Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
ПЕРМСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

УДК 631.45:631.8:631.445.2:631.41:631.879.2

На правах рукописи

ВАСБИЕВА
МАРИНА ТАГИРЬЯНОВНА

АГРОГЕННАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ПЛОДОРОДИЯ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТЫХ ПОЧВ ПРЕДУРАЛЬЯ

Специальность 4.1.3 – Агрохимия, агропочвоведение,
защита и карантин растений

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание учёной степени
доктора биологических наук

Научный консультант:
доктор биологических наук
Н.Е. Завьялова

Москва 2024

ВВЕДЕНИЕ 4
1 СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕННОСТИ ВОПРОСА (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ) 12
1.1 Трансформация режима органического вещества и элементов питания почвы при длительном антропогенном воздействии 12
1.2 Изменение физико-химических свойств почвы при длительном антропогенном воздействии 31
1.3 Изменение биологических свойств почвы при длительном антропогенном воздействии 36
1.4 Урожайность сельскохозяйственных культур при применении различных систем удобрения 41
1.5 Экологические аспекты применения удобрений 47
1.6 Использование осадков сточных вод в качестве удобрения 54
2 УСЛОВИЯ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ 64
2.1 Объекты и методика исследований 64
2.2 Методика наблюдений и анализов 69
2.3 Почвенные условия проведения исследований 76
2.4 Климатические условия проведения исследований 78
3 РЕЖИМ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПАШНИ И ПРИМЕНЕНИИ УДОБРЕНИЙ 83
3.1 Содержание органического углерода в почве 83
3.2 Аккумуляция атмосферного углерода полевыми культурами, почвенная секвестрация при использовании различных систем удобрения и углеродпротекторная емкость почвы 99
3.3 Элементный состав и структура гуминовых кислот дерново-подзолистой почвы 110
4 АЗОТНЫЙ РЕЖИМ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПАШНИ И ПРИМЕНЕНИИ УДОБРЕНИЙ 125
5 ФОСФАТНЫЙ РЕЖИМ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПАШНИ И ПРИМЕНЕНИИ УДОБРЕНИЙ 153
5.1 Содержание общего фосфора, его органических, минеральных и подвижных соединений 153
5.2 Фракционно-групповой состав минеральных фосфатов почвы 179
6 КАЛИЙНЫЙ РЕЖИМ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПАШНИ И ПРИМЕНЕНИИ УДОБРЕНИЙ 190

7 ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПАШНИ И ПРИМЕНЕНИИ УДОБРЕНИЙ 219
8 МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПАШНИ И ПРИМЕНЕНИИ УДОБРЕНИЙ 240
8.1 Численность микроорганизмов основных эколого-трофических групп почвы 240
8.2 Экофизиологические параметры микробоценоза почвы 262
9 ВЛИЯНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ УДОБРЕНИЙ НА ПРОДУКТИВНОСТЬ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР, БАЛАНС ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА И ЭЛЕМЕНТОВ ПИТАНИЯ..... 275
9.1 Урожайность полевых культур..... 275
9.2 Балансы органического углерода и NPK..... 286
9.3 Корреляционно-регрессионный анализ между урожайностью культур и показателями плодородия почвы..... 296
10 ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ДЛИТЕЛЬНОГО ПРИМЕНЕНИЯ УДОБРЕНИЙ..... 309
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 339
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 345
ПРИЛОЖЕНИЯ..... 423

ВВЕДЕНИЕ

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.

1 СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕННОСТИ ВОПРОСА (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ)

Удобрения – это сильнодействующий антропогенный фактор, который влияет на естественные почвенные процессы и приводит к изменению параметров плодородия. Степень и направленность влияния удобрений зависит от большого количества факторов - особенностей почвы, доз и форм применяемых удобрений, возделываемых культур, климатических особенностей региона, длительности использования и др. (Гомонова, Минеев, 2012; Минеев и др., 2013; Сычёв и др., 2014; Хайдуков и др., 2014; Гамзиков, 2016; Кузьменко, 2018; Мёрзлая, 2018; Сычёв и др., 2020; Налиухин, 2021; Dai et al., 2017; Wanga et al., 2019).

1.1 Трансформация режима органического вещества и элементов питания почвы при длительном антропогенном воздействии

Органическое вещество почвы

Содержание органического вещества (ОВ) в почве играет важнейшую роль в формировании плодородия почвы и обеспечения её экологических функций. Разработка устойчивого управления органическим веществом почвы является серьезной проблемой для сельского хозяйства, качества окружающей среды и сохранения земель. Не рациональное ведение сельского хозяйства привело к истощению почв по органическому углероду на 25–75% от исходного уровня в большинстве почв мира (Lal, 2013; Maltas et al., 2018) Поэтому изучение режима органического вещества, также как и раньше, имеет существенное научное и практическое значение. Размеры потерь и прироста ОВ в почве зависят от вида и регулярности применения удобрений, количества поступающих пожнивно-корневых остатков, их биохимического качества, свойств почвы, погодных условий, агротехнических мероприятий и других факторов (Гамзиков, Кулагина, 1990; Шарков, 2011; Семенов, Когут,

2015; Синявский, 2015; Окорков, 2017; Лебедева и др., 2018; Зезин и др., 2019; Новоселов, Кузьминых, 2019; Мамонтов и др., 2020).

Органические удобрения оказывают на содержание гумуса прямое влияние, обогащая почву органическим материалом и косвенное - посредством изменения урожайности возделываемых культур и свойств почвы (Гамзиков, Анкудович, 2018). По данным ряда исследований применение органических удобрений в умеренных дозах сдерживает потерю ОВ пахотных почв, а в повышенных дозах способствует стабильному и существенному его приросту (Лыков и др., 2004; Литвинский и др., 2010; Семёнов, Когут, 2015; Гамзиков, Анкудович, 2018; Косолапова и др., 2018; Зезин и др., 2019; Лукин и др., 2021; Maltas et al., 2018; Menšík et al., 2019). Увеличение органического углерода ($C_{орг}$) более заметно на почвах тяжелого гранулометрического состава, что связано со скоростью минерализации. Применение органических удобрений не препятствует потере ОВ в дерново-подзолистых почвах легкого гранулометрического состава (Лапа, Кулеш, 2015; Кузьменко, 2017; Мёрзлая, 2018, Кузьменко, 2022). Вопрос о влиянии минеральных удобрений на содержание ОВ в почвах является дискуссионным. Одни авторы, считают, что исходя из непропорциональности роста урожаев и количества корневых остатков, невозможно с помощью одних минеральных удобрений поддерживать содержание $C_{орг}$ на постоянном уровне (Лапа, Кулеш, 2015; Семенов, Когут, 2015; Menšík et al., 2018; Allam et al., 2022). Данные отдельных опытов в нашей стране и за рубежом показали, что применение минеральных удобрений на дерново-подзолистых почвах снизило содержание $C_{орг}$ в них на 11–34 % (Шевцова и др., 2012; Хайдуков и др., 2014; Кузьменко, 2017; Лукин и др., 2021). Минеральные удобрения оказывали длительное неблагоприятное воздействие даже после 19 лет последействия (Хайдуков и др., 2014). Убыль ОВ при минеральной системе удобрения наиболее свойственна почвам с высоким исходным уровнем содержания $C_{орг}$ (Шевцова и др., 2012). Другие авторы утверждают, что внесение минеральных

удобрений способно поддерживать постоянный уровень содержания ОВ или обеспечивать его увеличение в почве. Это происходит благодаря росту количества поступающего в почву органического материала, изменению физико-химических свойств почвы, численности и активности почвенных микроорганизмов (Гамзиков, Кулагина, 1990; Дьяконова и др., 1990; Завьялова и др., 2014; Семенов, Когут, 2015; Гамзиков, Анкудович, 2018; Чебаторев и др., 2021; Бортник и др., 2022; Пинаева, Акманаева, 2022). В работах К.В. Дьяконовой (1990), Н.Е. Завьяловой (2014), А.Ю. Гавриловой (2021) и соавторов отмечается, что сохранению и увеличению исходного содержания ОВ в почве способствовало применение минеральных удобрений только в высоких дозах $N_{120\text{-}180}P_{120\text{-}180}K_{120\text{-}200}$. Существенное увеличение содержания гумуса на 0,57-1,34 % под влиянием длительного 40-летнего применения минеральных удобрений $N_{63}P_{64}K_{64}$ показано в работе Т.Ю. Бортник с соавторами (2022). По данным Б.С. Носко (2013) на черноземе типичном рост содержания ОВ при внесении NPK стали наблюдать только с четвертой ротации севооборота.

Наибольшие изменения в гумусовом состоянии почв происходят в первые годы. Далее содержание гумуса стабилизируется на новых уровнях соответствующих поступлению органического вещества с растительными остатками и органическими удобрениями и его минерализации (Когут и др., 2021; Лукин и др., 2021). На черноземе типичном при распахивании многолетней залежи основные потери ОВ (20–25%) в пахотном (0– 30 см) и подпахотном (30–60 см) слоях наблюдали к концу второй ротации севооборота, в третье-шестой ротациях содержание гумуса существенно не изменялось (Носко, 2013).

Обобщение результатов исследований продолжительностью от 2 до 56 лет, выполненных в 137 разных местах мира, показало, что при возвращении растительных остатков в почву применение азотных удобрений в 79 % случаев способствовало увеличению содержания $C_{орг}$, в 15 % случаев снижало и 6 % не изменяло. Если суммарное количество внесенного азота

удобрений за весь период проведения опыта было выше 1 т/га, обеднение почвы $C_{орг}$ не происходило (Когут, Семенов, 2015). Существенное преобладание минерализационных процессов в почве при использовании моноазотной системы удобрений отмечено в работах А.И. Иванова (2010), В.В. Лапы с соавторами (2018). В исследованиях А.И. Иванова (2000) на фоне моноазотной системы удобрения за 12 лет содержание гумуса в почве снизилось на 0,22–0,32 %. По данным Н.Н. Дмитриева, Г.П. Гамзикова (2015) на серой лесной почве наоборот наибольший прирост количества углерода в почве происходил при использовании азотных удобрений (N, NP, NPK).

