно контрольного варианта). Изменение показателей азотного и калийного режима почвы наблюдали в пахотном слое, фосфатного - в слое 0-100 см. Внесение ОСВ не оказало существенного влияния на показатели кислотности почвы. Положительное влияние ОСВ на плодородие почвы возрастало на фоне NPK.

6. Углеродпротекторная емкость пахотных дерново-подзолистых тяжелосуглинистых почв варьировала от 27 до 33 г С/кг (или 70-84 т/га) и существенно не зависела от применяемых видов и доз удобрений. Пахотные дерново-подзолистые тяжелосуглинистые почвы обладают высоким потенциалом для секвестрации атмосферного углерода, его накопления и депонирования в почве. Аккумуляция углерода в биомассе растений в результате применения удобрений увеличивалась в среднем за вегетационный период на 9-31%. Максимальная почвенная секвестрация CO_2 и депонирование углерода в почве происходили при использовании навоза 20 т/га в год и экв. количества NPK, применении ОСВ по фону NPK.

7. Улучшение микробиологических свойств почвы наблюдали при применении органической и органоминеральной систем удобрения (навоз 10 т/га, навоз 10 и 20 т/га + NPK экв. навозу). Выявлено увеличение численности микроорганизмов изученных эколого-трофических групп в пахотном слое почвы в 1,2-3,1 раза, общее количество возросло с 6,2 млн. до 10,7-13,2 млн. КОЕ/г в.с.п. Общая численность микроорганизмов в почве уменьшилось на 27-73 % при длительном внесении минеральных удобрений не зависимо от вида удобрения и их сочетания.

8 Повышение дыхательной активности микроорганизмов почвы отмечено при внесении навоза 10 и 20 т/га в год, наблюдали увеличение на 22-

46% скорости БД, СИД и $C_{мик}$. Отрицательное влияние минеральной системы удобрений на экофизиологические параметры микробного сообщества почвы выявлено при внесении NPK экв. 20 т навоза. Угнетение жизнедеятельности микроорганизмов в почве установлено при длительном использовании фосфорных и калийных удобрений (P_{90} и K_{90}) (скорость БД снизилась на 18-26%). Внесение ОСВ не оказало существенного влияния на изменение экофизиологических параметров микробоценоза почвы.

9. Применение минеральной и органоминеральной систем удобрения по влиянию на урожайность культур и продуктивность севооборота было эффективнее, чем органической. Наибольшая окупаемость 1 кг д.в. удобрений (5,3-5,4 кг з.ед) получена при внесении NPK экв. 10 т навоза, навоза 5 т/га и экв. количества NPK.

На озимой ржи и овсе наиболее эффективным (с учетом окупаемости 1 кг д.в. NPK 1 кг основной продукции) было применение N_{90}, на картофеле - $(NPK)_{30-60}$, яровой пшенице - $(NPK)_{60}$, ячмене - $(NPK)_{30}$. Наибольшая окупаемость в севообороте 1 кг д.в. удобрений (8,9 кг з.ед.) получена при внесении N_{90}. Однако при длительном одностороннем применении азотных удобрений происходит существенное ухудшение параметров почвенного плодородия, и со временем может наступить критический момент, ведущий к необратимым последствиям.

Использование ОСВ (насыщенность 5,7 т/га в год) обеспечило увеличение продуктивности полевого семипольного севооборота на 27 %, по фону NPK на 9 % (к фону).

10. Максимальное влияние на содержание ТМ в почве и растительной продукции из всех изученных систем удобрения оказало длительное применение ОСВ. Здесь выявлено увеличение в слое 0-40 см валового содержания Cd, Pb, Zn, Co, Ni и Cu, их подвижной и кислоторастворимой форм в 1,1-3,3 раза. Применение навоза, NPK, навоза + NPK, ОСВ не привело к загрязнению почвы и растительной продукции ТМ. Использование ОСВ по фону NPK привело к накоплению Cd в почве и зерне пшеницы выше ПДК.

11. Установлено, что сохранение и/или улучшение изученных параметров плодородия дерново-подзолистых тяжелосуглинистых почв в сравнении с целинным аналогом происходило только при использовании органоминеральной системы удобрения с насыщенностью «навоз 10 и 20 т/га в год + NPK экв. навозу» (с учетом наличия в севообороте двух полей клевера). Отмечено накопление в почве ОВ и $N_{общ}$, сохранение соотношения фракций азота близкое к целинной почве, существенный рост запасов $P_{общ}$, его минеральных и органических соединений, поддержание содержания (запасов) $K_{вал}$ в почве. Внесение навоза 20 т/га в год + NPK экв. навозу способствует депонированию ОВ, обеспечивает сокращение эмиссии CO_2 в атмосферу. Для устранения отрицательного влияния органоминеральной системы удобрения на показатели кислотности почвы необходимо известкование. Сохранение основных параметров плодородия почвы, кроме калийного режима, наблюдали

при использовании ОСВ (насыщенность 5,7 т/га в год). Необходимо дополнительное использование калийных удобрений.

Работы по теме диссертации, опубликованные в журналах, включённых в перечень изданий рекомендованных ВАК

1. **Vasbieva, M. T.** Changes in fertility parameters and contents of heavy metals of soddy-podzolic soils upon the long-term application of sewage sludge / **M. T. Vasbieva**, A. I. Kosolapova // Eurasian Soil Science. – 2015. – Vol. 48, No. 5. – P. 518-523. – DOI 10.1134/S1064229315030138. – EDN UFWRIH.
2. **Васбиева, М. Т.** Влияние длительного применения осадков сточных вод в качестве удобрения на продуктивность зернотравяного севооборота и качество сельскохозяйственных культур / **М. Т. Васбиева** // Агрохимия. – 2016. – № 1. – С. 44-51. – EDN VSNMUF.
3. **Васбиева, М. Т.** Изменение фосфатного режима дерново-подзолистой почвы по профилю при длительном применении удобрений / **М. Т. Васбиева**, Н. Е. Завьялова, Д. С. Фомин, И. С. Тетерлев // Плодородие. – 2017. – № 5(98). – С. 17-20. – EDN ZNOLAB.
4. Ковалевская, Н. П. Особенности микробоценоза дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы при длительном применении минеральных и органических удобрений / Н. П. Ковалевская, Н. Е. Завьялова, Д. Ю. Шаравин, **М. Т. Васбиева** // Проблемы агрохимии и экологии. – 2018. – № 2. – С. 24-28.
5. **Васбиева, М. Т.** Тяжелые металлы в системе почва-растения при утилизации осадков сточных вод в качестве удобрения / **М. Т. Васбиева**, А.И. Косолапова // Агрохимия. – 2018. – № 3. – С. 83-89. – DOI 10.7868/S0002188118030110. – EDN YSSOUU.
6. Косолапова, А. И. Эффективность длительного применения удобрений на дерново-подзолистых почвах Предуралья / А. И. Косолапова, Н. Е. Завьялова, Е. М. Митрофанова, **М.Т. Васбиева**, В.Р. Ямалтдинова, Д.С. Фомин, И.С. Тетерлев // Агрохимия. – 2018. – № 2. – С. 42-55. – DOI 10.7868/S0002188118020047. – EDN YTEATS.
7. **Васбиева, М.Т.** Влияние длительного применения органических и минеральных удобрений на гумусное состояние дерново-подзолистой почвы / **М. Т. Васбиева**, Н. Е. Завьялова, Д. С. Фомин, В. Р. Ямалтдинова // Проблемы агрохимии и экологии. – 2019. – № 2. – С. 9-13. – DOI 10.26178/AE.2019.28.95.002. – EDN DORPOH.
8. **Vasbieva, M. T.** Effect of Long-Term Application of Organic and Mineral Fertilizers on the Organic Carbon Content and Nitrogen Regime of Soddy-Podzolic Soil / M. T. Vasbieva // Eurasian Soil Science. – 2019. – Vol. 52, No. 11. – P. 1422-1428. – DOI 10.1134/S1064229319110139. – EDN ISBTFZ.
9. Ямалтдинова, В. Р. Влияние систем удобрений на показатели плодородия дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы Предуралья / В. Р. Ямалтдинова, Н. Е. Завьялова, Д. С. Фомин, **М. Т. Васбиева** // Российская сельскохозяйственная наука. – 2020. – № 1. – С. 29-32. – DOI 10.31857/S2500-2627-2020-1-29-32. – EDN ZSQUWL.