В ряде исследований отмечено увеличение содержания органического вещества в почве или поддержание его на исходном уровне только при применении органоминеральной системы удобрений (Мёрзлая, 2018; Савоськина и др., 2022; Liu et al., 2006; Yuan et al., 2013; Körschens, Kubát, 2015). Однако в работе В.В. Лапы с соавторами (2014) показано, что внесение 40 т/га соломистого навоза в сочетании с минеральными удобрениями было недостаточным для устранения потерь ОВ за ротацию севооборота.

Азотный режим почвы

Азот практически для всех почв является основным фактором, определяющим продуктивность сельскохозяйственных культур и качество получаемой сельскохозяйственной продукции (Сычев и др., 2009; Алфёров, 2020). Проблеме азота в земледелии России посвящены научные работы Д.Н. Прянишникова (1931; 1976), Ф.В. Турчина (1972), Е.Н. Мишустина, В.К. Шильниковой (1968), П.М. Смирнова (1973), Г.П. Гамзикова (1981, 2013), Д.А. Коренькова (1976; 1999), О.А. Соколова (1994, 2015), В.Н. Кудеярова (1989), А.А. Завалина (2003, 2019).

Основной резерв и источник азотного питания растений - органическое вещество. На долю минерального азота почвы (нитраты, нитриты, аммоний) приходится около 1-5 % от общего содержания. Поэтому азот в пахотных почвах часто бывает в первом минимуме (по обеспеченности питания

растений), так как органические соединение минерализуются медленно. Содержание азота, его запасы, формы и подвижность в существенной степени определяют плодородие почвы. Главным участником процессов превращения и трансформации различных форм азота в почве являются микроорганизмы (Лыков и др., 2004, Звягинцев и др., 2005).

В поверхностном горизонте почв валовое содержание азота колеблется от 0,10 до 0,85 % и зависит от типа почв, их гранулометрического состава, степени окультуренности, содержания органического вещества и многих других факторов (Минеев, 2004). Общее количество азота почвы и его динамика коррелирует с распределением $C_{орг}$ и подчиняется тем же закономерностям. При распашке целинной почвы происходит быстрое падение запасов азота в почве, интенсивность зависит от его исходного количества и длительности использования пашни. Содержание азота снижается вниз по профилю почвы (Пискунов, 1994, Лыков и др., 2004, Сычёв и др., 2009).

Для оценки качественного состава азота почв широкое применение получил метод кислотного гидролиза, разработанный Ф.К. Воробьёвым, в последующем модифицированный Э.И. Шконде и И.Е. Королёвой. По данной методике весь азот, содержащийся в почве, делят на 4 фракции: 1 – минеральная (нитратный, нитритный, обменный аммоний); 2 – легкогидролизуемая (амиды, часть аминов); 3 - трудногидролизуемая (амины, часть амидов, часть необменного аммония и азота гуминов); 4 – негидролизуемая (азот гуминов, меланинов, битумов, необменный аммоний) (Шконде, Королева, 1964). Этот метод позволяет достаточно объективно судить о качественных и количественных преобразованиях азота в почве при использовании агрохимикатов, а также определить степень участия соединений азота в питании растений.

Фракция негидролизуемого азота, представленная более стойкими к гидролизу и микробиологическому разложению органическими азотсодержащими соединениями, необменным аммонием, составляет

большую часть валовых запасов азота - 58-82 % от общего содержания. На втором месте находится трудногидролизуемая – 5-28 % и на третьем легкогидролизуемая фракция – 4-16 %. На долю минеральной фракции приходится всего 0,3-4,2 % (Помазкина, 1980, Хабиров, 1992, Пискунов, 1994, Безносиков, 2000, Назарюк, 2002, Сычёв и др., 2009, Завьялова и др., 2019; Бутенко, Ульянова, 2019).

Содержание минерального азота в почве является важным показателем плодородия почвы и обеспеченности сельскохозяйственных культур данным элементом. До настоящего времени остаётся дискуссионным вопрос использования минерального азота по профилю почвы. Одни авторы установили наиболее тесную корреляционную зависимость между урожайностью сельскохозяйственных культур и содержанием минерального азота в метровом слое почвы, а другие исследователи считают, что можно ограничиться глубиной 40 или 60 см. (Кореньков и др., 1986; Корчагина, Шафран, 1988; Мальцев, 1988; Никитишен, 2004; Кидин, Ильюк, 2006; Кидин, Украинская, 2016; Морозова и др., 2021). Внесение органических и минеральных удобрений стимулирует процессы миграции минерального азота (Никитишен, 1979, 1985, Захаров, 1993, Шмырева, 1998, Завалин и др., 2015; Роева и др., 2022).

Результаты исследований, проведенных на базе длительных опытов России, стран Западной Европы и Америки, подтверждают, что на разных типах почвы, от подзолистых до южных латеритов, отмечается снижение содержания органического вещества и соответственно азота при возделывании культур без систематического применения удобрений. Абсолютные и относительные размеры убыли азота неодинаковы для различных районов и зависят от целого ряда факторов: от исходного количества азота в почве, длительности использования пашни, климата, гранулометрического состава почвы, системы земледелия. Применение удобрений приводит к количественным и качественным изменениям в азотном режиме почв (Лаков и др., 2004; Сычев и др., 2009).

Минеральные удобрения при длительном применении способствует установлению бездефицитного баланса азота в почвах подзолистого типа, но в условиях повышенной минерализации органического вещества (черноземные почвы, интенсивная паровая обработка, пропашные культуры) оно оказывается малоэффективным в уменьшении потерь органического вещества и азота. Введение в севооборот бобовых многолетних трав также является недостаточным для создания бездефицитного баланса азота даже при высоком насыщении севооборота травами (до 40%). Наиболее действенным средством регулирования азотного фондов почвы, поддержания и улучшения плодородия почв считается применение органических удобрений (навоз, сидераты) и совместное использование органических и минеральных удобрений (Пискунов, 1994; Лыков и др., 2004; Сычев и др., 2009; Мазиров, Арефьева, 2012; Бутенко, Ульянова, 2019; Гамзиков, Сулейменов, 2020; Wang et al., 2013; Yang et al., 2016).

Длительное использование моноазотной системы удобрения замедляет темпы деградации азотного состояния, однако значительно ускоряет деградацию фосфатного и калийного состояний окультуренных дерново-подзолистых почв (Лапа и др., 2018). Наиболее критично влияние моноазотной системы удобрения на калийное состояние почвы – по данным В.В. Ильющенкова (2000) за 13 лет содержание подвижного и водорастворимого калия снижалось в два раза.

Влияние длительного применения различных систем удобрений на изменение фракционного состава азота почвы отличается по накоплению азота в отдельных фракциях и по изменению в соотношениях фракций. Исследования показывают, что длительное внесение удобрений как органических, так и минеральных, приводит в первую очередь к повышению содержания в почве минерального и легкогидролизуемого азота (Назарюк, 2002; Лыков и др., 2004; Гомонова, 2010; Гомонова, Минеев, 2012; Завьялова и др., 2019; Zhang et al., 2012; Dai et al., 2017). В работе В.Е. Егорова с соавторами (1972) показано, что длительное применение минеральных

удобрений (более 40 лет) в шестипольном севообороте на дерново-подзолистой почве повысило в почве содержание всех фракций азота в 1,2-1,4 раза, минеральных удобрений в сочетании с навозом - в 1,4-1,8 раза. В некоторых опытах применение минеральных удобрений снижало количество трудногидролизуемых фракций (Новоселов и др., 2012). По данным М.А. Бобрицкой и Т.А. Бойко (1977) на дерново-подзолистых суглинистых и супесчаных почвах закрепление и накопление азота происходило в большей степени в легкогидролизуемых и трудногидролизуемых фракциях. В длительном стационарном опыте на чернозёме южном через 42 года отмечено снижение общего азота и его фракций, как в контрольном варианте, так и при внесении минеральных удобрений (Сайфуллина и др., 2017). В исследованиях А.А. Новикова (2020) применение навоза и минеральных удобрений в средних (7,0 т навоза + $N_{43}P_{30}K_{24}$) и особенно в повышенных дозах (11,2 т навоза + $N_{64}P_{42}K_{42}$) на черноземе обыкновенном разной степени эродированности увеличивало фракцию негидролизуемого азота, не участвующую в питании растений, остальные формы азота снизились. Автор отмечает, что применение удобрений способствует трансформации с течением времени подвижных форм азота почвы и удобрений в неусвояемые для растений формы.

Количество азота, которое закрепляется в почве, после внесения удобрений может варьировать от 4 до 79 % (метод изотопной индикации). Количество иммобилизованного азота зависит от многих факторов: климатических условий, дозы и вида удобрения, способа применения, возделываемой культуры и типа почвы (Будажапов и др., 2018; Семенов, 2020; Завалин и др., 2022). Закрепление азота удобрений тесно связано с фиксацией глинистыми минералами (Могилевкина, 1970, 1973; Шилова, 1969; 1982; Кидин, Украинская, 2016), включением в органическое вещество почвы (Лаврова, Филимонов, 1976; Лаврова, 1992, Назарюк, 2002; Сычёв и др., 2009, Шустикова, Шаповалова, 2014, Кидин, Украинская, 2016), поглощением растениями и микроорганизмами (Турчин, 1964; Тарвис, 1977;

Сапожников и др., 1978; Семёнов и др., 1999). По данным В.Н. Кидина (2016) наряду с использованием минерального азота из разных слоев почвы растениями, часть его (10–39%) закреплялась в органическом веществе почвы, и значительная часть (17–92%) терялась в результате денитрификации и вымывания нитратов.