10. Ямалтдинова, В. Р. Влияние систем удобрений на агрохимические показатели и накопление тяжелых металлов в почве и яровой пшенице (Triticum aestivum L.) / В. Р. Ямалтдинова, **М.Т. Васбиева**, Д. С. Фомин // Проблемы агрохимии и экологии. – 2020. – № 3. – С. 39-43. – DOI 10.26178/AE.2020.78.61.004. – EDN LHNUIM.
11. Zavyalova, N. E. Microbial Biomass, Respiratory Activity and Nitrogen Fixation in Soddy-Podzolic Soils of the Pre-Urals Area under Various Agricultural Uses / N. E. Zavyalova, **M. T. Vasbieva**, D. S. Fomin // Eurasian Soil Science. – 2020. – Vol. 53, No. 3. – P. 383-388. – DOI 10.1134/S1064229320030126.
12. **Васбиева, М. Т.** Влияние длительного применения систем удобрений на фракционный состав минеральных фосфатов и содержание подвижного фосфора по профилю дерново-подзолистой почвы / **М.Т. Васбиева**, В. Р. Ямалтдинова, Д. С. Фомин // Российская сельскохозяйственная наука. – 2021. – № 2. – С. 43-48. – DOI 10.31857/S2500262721020095. – EDN SQXGVT.
13. **Васбиева, М. Т.** Фосфатный режим дерново-подзолистой почвы естественных и агрофитоценозов / **М. Т. Васбиева**, Н. Е. Завьялова // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. – 2021. – № 107. – С. 92-115. – DOI 10.19047/0136-1694-2021-107-92-115. – EDN FXCACF.
14. Zavyalova, N. E. Influence of Different Types of Land Use on Prokaryotic Communities and Organic Matter Stabilization in Soddy-Podzolic Soil / N. E. Zavyalova, **M. T. Vasbieva**, D. S. Fomin, I. G. Shirokikh // Eurasian Soil Science. – 2021. – Vol. 54, No. 2. – P. 264-270. – DOI 10.1134/S1064229321020162. – EDN CBWUPZ.
15. Zavyalova, N. E. Elemental Composition and Structure of Humic Acids in Virgin and Arable Soddy-Podzolic Soils of the Cis-Urals / N. E. Zavyalova, **M. T. Vasbieva** // Eurasian Soil Science. – 2021. – Vol. 54, No. 10. – P. 1575-1580. – DOI 10.1134/S1064229321100148. – EDN CTGEOU.
16. **Vasbieva, M. T.** Changes in the Agrochemical Properties of Soddy-Podzolic Soil under the Impact of Long-Term Application of Fertilizers / **M. T. Vasbieva** // Eurasian Soil Science. – 2021. – Vol. 54, No. 1. – P. 108-116. – DOI 10.1134/S1064229321010130. – EDN QXGNKF.
17. **Васбиева, М. Т.** Изменение фракционного состава минеральных фосфатов, содержания подвижного фосфора и степени подвижности фосфатов по профилю дерново-подзолистой почвы при длительном применении удобрений / **М.Т. Васбиева** // Агрохимия. – 2021. – № 7. – С. 3-12. – DOI 10.31857/S0002188121070115. – EDN HOXKFV.
18. Завьялова, Н. Е. Влияние минеральных удобрений на плодородие дерново-подзолистой почвы, содержание основных элементов питания и тяжелых металлов в озимой ржи / Н. Е. Завьялова, **М. Т. Васбиева**, Д. Г. Шишков // Агрохимия. – 2021. – № 4. – С. 49-56. – DOI 10.31857/S0002188121040153. – EDN KUBCNQ.
19. Завьялова, Н. Е. Агрохимические показатели, содержание и запасы подвижных и необменных форм калия в профиле пахотной дерново-