Установлено, что в сопоставимых условиях при внесении органических удобрений в почве закрепляется больше азота, чем при использовании минеральных. По доступности растениям азот органических удобрений значительно уступает азоту минеральных удобрений, что отражается в величине КИУ. В случае внесения органического удобрения в сочетании с минеральным растения используют доступный азот гораздо лучше, чем при внесении только минеральных удобрений, независимо от подбора доз и соотношений азота с другими элементами питания (Назарюк, 2002).

Длительное применение азотных удобрений ведёт к устойчивому снижению иммобилизации азота удобрений и большему использованию растениями (Смирнов, 1977, Кореньков и др., 1984). По данным В.Г. Сычёва с соавторами (2009) отмечается, что при ежегодном внесении азотных удобрений, устанавливается динамическое равновесие между процессами мобилизации и иммобилизации азота в почве (наступает состояние гомеостаза). Избыточное поступление азота приводит к неэффективному использованию азотных удобрений и опасному загрязнению сельскохозяйственных и сопряженных с ними ландшафтов. В случае же недостаточного поступления азота происходит истощение почвы за счет ускоренной минерализации органического вещества. Показано, что средние величины потерь азота удобрения при выращивании сельскохозяйственных культур составляют 10–59% от применяемой дозы (Романенков и др., 2020).

С помощью метода изотопной индикации было установлено, что во многих случаях при внесении азотных удобрений растения потребляют большее количество азота почвы по сравнению с растениями контрольного или фонового вариантов. При внесении удобрений, происходит

дополнительная минерализация азота почвы, который получил название в специализированной литературе «экстра» азот (Кореньков, Руделёв, 1988; Семёнов В.М., 1999; Дзюин, 2019). В связи с этим применение удобрений необходимо рассматривать не только как фактор прямого действия в качестве источника питания растений, но и косвенного. Дополнительное потребление азота из почвы связано с усилением физиологической активности корней растений, микробиологической деятельности, изменения гидротермических условий и другими факторами. В зависимости от условий выращивания и биологических особенностей возделываемые культуры могут дополнительно усваивать от 5 до 53 % (от общего выноса) азота почвы (Сычёв и др., 2009).

Фосфатный режим почвы

Фосфор является одним из наиболее важных и дефицитных элементов минерального питания растений. Хорошая обеспеченность фосфором при оптимальном соотношении с другими макро- и микроэлементами способствует получению высоких урожаев сельскохозяйственных культур и улучшению качества продукции. Недостаток доступных растениям форм фосфора в мире наблюдается на половине площадей почв сельскохозяйственного назначения на фоне истощения легкодоступных месторождений этого элемента (Cramer, 2010; Богдевич, 2019).

В формировании фосфатного режима почв важную роль играют запасы общего фосфора, содержание его минеральных и органических форм. Главным источником соединений фосфора для почв служат почвообразующие породы. Для каждого типа почв существует определенное равновесие в накоплении органического и минерального фосфора, обусловленное генетическими особенностями почв, общим направлением почвообразовательного процесса и степенью их окультуренности. Минеральные фосфаты в почве, как правило, преобладают над органическими. Минеральные формы почвенного фосфора представлены в основном фосфатами кальция и магния разной основности и подвижности и

фосфатами оксидов железа и алюминия (Адрианов, 2004; Титова и др., 2005; Сычёв, Кирпичников, 2009).

Установлено, что для растений наиболее предпочтительной формой существования фосфора в почвах являются его соединения с кальцием. Несмотря на слабую степень подвижности фосфат-иона из Са-содержащих соединений, они используются растениями даже при значительно меньшем насыщении почвы фосфором (Адрианов, 2004; Титова и др., 2005; Сычёв, Кирпичников, 2009).

Устойчивость различных минеральных соединений фосфора в значительной степени зависит от почвенных условий, в частности, от величины кислотности почвенного раствора. Установлено, что фосфаты кальция наиболее устойчивы в условиях щелочной или близкой к нейтральной реакции среды, а растворимость этих соединений увеличивается с её подкислением. Фосфаты оксидов железа и алюминия, наоборот, более устойчивы в кислых условиях среды, при подщелачивании же переход в раствор содержащейся в них P_2O_5 увеличивается (Адрианов, 2004; Титова и др., 2005).

Растения отчасти сами могут переводить фосфор в легкоусвояемые формы. В почвенных растворах, выделенных из образцов дерново-подзолистой суглинистой почвы, отобранных в зоне корневой системы сельскохозяйственных культур (ячмень, кукуруза, картофель, лен), фосфора содержалось больше, чем в растворах почвенных образцов парового поля, даже в периоды усиленного потребления его растениями. Корневые выделения исследуемых растений и выделения ризосферных микроорганизмов оказывали растворяющее влияние на труднорастворимые фосфорсодержащие соединения почвы (Дзюин, 2020).

Наиболее существенные масштабные процессы трансформации, поглощения и миграции фосфатов происходят с участием почвенного раствора, в который переходят наиболее подвижные, растворимые формы фосфатов. В почвенном растворе присутствует лишь малая доля общего

фосфора, содержащегося в почве вообще, состав и формы фосфатов в почвенном растворе могут существенно отличаться от таковых в твердой фазе почвы, в связи, с чем при изучении фосфатного режима почв исследованию фосфатов почвенного раствора следует уделять особое внимание (Аргунова, 1974; Дзюин, 2020). По данным В.М. Клечковского (1945) концентрация фосфора в почвенном растворе составляет 0,05-1,0 мг/л, а минимальная концентрация фосфора, при которой растения могут его усваивать - 0,01-0,03 мг/л P_2O_5.

Нерациональное сельскохозяйственное использование может в значительной степени изменить фосфатный режим почвы. В почве нарушается сложившийся круговорот фосфора, формируется отрицательный баланс (Волынкина, 2020; Кайгородов и др., 2017; Сычёв и др., 2020), наблюдается снижение доступных форм фосфора для растений (Косолапова и др., 2018; Красницких и др., 2020; Цветнов и др., 2020).

В отличие от азота в природе не существует естественных источников пополнения запаса фосфора в почве. Поэтому основной путь поддержания оптимального питания растений фосфором - внесение минеральных и органических удобрений. Процессы, происходящие между внесением удобрений и образованием конечных продуктов, зависят от множества факторов. Применение удобрений, особенно в высоких дозах, может способствовать формированию окультуренных почв с характерным для них фосфатным режимом отличным от природных аналогов (Митрофанова, 2017; Frense et al., 2020; Li et al., 2020).

Фосфорные удобрения в прямом действии используются растениями лишь на 5-15 %. Только на почвах низкой обеспеченности фосфатами коэффициент использования фосфорных удобрений может достигать 15–20, а за севооборот – 40 %. Объясняется это ограниченной позиционной доступностью удобрений для корневых систем в связи с их слабой способности к диффузии (Лапа и др., 2019; Дзюин, 2020).

Внесение удобрений в первую очередь увеличивает содержание подвижных форм фосфора в почве, увеличивает их подвижность, в результате чего увеличивается доступность фосфора растениям (Минеев, Гомонова, 2005; Дзюин, 2020 Наумченко, Разумова, 2022). Относительное возрастание содержания подвижных форм элемента по сравнению с увеличением валового содержания гораздо более существенно (Кириллова, Жуков, 2004; Титова и др., 2005). Также наблюдается резкое нарушение сложившегося равновесия между органическими и минеральными формами фосфора. Согласно расчетам Гриффита (Титова и др., 2005), около 78 % фосфора удобрений остается в почвах в минеральных соединениях.

При длительном систематическом внесении минеральных и органических удобрений происходит трансформация структуры фосфатного фонда почвы. Это связано с изменением процессов сорбции и десорбции фосфат-ионов почвы, минерализацией органических соединений, мобилизацией фосфора из труднорастворимых соединений и влиянием других факторов (Донских, Копылова, 1982; Нефедьева, Варламова, 2014; Рогова и др., 2018; Наумченко, Разумова, 2022; Menezes-Blackburn et al., 2018; Szara et al., 2019; Frense et al., 2021). Поступление в почву органических удобрений также обеспечивает нормальное функционирование почвенных микроорганизмов. Что является важнейшим условием оптимизации фосфатного питания растений

Изменение структуры фосфатного фонда почвы наблюдается и при экстенсивном возделывании культур. В работе Е.Т. Наумченко и К.Ю. Разумовой (2022) показано, что в контрольном варианте по истечении 45-ти лет возделывания сельскохозяйственных культур, происходило увеличение доли алюмофосфатов в 2,3, а 55-ти лет – в 3 раза относительно конца 2-й ротации (10-летнего периода), одновременно доля железофосфатов снизилась на 13 %.

Изучая влияние разных видов фосфорсодержащих удобрений на фосфатный режим почв, Л.И. Никифоренко и В.Н. Лебединская (1983)

отмечали, что минеральные удобрения, применяемые в повышенных дозах без навоза, заметно подкисляли почву и обуславливали образование фосфатов оксидов железа и алюминия, тогда как регулярное применение навоза создавало условия для образования высокоосновных фосфатов кальция. Внесение водорастворимых фосфорных удобрений обеспечивало увеличение доли фосфатов алюминия (Носко, Христенко, 1996; Титова и др., 2005; Лыскова и др., 2015).

По данным С.Н. Адрианова (2004) при систематическом применении удобрений в дерново-подзолистой почве значительно увеличивается количество наиболее растворимых и доступных растениям фосфатов щелочных металлов и свежеосажденных фосфатов кальция и магния, что является общей закономерностью для многих почв.

Накопление органофосфатов в почве и увеличение их доли относительно общего количества в результате применения удобрений отмечено в исследованиях И.К. Хабирова с соавторами (1995), В.В. Нефедьевой, Л.Д. Варламовой (2014), А.С. Заришняк с соавторами (2014). Максимальное увеличение наблюдали при использовании органоминеральной системы удобрений.

В работе В.В. Нефедьевой и Л.Д. Варламовой (2014) при внесении минерального фосфора в вариантах P, NP и PK накопление данного элемента было достоверно более низким, чем при внесении полного минерального удобрения несмотря на равное поступление фосфора в почву. Авторы объясняют это неодинаковым развитием корневой системы растений. При сбалансированном питании NPK, развивается более мощная корневая система, способная «перекачивать» фосфор из более глубоких слоев почвы, обогащая тем самым пахотный горизонт.

Принято считать, что вынос фосфора в нижележащие слои почвы обычно не происходит (Адрианов, 2004; Сычёв, Кирпичников, 2009). И лишь на легких и среднесуглинистых почвах при длительном применении удобрений и выпадении обильных осадков часть фосфора может

передвигаться в нижележащие горизонты (Дзюин, 2020). Основной формой миграции химических элементов являются водорастворимые органоминеральные комплексы, способные как к стабилизации, так и к миграции (Фокин и др., 1973; Кауричев и др., 1978). Между количеством адсорбируемых фосфатов и содержанием в почве фракции органоминеральных комплексов существует высокая положительная корреляция (Фокин, 1975). Миграция соединений фосфора вглубь почвы возможна с железо(алюминий)содержащих природных сорбентах, особенно на кислых зафосфаченных почвах (Кудеярова, Алексеева, 2012; Кудеярова, 2016).

В исследованиях В.И. Титовой, проведённых на дерново-подзолистых почвах, показано, что при высоком содержании подвижных соединений фосфора в почве увеличивается вероятность его миграции по профилю. Расстояние миграции определяется дозой и видом вносимых удобрений, фракционным составом почвенного фосфора, а также особенностями генетического строения почв. Глубина проникновения достигает 40-80 см (Титова и др., 2005). В работе В.Г. Минеева, Н.Ф. Гомоновой (2009) отмечается изменение фосфатного режима дерново-подзолистой почвы в результате применения различных систем удобрения до глубины 40-60 см. Е.П. Шустикова и Н.Н. Шаповалова (2014) отмечают положительное влияние минеральных удобрений на накопление подвижного фосфора в метровом слое почвы (чернозём обыкновенный).

В.Г. Минеев с соавторами (2009) основными факторами, определяющими передвижение фосфора, называет насыщение фосфатной емкости пахотного слоя почвы, а также перенос фосфора корневыми системами растений и его накопление при их отмирании. Отмечается, что перемещение фосфатов в подпахотный слой на дерново-подзолистой среднесуглинистой глееватой почве происходило при содержании подвижного фосфора (по Кирсанову) в пахотном слое > 250 мг P_2O_5/кг почвы.

Калийный режим почвы

Калий - важный элемент питания, который играет существенную роль в различных физиологических и биохимических функциях растений. Сбалансированное внесение питательных веществ всегда способствует лучшему росту и развитию растений. Вынос калия урожаем всегда больше, чем фосфора, а часто и азота. Многие ученые считают, что регулированию режима калия уделяется недостаточное внимание по сравнению с азотом и фосфором. Обоснованием такого подхода к оптимизации минерального питания выращиваемых культур служит достаточно высокое содержание валового калия в почвах и наличие большого числа противоречивых исследований по влиянию калийных удобрений на урожайность сельскохозяйственных культур и показатели плодородия почвы. Однако есть данные, что даже при значительных валовых запасах этого элемента калийное питание может лимитироваться сорбционно-десорбционными процессами. Также до конца не выяснен механизм преобразования калийных соединений в почве. Очень важно знать природу трансформационных процессов в системе «почва – удобрение – растение» с позиций как возможностей мобилизации имеющихся запасов почвенного калия, так и сохранения определенной устойчивости калийного фонда почвы (Прокошев, Дерюгин, 2000; Носов, 2002; Беляев, 2005; Митрофанова, 2010; Лукин, 2012; Никитина, 2018; Jakobsen, 1993; Khan et al., 2014; Grzebisz et al., 2020, Meyer et al., 2020).

Калийный фонд почвы обычно подразделяют на четыре составляющие: калий почвенного раствора, калий обменный, калий необменный, калий минерального скелета; первые три из них в значительной мере взаимосвязаны и определяют эффективное плодородие почвы в отношении этого элемента (Якименко, Бойко, 2019).

При длительном экстенсивном использование почвенных ресурсов отмечается снижение содержания обменного калия, как в пахотном горизонте, так и до глубины 50-100 см почвы (Окорков, 2002; Синявский,

2002; Беляев, 2005; Носко, 2013; Никитина, 2015; Якименко, 2019а). После распашки залежи через 30 лет сельскохозяйственного использования (без удобрений) отмечено уменьшение валового содержания калия в пахотном слое с 2,15 до 1,9 % (Носко, 2013). Немногочисленные пока исследования указывают на вероятность возникновения такой экологической проблемы, как преобразование ценных калийсодержащих минералов в условиях не восполнения потерь калия (Чижикова, 2002, Li et al., 2017, Firmano et al., 2020). При этом нарушаются механизмы саморегуляции содержания почвенных калийных форм и происходит истощение их подвижных фракций, деградирует эффективное и потенциальное плодородие почвы (Якименко, 2019а). Кроме того, нарушается природный минерало-геохимический фон, контролирующий видовое многообразие организмов и условия их существования (Алексеенко, 2000).

По данным Л.В. Никитиной, И.В. Володарской (2002), В.Н. Якименко (2003) содержание подвижного калия в почвах при длительном некомпенсируемом выносе сельскохозяйственными культурами постепенно достигает определенного «минимального» уровня, который впоследствии практически не изменяется, несмотря на продолжающееся потребление культурами почвенного калия. В.Н. Якименко и В.С. Бойко (2019) отмечают, что этот «минимальный» уровень подвижного калия, часто по градациям, особенно на относительно тяжелых почвах (средне-, тяжелосуглинистых), оценивается как средняя или даже повышенная обеспеченность почв элементом; стабильность же данного показателя ошибочно трактуется как устойчивое и благополучное почвенное калийное состояние с соответствующими выводами о целесообразности применения калийных удобрений. Стабилизация содержания подвижного калия в почве на «минимальном» уровне свидетельствует о существенном участии в питании растений других его форм, более прочно связанных с минеральным скелетом почв. В работе С.М. Лукина (2012) показано, что по сравнению с бессменным чистым паром в контрольном варианте опыта содержание легкоподвижной

формы калия в зернопропашном севообороте снизилось на 24–49%, обменной – на 27–34%, необменной – на 10–20%; отмечена тенденция снижения валового содержания калия, включая калий минерального скелета почвы.

Длительное применение удобрений оказывает влияние на изменение калийного фонда почвы, направленность обусловлена генетическими свойствами исследованных почв, видами, дозами и длительностью внесения органических и минеральных удобрений (Дербенёва, 1994; Якименко, 2003; Беляев, 2005; Лукин, 2012; Окорков и др., 2014; Никитина, 2018, Акманаева, 2019; Сычёв, Никитина, 2021). По данным Л.В. Никитиной (2018) на дерново-подзолистых почвах разного гранулометрического состава положительный баланс по калию складывался только при систематическом внесении минеральных и органических удобрений со среднегодовыми дозами более K_{90}. При этом в почвах легкого гранулометрического состава наблюдали увеличение содержания подвижного калия. В почвах тяжелого гранулометрического состава накопление калия происходило в разных по доступности формах. При среднегодовых дозах менее K_{90} складывался дефицитный или уравновешенный баланс, достоверных изменений в калийном режиме почвы не отмечено. По данным Л.В. Яковлевой с соавторами (2018) для поддержания исходного содержания в почве калия, с учетом выноса растениями, требуется ежегодно вносить 130 кг/га д.в. калийных удобрений. В исследованиях Л.В. Никитиной (2018а) показано, что только совместное внесение органических и минеральных удобрений, по сравнению с минеральными, способствовало формированию запаса калия в почве и сохранению минеральной части почвы от разрушения. Существенное влияние на калийный режим почвы оказывает вид севооборота (Акманаева, 2019).

Существенную роль в удержании калия в пахотном горизонте имеет применение органических удобрений. Способность почвы фиксировать

калий, в которую длительно вносили NPK, уменьшается (Шаймухаметов, Петрофанов, 2008).

По данным Е.Г. Лямцевой и А.И. Иванова (2008) длительное применение азотных удобрений N_{120} с 1987 по 2004 гг. в полевом севообороте «картофель ранний – рожь озимая – свекла кормовая – овес – кукуруза – ячмень» на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве привело к резкому снижению содержания в ней различных форм калия. Количество подвижного калия снизилось с 499 до 175 мг/кг (в 2,9 раза), водорастворимого со 195 до 24 мг/кг (в 8,1 раз) и необменного с 1793 до 532 мг/кг (в 3,4 раза). Внесение 60 кг/га K_2O в варианте $N_{90\text{-}120}P_{60}K_{60}$ хотя и несколько замедляло, но не предотвращало деградацию калийного состояния.