подзолистой почвы длительного опыта при внесении возрастающих доз NPK / Н. Е. Завьялова, **М. Т. Васбиева**, Д. Г. Шишков, О. В. Иванова // Российская сельскохозяйственная наука. – 2022. – № 5. – С. 54-59. – DOI 10.31857/S2500262722050106. – EDN KJRUKJ.
20. Завьялова, Н. Е. Характеристика гуминовых кислот дерново-подзолистой почвы при длительном воздействии разных систем удобрения / Н. Е. Завьялова, **М. Т. Васбиева**, В. Р. Ямалтдинова, Я. В. Шляпина // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. – 2022. – № 111. – С. 97-115. – DOI 10.19047/0136-1694-2022-111-97-115. – EDN QMENQQ.
21. **Vasbieva, M. T.** Changes in the Agrochemical Properties of Albic Retisol (Abruptic, Aric, Loamic) during a Long-Term Use of Nitrogen, Phosphorus, and Potassium Fertilizers under Cis-Ural / **M. T. Vasbieva**, N. E. Zavyalova, D. G. Shishkov // Eurasian Soil Science. – 2022. – Vol. 55, No. 11. – P. 1623-1632. – DOI 10.1134/S1064229322110138. – EDN QDIQIC.
22. Завьялова, Н. Е. Элементный состав и структура гуминовых кислот дерново-подзолистой почвы длительного стационарного опыта и ее целинных аналогов / Н. Е. Завьялова, **М. Т. Васбиева**, Д. С. Фомин // Агрохимия. – 2022. – № 9. – С. 15-25. – DOI 10.31857/S0002188122090149. – EDN RVFDHY.
23. **Васбиева, М. Т.** Эффективность применения различных систем удобрения на дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве в условиях Предуралья / **М.Т. Васбиева**, В. Р. Ямалтдинова // Агрохимия. – 2023. – № 3. – С. 29-42. – DOI 10.31857/S0002188123030110. – EDN KOFNDW.
24. Zavyalova, N. E. Content of Potassium Forms in the Profile of Soddy-Podzolic Soil of the Cis-Ural Region / N. E. Zavyalova, **M.T. Vasbieva**, D. G. Shishkov, O. V. Ivanova // Eurasian Soil Science. – 2023. – Vol. 56, No. 8. – P. 1083-1091. – DOI 10.1134/S1064229323600926. – EDN EYRSLH.
25. Завьялова, Н. Е. Аккумуляция атмосферного углерода культурами севооборота и влияние систем удобрения на накопление органического углерода пахотной дерново-подзолистой почвой / Н. Е. Завьялова, **М.Т. Васбиева**, В. Р. Ямалтдинова, И. В. Казакова // Агрохимия. – 2023. – № 6. – С. 47-56. – 10.31857/S0002188123060121. - EDN: QPEMYE.
26. Завьялова Н.Е. Азотный режим дерново-подзолистой почвы при длительном применении различных видов и сочетаний минеральных удобрений / Н. Е. Завьялова, **М.Т. Васбиева**, Д. Г. Шишков, И. В. Казакова // Российская сельскохозяйственная наука. – 2023. – № 4. – С. 43-47. – DOI 10.31857/S2500262723040087. – EDN JXZWCZ.
27. Завьялова, Н.Е. Влияние видов и сочетаний минеральных удобрений на микробоценоз дерново-подзолистой почвы / Н. Е. Завьялова, И. Г. Широких, **М.Т. Васбиева**, Д. Г. Шишков // Достижения науки и техники АПК. – 2023. – Т. 37, № 5. – С. 66-71. – DOI 10.53859/02352451_2023_37_5_66. – EDN STGEGM.

Публикации в других изданиях

28. Косолапова, А.И. Основные результаты исследований в длительных стационарных опытах на дерново-подзолистых почвах Предуралья / А. И. Косолапова, Е. М. Митрофанова, **М. Т. Васбиева** [и др.] // Состояние и пути

повышения эффективности агрохимических исследований в Северо-Восточном и Уральском регионах : Материалы регионального совещания научных учреждений-участников Геосети Северо-Восточного и Уральского регионов, Пермь, 03–05 июля 2013 года. – Пермь, 2013. – С. 38-51.
29. **Васбиева, М. Т.** Утилизация осадков сточных вод в качестве удобрения / **М. Т. Васбиева** // Ресурсосберегающие экологически безопасные технологии производства и переработки сельскохозяйственной продукции, Саранск, 17–18 апреля 2014 года. Том Часть 2. – Саранск: Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, 2014. – С. 32-37.
30. **Васбиева, М.Т.** Экологически безопасные приёмы использования осадков сточных вод и углеотходов в качестве нетрадиционных органических удобрений на дерново-подзолистой почве / **М. Т. Васбиева**, А.И. Косолапова. – Пермь : Издательство "От и До", 2014. – 32 с. – EDN UGDURN.
31. **Васбиева, М. Т.** Влияние длительного применения минеральных удобрений на фосфатный режим дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы по профилю / **М. Т. Васбиева** // Сохранение и развитие агрохимического наследия академика Д.Н. Прянишникова в Сибири : Материалы международной научно-практической конференции. Том Часть 1: Издательство ИИЦ ГНУ СибНСХБ Россельхозакадемии, 2015. – С. 258-261.
32. **Васбиева, М. Т**. Применение осадков сточных вод в качестве удобрения - результаты длительного стационарного опыта / **М. Т. Васбиева** // Проблемы рекультивации отходов быта, промышленного и сельскохозяйственного производства. - Кубанский государственный аграрный университет, 2015. – С. 208-213. – EDN UDQHQH.
33. Завьялова Н. Е. Азотный фонд дерново-подзолистой почвы при различном землепользовании / Н. Е. Завьялова, Д. С. Фомин, **М. Т. Васбиева**, И. С. Тетерлев // Итоги выполнения программы фундаментальных научных исследований государственных академий на 2013-2020 гг. / Под ред. акад. РАН В.Г. Сычева. – Москва: ВНИИА имени Д.Н. Прянишникова, 2018. – С. 92-95.
34. **Васбиева, М.Т.** Изменение азотного режима дерново-подзолистой почвы и продуктивности культур полевого севооборота в результате длительного применения осадков сточных вод / **М.Т. Васбиева** // Экологические проблемы развития агроландшафтов и способы повышения их продуктивности : сборник статей по материалам Международной научной экологической конференции, Краснодар, 27–29 марта 2018 года. – Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, 2018. – С. 168-170. – EDN UOFRRP.
35. **Васбиева, М. Т.** Влияние длительного применения минеральных удобрений на азотный и фосфатный режим дерново-подзолистой почвы / **М.Т. Васбиева** // I НИКИТИНСКИЕ ЧТЕНИЯ "актуальные проблемы почвоведения, агрохимии и экологии в природных и антропогенных ландшафтах" : материалы Международной научной конференции – Пермь: ИПЦ Прокростъ, 2020. – С. 170-174. – EDN GBXMRS.