В научной литературе ведутся дискуссии о степени участия подпахотных горизонтов почвы в снабжении калием выращиваемых культур: одни авторы отводят этим горизонтам существенную роль, другие считают их вклад незначительным. В ряде работ на различных почвах установили, что весь внесенный с удобрениями калий концентрировался в пахотном слое почвы (Минеев и др., 1988; Убугунов, Убугунова, 1999; Филон, Шеларь, 1999; Тютюнов и др. 2017; Якименко, 2019; Sui et al. 2017). В других исследованиях отмечено перемещение калия при применении калийных удобрений до глубины 40 см, 60 см, 100 см и даже за пределы метрового и полутораметрового почвенного слоя (Липкина, 1986; Мартынович, Мартынович, 1992; Носов, 2002; Прокошев, Дерюгин, 2000; Беляев, 2005; Никитина, 2018; Яковлева и др., 2018).

Встречаются сведения, о том что, наличие иона хлора, поступающего с калием хлористым, неблагоприятно сказывается на физических свойствах почвы, качестве основных пищевых и кормовых культур и имеет серьёзные последствия для здоровья человека (Jakobsen, 1993, Khan et al., 2014).

1.2 Изменение физико-химических свойств почвы при длительном антропогенном воздействии

Наиболее ярким неблагоприятным свойством дерново-подзолистых почв является их повышенная кислотность, которая является одной из главных причин низкого плодородия почв и недостаточной эффективности удобрений. Процессы подкисления почв и снижения суммы обменных оснований связаны с выщелачиванием из почвенного профиля в условиях промывного режима катионов кальция, магния, калия, с выносом данных катионов урожаем сельскохозяйственных культур, а также загрязнением окружающей среды. Основным способом улучшения показателей почвенной кислотности является известкование (Небольсин, Небольсина, 1985; Аканова, 2001; Шильников, 2008; Гомонова, 2010; Попова и др., 2013; Бакина, 2015; Лапа, Кулеш, 2015). Нейтрализация почвенной кислотности приводит к значительным изменениям почти всего комплекса свойств почвы, контролирующих ее эффективное плодородие (Минеев и др., 2013).

Влияние агрохимикатов на кислотно-основные свойства почвы может меняться в зависимости от вида и сочетания применяемых удобрений и известкования. Физиологически кислые минеральные удобрения (аммиачная селитра) повышают кислотность почвы, снижают емкость катионного обмена и степень насыщенности почв основаниями, повышают содержание в почве подвижных форм алюминия, марганца, железа (Авдонин, 1972; Гомонова, 2001; Шильников, 2008; Попова и др., 2013; Минеев и др., 2013; Бортник, 2019; Шихова, Чеглакова, 2022; Kalkhoran et al., 2020). Однако параметры этих изменений зависят от целого комплекса сопутствующих факторов и поэтому до настоящего времени не нашли однозначной оценки.

По мнению некоторых авторов, подкисление почвы зависит от дозы азотных удобрений. В работе В.П. Энжеринскас (1975) средние дозы (N_{50-70}) не вызывали подкисления почвы. Считается, что отрицательное действие, связано с количеством азота удобрений, неиспользуемого культурами, т.е. избыточного. При этом имеет значение не доза азотных удобрений, а

обеспечение благоприятных условий для проявления его эффективности. По данным А.И. Иванова (2000) на окультуренных дерново-подзолистых почвах хозяйственный вынос азота культурами севооборота находился в пределах 110-130 кг/га, поэтому доза азотного удобрения 120 кг д.в./га не вызывала существенного роста кислотности почвы по отношению к контролю за 12 лет применения.

С другой стороны на изменение параметров кислотности почвы влияет длительность внесения минеральных удобрений. В работе Л.Н. Шиховой и Чеглаковой О.А. (2022) применение NPK в возрастающих дозах (от 30 до 150 кг д.в./га) в течение 45 лет привело к достоверному увеличению всех видов кислотности почвы пахотного слоя. С начала опыта величина гидролитической кислотности возросла на 0,3-1,5 мг-экв./100 г почвы, обменной кислотности - на 0,2-0,5 ед. pH_{KCl} в зависимости от вносимой дозы удобрений. Повышение кислотности почвы при возрастании доз вносимых удобрений привело к закономерному снижению степени насыщенности основаниями (в варианте $N_{150}P_{150}K_{150}$ уменьшилась на 10 %). По данным Н.В. Семендяевой (2010) внесение $N_{120}P_{120}K_{120}$ в течение 59 лет увеличило кислотность почвы, содержание подвижного алюминия, способствовало уменьшению количества суммы Ca^{2+} и Mg^{2+} и степени насыщенности почв основаниями с 48 до 39%.

Необоснованное завышение доз азотных удобрений способно вызвать заметное подкисление почвы даже в течение одной вегетации, в результате чего может усилиться мобилизация фитотоксичных соединений алюминия снижающего продуктивность культур (Авдонин, 1972; Сапожников и др., 1978; Помазкина, 1989). Западноевропейские ученые считают, что известь должна вноситься обязательно один раз за ротацию севооборота из расчета 1-1,5 ц на каждый центнер внесенных азотных удобрений, независимо от состояния плодородия (Гомонова, 2001).

Установлено сильное влияние анионного состава азотных и калийных удобрений на вымывание элементов в почве. Миграция веществ в почвах

зависит в значительной степени от гранулометрического состава и емкости катионного и анионного обмена почв. Азотные удобрения влияли на миграцию калия в почве следующим образом: $(NH_4)_2SO_4$ > NH_4Cl > NH_4NO_3 = $(NH_4)_2CO_3$ > $(NH_4)_2HPO_4$; кальция - NH_4Cl > $(NH_4)_2SO_4$ > NH_4NO_3 > $(NH_4)_2CO_3$= $(NH_4)_2HPO_4$ (Яковлева, Небольсин, 2009). Длительное применение NPK усиливает миграцию кальция по профилю почвы в зависимости от дозы удобрений, выращиваемой культуры, дозы извести, гранулометрического состава почвы в 1,3-4,1 раза (Яковлева, Николаева, 2018).

В работе В.Г. Минеева с соавторами (2007) показано, что при длительном внесении минеральных удобрений на дерново-подзолистой среднесуглинистой почве в вариантах NK и NPK (на неизвесткованном фоне), возрастание кислотности произошло в слое 0-60 см, снижение суммы обменных оснований в метровом слое почвы (в 1,6-2,9 при внесении азотно-калийного удобрения, в 1,3-1,5 раза – полного минерального удобрения). В варианте РК уменьшение суммы обменных оснований было минимальным и затрагивало только пахотный слой (Минеев и др., 2007).

Некоторые исследователи отмечают благоприятное воздействие на кислотно-основные свойства почвы фосфорных удобрений, за счет содержащихся в них кальция, магния и кремния (Палавеев, Тотев, 1983; Калинин, 2004). По данным Н.С. Авдонина суперфосфат снижал содержание подвижных форм алюминия. Образующиеся при этом фосфаты алюминия выпадают в осадок, выводя алюминий из раствора (Попова и др., 2013). Фосфорная кислота фосфорных удобрений способна образовывать фосфаты алюминия, марганца и железа (Небольсин Небольсина, 2005).

Применение фосфорных удобрений отдельно и совместно с азотно-калийными не вызывало отрицательного действия на кислотно-основные свойства почвы, а наоборот снижало или полностью устраняло его (Лебедева, 1976; Гомонова и др., 2007; Минеев, Гомонова, 2009; Гомонова, Минеев, 2010). В исследованиях В.Г. Минеева и Н.Ф. Гомоновой (2014) выявлено, что

потери валового кальция из пахотного слоя при внесении полного минерального удобрения были существенно меньше, чем при длительном применении азотно-калийных удобрений. По данным С.И. Поповой с соавторами (2013) при систематическом внесении РК сумма поглощенных оснований к концу V-ой ротации севооборота по сравнению с контрольным вариантом повысилась с 8,0 до 10 ммоль/100г и снизилась до 6,0 ммоль/100г в варианте NPK.

В некоторых исследованиях отмечается отрицательное влияние фосфорных удобрений на показатели кислотности почвы. И.В. Лыскова (2017) изучала длительное внесение на дерново-подзолистой почве возрастающих доз фосфорных удобрений (50, 100, 150, 200 кг д.в./га) на фоне $N_{90}K_{90}$. Использование более высоких доз фосфорных удобрений ($N_{90}P_{100\text{-}200}K_{90}$) привело к росту обменной (с 1,12 до 1,58-1,75 мг-экв/100 г) и гидролитической кислотности (с 6,7 до 7,9-8,3 мг-экв/100 г), содержания подвижных форм алюминия (с 9,5 до 13,6-15,4 мг/100 г). При внесении дозы 50 кг д.в. также наблюдали ухудшение показателей почвенной кислотности, но оно было сопоставимо с применением азотных удобрений в чистом виде. Возможно, применение высоких доз фосфорных усугубляет влияние азотных или азотно-калийных удобрений.

По данным В.В. Окоркова с соавторами (2015) в увеличении кислотности серых лесных почв существенная роль отводится применению водорастворимых фосфорных удобрений: простому и двойному суперфосфату. Это объясняется физико-химической адсорбцией поглощающим комплексом анионов HPO_4^{2-} в качестве потенциалопределяющих с ориентацией ионов H^+ второй кислотной группы аниона H_2PO_4 - в качестве противоионов.

Внесение органических удобрений является одним из приёмов снижения почвенной кислотности, эффективность зависит от дозы и длительности внесения. Положительное влияние органических удобрений на физико-химические свойства почвы объясняется содержанием в них кальция

и магния. Органические удобрения улучшают водопроницаемость почвы, в результате чего подавляются восстановительные процессы, ведущие к образованию токсичных Mn^{2+} и Fe^{2+}, и усиливается вымывание токсичных элементов из пахотного слоя. Длительное внесение органических удобрений повышает содержание органического вещества, что также положительно влияет на показатели кислотности почвы (Прокошев, 1952; Авдонин и др., 1960; Поддымкина и др., 2007; Чеботарев, Тулинов, 2011; Попова и др., 2013; Дзюин, Дзюин, 2014; Лапа, Кулеш, 2015; Чеботарев, Броварова, 2022). Органические удобрения способствуют сохранению почвенных коллоидов (Шаймухаметов, Петрофанов, 2008).