36. **Васбиева, М.Т.** Фракционный состав минеральных фосфатов дерново-подзолистой почвы при длительном применении минеральных удобрений /**М.Т. Васбиева**, В.Р. Ямалтдинова, Д.Г. Шишков [и др.] // Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства. – Йошкар-Ола: Марийский государственный университет, 2021. – С. 19-22.
37. **Васбиева, М. Т.** Экофизиологические показатели микробных сообществ дерново-подзолистой почвы при длительном применении удобрений / **М.Т. Васбиева** // Проблемы трансформации естественных ландшафтов в результате антропогенной деятельности и пути их решения. – Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, 2021. – С. 676-678. – EDN GRDUZM.
38. Завьялова Н. Е. Критерии оценки антропогенной трансформации органического вещества пахотных дерново-подзолистых почв Предуралья / Н. Е. Завьялова, **М. Т. Васбиева**, В. Р. Ямалтдинова [и др.]. – Пермь: Издательство "От и До", 2021. – 122 с. – EDN MYQDAN.
39. Zavyalova, N. E. Humic acids composition of arable sod-podzolic soil after long-term application of traditional and unconventional organic fertilizers / N. E. Zavyalova, **M. T. Vasbieva** // Agrofor. – 2021. – Vol. 6, No. 3. – P. 125-132. – DOI 10.7251/AGRENG2103125Z. – EDN QMNXPD.
40. Завьялова, Н.Е. Трансформация режимов органического вещества и элементов питания дерново-подзолистой почвы Предуралья при длительном применении минеральных удобрений / Н.Е. Завьялова, **М.Т. Васбиева** // Материалы Международной научной конференции, посвященной 90-летию ФГБНУ "ВНИИ агрохимии" и 80-летию Географической сети опытов с удобрениями. – Москва: ВНИИ агрохимии имени Д.Н. Прянишникова, 2022. – С. 81-93.
41. **Васбиева, М. Т.** Изменение урожайности сельскохозяйственных культур в зависимости от системы удобрения и условий увлажнения вегетационного периода (результаты длительного стационарного опыта) / **М.Т. Васбиева**, В. Р. Ямалтдинова // Развитие современных систем земледелия и животноводства, обеспечивающих экологическую безопасность окружающей среды : Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 110-летию Пермского НИИСХ, Пермь, 05–07 июля 2023 года / Науч. редколлегия: К.Н. Корляков [и др.]. – Пермь: Издательство "От и До", 2023. – С. 24-32. – EDN NLAEEI.
42. Ямалтдинова, В.Р. Влияние систем удобрений на содержание тяжелых металлов и железа в почве и растениях / В. Р. Ямалтдинова, **М.Т. Васбиева**, Д. Г. Шишков // Развитие современных систем земледелия и животноводства, обеспечивающих экологическую безопасность окружающей среды : Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 110-летию Пермского НИИСХ, Пермь, 05–07 июля 2023 года / Науч. редколлегия: К.Н. Корляков [и др.]. – Пермь: Издательство "От и До", 2023. – С. 179-185. – EDN UMMDCW.

43. **Васбиева, М.Т.** Изменение численности основных эколого-трофических групп микроорганизмов в почве при длительном сельскохозяйственном использовании пашни и применении удобрений / **М.Т. Васбиева**, Н.Е. Завьялова, В.Р. Ямалтдинова // Почвы и окружающая среда: Всероссийская научная конференция с международным участием, посвященная 55-летию Института почвоведения и агрохимии СО РАН, Новосибирск, 02–06 октября 2023 года. – Новосибирск, 2023. – С. 223-227. – EDN WCITDW.