В работе В.В. Лапы и О.Г. Кулеша (2015) применение навоза 140 т/га за период 1997–2010 гг. на неизвесткованной дерново-подзолистой почве привело к увеличению значения pH_{KCl} на 0,08 ед. Снижение кислотности при применении навоза объясняется большим, чем при внесении минеральных удобрений накоплением обменного калия, который входит в поглощающий почвенный комплекс (Жукова, 1967; Лапа, Кулеш, 2015). В исследованиях Н.А. Пеговой (2017) внесение навоза в дозе 60 т/га 1 раз в ротацию семипольного севооборота не оказало существенного влияния на показатели кислотности почвы. По данным С.И. Поповой с соавторами (2013) внесение навоза (насыщенность 6,8 т/га) в течение пяти ротаций мало влияло на показатель pH_{KCl}, гидролитическую кислотность почвы и сумму поглощенных оснований. Более заметно было действие навоза на обменную кислотность и подвижный алюминий.

В работе Н.С. Авдонина с соавторами (1960) показано, что в шестипольном севообороте за 38 лет среди всех изученных удобрений по комплексному действию на свойства почвы выделился навоз (насыщенность 20 т/га в год). Под его влиянием в почве резко снизилась актуальная и гидролитическая кислотность при одновременном значительном увеличении суммы поглощенных оснований. Содержание подвижных форм алюминия и

марганца снизилось до безвредного минимума. Почва приобрела состояние, практически исключающее необходимость известкования.

Совместное внесение органических и минеральных удобрений сглаживает отрицательное влияние последних на показатели кислотности почвы и сумму обменных оснований (Минеев и др., 2007; Семендяева, 2010; Попова и др., 2013; Лапа, Кулеш, 2015; Чеботарев, Броварова, 2022; Ye et al., 2022). В работе Н.В. Семендяева (2010) совместное внесение минеральных и органических удобрений привело к увеличению содержания поглощенных оснований по всему профилю за исключением пахотного горизонта. По данным J. Ye с соавторами (2022) в период 2017-2021 гг. значение pH почвы плантации чая при длительном применении минеральных удобрений снизилось с 3,07 до 2,82, при внесении органических и минеральных удобрений варьировало от 4,26 до 4,65, органических удобрений - от 5,13 до 5,33, что наиболее подходит для роста чайных деревьев. При внесении органических удобрений урожайность и качество чая достигли максимума.

Уровень pH в ризосфере сельскохозяйственных культур изменяется не только в зависимости от применяемой системы удобрений, но и от вида растений (Минеев и др., 2014). По данным В.А.Вихревой с соавторами (2007) в кислой среде сдвиг pH под влиянием корневых выделений уже на третьи сутки составил +0,39 ед., а на девятые сутки +1,71 ед. В нейтральной среде сперва происходило подкисление среды корневыми выделениями (уменьшение pH на 0,52 ед.), затем – постепенная нейтрализация (увеличение pH на 0,26 ед.).

1.3 Изменение биологических свойств почвы при длительном антропогенном воздействии

Плодородие почв во многом определяется интенсивностью и направленностью жизнедеятельности микроорганизмов. Микробиологические сообщества целинных почв существенно изменяются при окультуривании, т.к. в результате сельскохозяйственной деятельности

создаются другие условия обитания. Почвенные микроорганизмы играют решающую роль в потоке энергии и круговороте веществ в почве, участвуют в разложении органического вещества, разрушении ксенобиотиков, секвестрации почвенного углерода и предотвращении болезней сельскохозяйственных культур (Ананьева, 2003; Благодатская и др., 2016; Morris, Blackwood, 2015; Jin et al., 2022). Влияние на структуру и функции микробоценоза почвы оказывают система обработки почвы, тип севооборота, система удобрений, применение пестицидов, лесомелиорация и др. факторы (Ананьева, 2003; Заварзин, Кудеяров, 2006; Самофалова И.А., 2011; Приходько, Сиземская, 2015; Эседуллаев, Шмелева, 2016; Гапешин и др., 2022; Никитин и др., 2022; Ceja-Navarro et al., 2010; Rusakova, 2020).

Общую направленность влияния агротехнологий на микробиологические сообщества отражают показатель продуцирования почвой углекислого газа и изменения микробной биомассы (Ананьева, 2003; Лыков и др., 2004; Звягинцев и др., 2005; Сушко и др., 2019). Микробная биомасса считается наиболее активным и динамичным компонентом органического вещества, в первую очередь реагирующим на изменения окружающей среды и отражающим тренд накопления или минерализации органического вещества почвы (Ананьева, 2003; Ананьева и др., 2011; Horwath, 2017). Доля микробного углерода в общем углероде почвы варьирует от 1 до 15 % (Ананьева и др., 2009; Семёнов, Когут, 2015). Почвы разных климатических зон различаются по содержанию микробной биомассы и по ее чувствительности к природным и антропогенным воздействиям. Например, в дерново-подзолистой почве изменения содержания микробной биомассы на 59% определялись влиянием антропогенных факторов и лишь на 14% - сезонными колебаниями, тогда как в выщелоченном черноземе вклад этих факторов равнялся 5 и 66%, соответственно (Ананьева, 2003). В работе И.Ю. Кудреватых с соавторами (2021) отмечается, что микробиологические свойства одного типа почвы (дерново-подзолистая), растительности (лес) и сходных климатических

условий существенно различаются, полученные данные авторы связывают с почвообразующими породами. По некоторым данным в пахотных почвах содержание микробной биомассы значительно ниже, чем под лесом и залежью (Полянская и др., 1997; Ананьева, 2003; Полянская, Звягинцев, 2005). Для дерново-подзолистых почв такие результаты связывают с припахиванием нижележащих горизонтов (Ананьева, 2003). Микробная биомасса, ее активность и разнообразие микробиологического сообщества широко используются в международных мониторинговых исследованиях и в качестве индикаторов устойчивости почв к внешним воздействиям (Терехова и др., 2021; Knoepp et al., 2000; Andrews et al., 2001; Ritz et al., 2009; Gonzalez-Quiñones et al., 2011; Tate, 2017).

Большинство исследователей отмечают положительное влияние органических удобрений на микробную биомассу, влияние минеральных удобрений зависит от свойств почвы, состава, формы и дозы удобрений (Ананьева, 2003; Русакова, 2020; Malý et al., 2009; Kallenbach, Grandy, 2011; Francioli, et al. 2016). Отрицательное влияние минеральных удобрений обычно объясняют подкислением почвы (в первую очередь в результате применения азотных удобрений) или снижением количества доступного органического углерода.

Негативное влияние 40-летнего применения различных форм азотных удобрений на экофизиологическое состояние микробного сообщества серой лесной почвы показано в работе Е.А. Сусьян с соавторами (2008). Длительное внесение азотных удобрений способствовало увеличению удельной скорости дыхания микробной биомассы на 32-142 %, что иллюстрирует напряженность микробиологических процессов углеродного цикла. В исследованиях Н.В. Козловой, В.В. Керимзаде (2019) выявлено, что в период активной эксплуатации бурых лесных кислых почв чайных плантаций влажных субтропиков России с применением высоких доз удобрений ($N_{600}P_{180}K_{150}$) почва характеризовалась в два раза более низким среднегодовым уровнем интенсивности дыхания (45 мг CO_2 /кг) по

сравнению с контролем ($N_0P_0K_0$) и вариантом с умеренными дозами ($N_{200}P_{60}K_{50}$). Только через несколько лет после снятия агрогенной нагрузки, в отсутствии непосредственного влияния минеральных удобрений, проявилась тенденция нормализации её функционального состояния. Тенденции снижения углерода микробной биомассы в результате длительного внесения $N_{60}P_{30}K_{60}$ (с 1977 по 2018 гг., под зерновые культуры) отмечены в работе Н.П. Ковалевской с соавторами (2019). По данным И.В. Русаковой (2020) при ежегодном внесении минеральных удобрений в течение 20 лет (среднегодовая доза $N_{54}P_{51}K_{57}$) на дерново-подзолистой почве и удалении всех послеуборочных остатков поддерживалась высокая функциональная активность микроорганизмов, о чем свидетельствовали высокие значения БД и микробного метаболического коэффициента qCO_2, однако, судя по низким величинам $C_{мик}$, $C_{мик}/C_{орг}$ здесь превалировали деструктивные минерализационные процессы.

В результате сельскохозяйственного использования почвы также существенно меняться состав и структура микробных сообществ. Качественный и количественный состав микроорганизмов зависит от типа почв, растительного сообщества, различных элементов агротехнологий конкретно складывающихся метеорологических условий. При этом может наблюдаться как уменьшение, так и увеличение видового разнообразия почвенной микробиоты, изменение долевого вклада отдельных групп и видов, появление структурных особенностей, не свойственных данным зональным условиям, утрата ряда параметров пространственно-временной организации сообществ (Добровольский и др., 2012; Основные достижения и перспективы…, 2017; Зинченко, 2022; Jin et al., 2022). Неблагоприятные экологические условия, характерные для агрогенно-преобразованных почв, могут привести к угнетению почвенной микрофлоры. В то же время микробиологическое сообщество почв способно адаптироваться к новым условиям существования и противостоять внешним отрицательным воздействиям.

Изучение влияния удобрений на состав и структуру микробных сообществ, начатое с середины XX века, остается актуальным и в настоящее время. Большинство исследователей отмечает, что использование органических и органоминеральных удобрений способствует росту общей численности почвенных микроорганизмов и оптимизирует состав и функционирование микробоценоза (Мёрзлая и др., 2012; Зинченко и др., 2014; Сычёв и др., 2016; Автономова и др., 2022; Зинченко, 2022; Lazcano et al., 2013; Jin et al., 2022). Данные по влиянию минеральных удобрений на микробиологические сообщества противоречивы. Некоторые исследователи отмечает, что при длительном внесении минеральных удобрений происходит снижение общей численности микроорганизмов и групп микроорганизмов, участвующих в трансформации азота (Сычёв и др., 2016; Бойко и др., 2018; Зинченко, 2022). В работе М.К. Зинченко (2022) показано, что в результате применения минеральной системы удобрения в течение 10 лет исследований сохранялась тенденция снижения численности бактерий, использующие различные формы азота. Суммарная численность микроорганизмов на МПА и КАА, а также общее количество активной микрофлоры, на интенсивном и высокоинтенсивном минеральном фоне были статистически ниже, чем на органоминеральных фонах. В исследованиях В.Г. Сычёва с соавторами (2016) наблюдали уменьшение общей численности микроорганизмов в почве с 46,8 кл/г·10^6 (контроль) до 38,1 кл/г·10^6 при внесении полного минерального удобрения и до 33,5 кл/г·10^6 при применении азотного удобрения. В результате длительного внесения одного фосфорного удобрения снижался индекс биоразнообразия микробоценоза почвы.

В других работах отмечается, что применение азотного или полного минерального удобрения увеличивает численность микроорганизмов различных эколого-трофических групп (Золкина, 2019; Менькина, 2019; Менькина и др., 2021; Синеговская, Банецкая, 2021), а также рост наблюдается при изучении последействия минеральных удобрений. В исследованиях Н.Н. Шаповаловой, Е.А. Менькиной (2018) выявлено, что в

вариантах, где вносили NPK с 1975 по 2006 год, спустя 10 лет наблюдали значительное увеличение активности эколого-трофических групп микроорганизмов – в среднем в 14 раз. По данным Г.П. Гамзикова (2018) при длительном внесении минеральных удобрений в течение пяти ротаций семипольного севооборота общая биомасса микроорганизмов возросла в 1,2 раза, их активная биомасса в 1–3 раза. Увеличение всех основных эколого-трофических групп микроорганизмов (протеолитических, амилолитических, целлюлозолитиков, микромицетов, нитрификаторов, денитрификаторов) в дерново-подзолистой супесчаной почве при длительном (более 45 лет) внесении $N_{100}P_{50}K_{120}$ отмечено в работе Е.И. Золкиной (2019). Отмечено положительное влияние длительного внесения NPK на жизнедеятельность микроорганизмов при известковании почвы (Минеев и др., 2014).

1.4 Урожайность сельскохозяйственных культур при применении различных систем удобрения

Удобрения являются одним из определяющих факторов, обеспечивающих величину и стабильность урожаев возделываемых культур. Наиболее эффективно оценить системы удобрений можно только в условиях севооборота. Уровень применения удобрений в севообороте, обеспечивающий максимальную продуктивность культур и положительный баланс элементов питания – важный нормативный материал при разработке мероприятий по сохранению плодородия почв. Система удобрения в севооборотах является составной частью адаптивно-ландшафтного земледелия. (Лапа и др., 2009; Чуян, 2017). Длительные опыты являются уникальной основой для исследования эффективности удобрений, их влияния на урожайность и качество сельскохозяйственных культур, дают более объективную оценку потребности в минеральных и органических удобрениях с учетом биологических особенностей культур и применительно к конкретным почвенно-климатическим условиям для каждой зоны России (Сычев и др., 2020; Постников и др., 2022).

Эффективность применения удобрений по данным разных авторов, варьирует в широких пределах и зависит от вида и/или системы удобрения, отзывчивости культур, севооборота, погодных условий, типа почвы, гранулометрического состава, содержания гумуса, обеспеченности основными элементами питания (Иванов, 2000; Ильющенков, 2000; Сычёв, 2003; Лямцева, Иванов, 2008; Лапа и др., 2009; Косолапова, Васбиева, 2011; Окорков и др., 2011; Лукин, 2012; Мерзлая и др., 2012; Иванов и др., 2016; Чуян, 2017; Мерзлая, 2018; Дзюин, Дзюин, 2018; Лапа и др., 2018; Бортник, 2019; Золкина, 2019; Потанин, 2019; Завьялова, Шишков, 2020; Постников и др., 2020; Мерзлая, 2021; Лукин, 2021; Окорков, 2021; Шафран, 2021; Шафран, 2021а; Постников и др., 2022; Сычёв и др., 2022; Чуян и др., 2022). В зависимости от поставленной цели – получение максимальной урожайности, экономической эффективности или сохранения плодородия почвы, земельного фонда, как национального достояния страны, выбор системы удобрения будет существенно отличаться.

По данным А.И. Иванова с соавторами (2016) хорошо окультуренные дерново-подзолистые почвы обладают высоким потенциалом эффективного плодородия, позволяющим до 20 лет обеспечивать продуктивность полевых севооборотов 4,4–5,5 т з.е./га без удобрений и 5,6–7,7 т з.е./га на фоне моноазотной системы удобрения. В этот срок окупаемость навоза была значительно меньше, а фосфорного и калийного удобрений – отсутствовала. Лишь в интенсивных овощных и кормовых севооборотах оправданными были дозы $Р_{120–180}$, $К_{180–270}$. Отказ от удобрений или использование дефицитных по NPK систем удобрения не сопровождалось существенным ухудшением качества растительной продукции, однако вело к весьма быстрой деградации почвенного плодородия. Неустойчивость была присуща всем агрохимическим свойствам хорошо окультуренных дерново-подзолистых почв. Допускается краткосрочное применения моноазотной системы удобрения на высоко окультуренных дерново-подзолистых почвах (в течение 5 лет), однако длительное ее применение неизбежно ведет к

снижению плодородия (Иванов, 2000; Ильющенков, 2000; Лапа и др., 2018). В.В. Лапа с соавторами (2018) отмечает, что для сохранения плодородия дерново-подзолистых почв экологически наиболее целесообразно внесение полного минерального удобрения с минимальными дозами фосфора и калия – $P_{15}K_{30}$.

Дефицит азота на дерново-подзолистой супесчаной почве приводил к снижению продуктивности сельскохозяйственных культур – на 13,8; фосфора – на 9,7; суммы фосфора и калия – на 8,8; калия – на 5,2 ц/га к. ед. (Лапа и др., 2019).

Долевое участие азотных удобрений в урожае варьирует в широких пределах и зависит от биологических особенностей культур и агрохимических свойств почв, среди которых наибольшее влияние оказывала степень обеспеченности почв доступными формами азота. По мере увеличения содержания азота в почве вклад азотных удобрений в формирование урожайности резко снижается (для дерново-подзолистых почв в 1,5-2,0 и более раз). Наиболее высокое долевое участие фосфорных удобрений также было отмечено для почв с низкой степенью обеспеченности почв фосфором и составляло у зерновых культур и картофеля 17–30%. При высоком содержании подвижного фосфора вклад фосфорных удобрений в урожайность зерновых культур практически прекращался, для картофеля снижался на 25–30 %.

По обобщенным данным Географической сети опытов с удобрениями и Агрохимической службы, урожайность основных сельскохозяйственных культур находится в прямой зависимости, а эффективность калийных удобрений – в обратной от уровня обеспеченности почв подвижным калием. При низкой обеспеченности K_2O дерново-подзолистых почв вклад калийных удобрений в формировании урожайности озимой и яровой пшеницы составлял 16-24%, при повышенном содержании - 1-2%. Долевое участие калийных удобрений в урожае картофеля при низком содержании

подвижного калия в дерново-подзолистых и серых лесных почвах составляло 20–31, при высокой обеспеченности 5–14 % (Шафран, 2021, 2021а).

Некоторые авторы отмечают, что за последние 20-30 лет урожайность сельскохозяйственных культур, не смотря на современный низкий уровень применения удобрений, не снижается. Это объясняют интенсивным использованием средств защиты растений, регуляторов роста растений, возделыванием высокоинтенсивных, экологически пластичных и адаптивных сортов, а также выводом из оборота наименее плодородных земель (Кайгородов, Пискунова, 2017; Сычев и др., 2020). В других исследованиях показано, что за 28 лет снижение уровня плодородия в контрольном варианте опыта (на дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве) привело к тому, что продуктивность зернопропашного севооборота в 7-ой ротации снизилась с 22,6 до 19,8 ц з.е./га (Никитина, 2018а). В.Г. Сычев с соавторами (2022) отмечают, что в регионах, где преобладают дерново-подзолистые почвы, за счет их агрохимического окультуривания можно получить урожайность в 2 раза выше.

Колебания погодных условий существенно влияют на урожайность возделываемых культур и продуктивность севооборота. По данным А.П. Федосеева (1985) изменчивостью погодных условий объясняется 25-60 % колебаний эффективности удобрений по Нечернозёмной зоне. Систематическое применение удобрений оказывает положительное действие на продуктивность полевых культур за счёт не только оптимизации минерального питания, но и лучшей их адаптации к неблагоприятным климатическим и погодным условиям. Умеренные дозы минеральных и органических удобрений позволяют получать в тайге и подтайге до 30-36 ц з.е. с 1 га севооборотной площади, в лесостепи – 29-34 ц/га, в степи – 16-25 ц/га (з.е.) при окупаемости 1 кг д.в. удобрений от 9 до 14 кг зерна. При этом систематическое применение умеренных доз удобрений не создаёт экологических проблем в агроценозах (Гамзиков, 2016). Оценка роли климатических, почвенных и агротехнических факторов в формировании

продуктивности агрофитоценозов показана в работах С.М. Лукина, Г.Е. Мерзлой (2016), А.Г. Чуян (2017; 2022), О.В. Чухиной с соавторами (2022), В.Г. Потанина (2020). По сравнению с несбалансированным внесением минеральных удобрений в виде NP или NK эффективность полного минерального удобрения в меньшей степени подвержена отрицательному влиянию засухи (Лукин, Мёрзлая, 2016).

Многочисленные результаты по влиянию удобрений на продуктивность культур, полученные в условиях длительных стационарных опытов, были обобщены в работе В.Г. Сычёва с соавторами (2020). Анализируя влияние удобрений на урожайность культур и продуктивность севооборотов 21-го длительного опыта Географической сети России, авторы установили, что во всех опытах минеральная система удобрения имела преимущество над органической. Наибольший эффект от NPK по сравнению с внесением навоза (+25%) отмечен в опытах, проведенных на почвах с большим содержанием почвенного органического углерода (черноземах), наименьший – на дерново-подзолистых и серых лесных (12–17%). Органо-минеральная система удобрения по действию на урожайность превосходила минеральную на 1–40% в 17 опытах, в то время как минеральная была эффективнее органо-минеральной на 2–3% в трех опытах и на 40% – в одном.

В работе Г.П. Гамзикова (2018) представлены результаты многолетних исследований в длительном стационарном опыте по изучению систем применения удобрений в 7-польном полевом севообороте на дерново-подзолистой почве южной тайги Западной Сибири. Установлено, что минеральная система на данных почвах позволяет получать урожай зерна от 18 до 24 ц/га, при этом наибольшая величина прибавки урожая (9–11 ц/га) проявляется при внесении доз $(NPK)_{43–51}$. Органическая система также увеличивала продуктивность севооборота. При этом наиболее оптимальной дозой внесения оказалась доза 5,7 т/га (40 т/га – в первое поле севооборота), она позволила получить максимальную окупаемость 1 т навоза продукцией – ≈100 кг з.е. Совместное применение органических и минеральных удобрений

дало возможность получать максимальную продуктивность – 25–27 ц з.е./га. Причем в благоприятные годы по увлажнению она возрастала до 30 ц з.е./га и больше.

В длительном полевом опыте, проведенном в западной части Нечерноземной зоны России (Смоленская область), на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве при сравнительном изучении действия органических и минеральных удобрений в различных дозах и сочетаниях (N, P, K, NPK, навоз, NPK + навоз) выявлена их эффективность во всех исследуемых вариантах, кроме одностороннего внесения фосфорных удобрений. Лучшие результаты по продуктивности и устойчивости агроценозов получены при использовании органо-минеральной системы удобрений в умеренных дозах – $N_{90}P_{90}K_{90}$ + навоз 9 т/га, которая в действии в среднем за 30 лет опыта обеспечивала продуктивность севооборота на уровне 3,8 т/га кормовых единиц (на 37% выше контроля). При этом складывался бездефицитный баланс гумуса в почве, улучшалась обеспеченность почвы подвижным фосфором, повышалась ее микробиологическая активность. Органическая система удобрений при ежегодном внесении 9 т/га подстилочного навоза в условиях опыта обеспечивала сбор к. ед. на уровне 3,4 т/га, то есть занимала среднее положение по продуктивности севооборота при сравнении с органо-минеральной и минеральной системами, а также по сохранению плодородия почвы в отношении ее гумусового состояния и реакции среды. Минеральная система удобрения – $N_{90}P_{90}K_{90}$ по продуктивности не уступала органо-минеральной системе, однако уменьшала содержание гумуса в почве и pH_{KCl}.

При анализе продуктивности культур в органо-минеральных вариантах с последовательным ростом доз удобрений достоверного ее увеличения не установлено. При этом использование максимальных, 4–5-кратных доз удобрений в течение 30-ти лет приводило даже к некоторому уменьшению прибавок урожайности (Мёрзлая, 2021).

В многолетнем полевом опыте на дерново-подзолистой суглинистой почве в 8-польном севообороте установлено, что внесение $N_{75}P_{70}K_{71}$ в

среднем за 5 ротаций увеличило продуктивность на 72% (с 1,98 до 3,40 т з.е./га). Окупаемость удобрений возросла с 1,9-2,7 до 4,9-7,2 кг з.е./кг NPK. Продуктивность севооборота при применении органо-минеральных систем удобрения была больше, чем при применении минеральных систем (Дзюин, Дзюин, 2018).

По данным С.М. Лукина с соавторами (2021) в длительном стационарном опыте (заложенном 1968 г.) на дерново-подзолистой супесчаной почве в полевом севообороте (однолетний люпин - озимая пшеница-картофель-ячмень) органическая система удобрения по действию на урожайность уступала минеральной, как при умеренных, так и при повышенных дозах удобрения. Эффективность органоминеральной и минеральной систем удобрения при использовании умеренных доз удобрений была примерно одинаковой, однако при использовании удобрений в повышенных дозах более высокие прибавки урожая получены от органоминеральной системы удобрения. Различные виды минеральных удобрений оказывали неодинаковое влияние на урожайность сельскохозяйственных культур. Однолетний люпин слабо отзывался на внесение удобрений, в посевах озимой пшеницы наибольшее влияние на формирование урожая оказывали азотные и фосфорные удобрения, картофеля и ячменя - азотные и калийные удобрения.

1.5 Экологические аспекты применения удобрений

Органические и минеральные удобрения в своем составе кроме основных элементов питания содержат примеси, которые могут загрязнять почву и отрицательно влиять на развитие растений. К таким токсичным примесям причисляют тяжелые металлы (ТМ). Почвы являются природными накопителями ТМ в окружающей среде и основным источником загрязнения сопредельных сред, включая растения (Алексеев, 1987; Соколов, Черников, 1999; Дабахов и др., 2005; Водяницкий, 2014; Лукин, Жуйков, 2021). Антропогенными источниками поступления ТМ в агроценозы, кроме

удобрений и мелиорантов, являются выбросы различных промышленных предприятий, теплоэлектростанций и т.д.

Химические элементы по степени токсического действия на окружающую среду разделяют на три класса опасности: 1-й (высокоопасные вещества) – As, Cd, Hg, Pb, Se, Zn, F; 2-й (умеренно опасные вещества) – Co, Ni, Mo, Cu, Sb, Cr; 3-й (малоопасные вещества) − Ba, V, W, Mn, Sr (Водяницкий и др., 2012).

С другой стороны, большая часть ТМ являются микроэлементами, жизненно важными и необходимыми для роста и развития растений, поэтому увеличение содержания микроэлементов (Cu, Mo, Mn, B, Zn и др.) в почве благодаря внесению удобрений полезно, если их применение не ведёт к загрязнению почвы и сельскохозяйственной продукции. Даже функциональная роль Pb и Cd выяснена не до конца. По одним данным эти элементы не имеет определенного значения для растений (Алексеев, 1987; Дабахов и др., 2005). В других работах отмечается положительное действие свинца на рост и развитие растений (Убугунов, Доржонова, 2010; Арышева и др., 2013; Елькина, 2015), кадмия на всхожесть семян (Мельничук, 1990).

В работах Г.В. Мотузовой (2009), В.Б. Ильина (2012), Т.М. Минкиной (2008, 2009), Ю.Н. Водяницкого (2012, 2014), Д.В. Ладонина (2016) показано, что целесообразным является изучение не только валового содержания ТМ в почвах, а также их разных форм, отличающихся по подвижности. Именно подвижные формы в большей степени представляют собой опасность.

Среднее валовое содержание (кларк) и концентрация подвижных форм микроэлементов в почвах мира в зависимости от почвенно-климатических и геохимических особенностей регионов сильно варьирует (Виноградов, 1957; Самофалова, 2009; Bowen, 1966; Kabata-Pendias, 2011).

В практике санитарной охраны почв используется предельно допустимая концентрация (ПДК) или ориентировочно-допустимая концентрация (ОДК) ТМ, превышение которых ведёт к отрицательным последствиям. Следует отметить исключительную сложность нормирования

веществ в почве в силу особенностей самой почвы и огромного разнообразия ее разновидностей. Поэтому в настоящее время имеются ПДК и ОДК для небольшого количества элементов, для некоторых из них они установлены с учетом гранулометрического состава и кислотности почвы (СанПиН 1.2.3685-21). По ряду металлов существует не соответствие между фоновым содержанием элемента в почве и его ПДК. Таким образом, не на все предложенные ПДК можно ориентироваться при оценке степени загрязнения почв.

Для оценки степени загрязнения почвенного покрова несколькими ТМ используют суммарный показатель загрязнения - Z_c. С помощью него возможна лишь самая общая оценка экологической ситуации на изучаемой территории. При расчете данного показателя не учитывается разная токсичность металлов, что может привести к недооценке или переоценке экологической напряженности. Вместе с тем, у Z_c имеется и очевидное достоинство – в условиях часто наблюдаемых полиметалльных загрязнений почвенного покрова он позволяет хотя бы ориентировочно оценить возможный отрицательный эффект суммарно производимый металлами – загрязнителями (Ильин, 2000; Дабахов и др., 2005; Водяницкий, 2014).

В почве ТМ претерпевают ряд химических превращений, в ходе которых токсичность их может существенно меняться. Концентрация и подвижность ТМ зависит от типа почвы, ее свойств (емкости катионного обмена, плотности, содержания органического вещества, кислотности и других), а также от явлений синергизма и антагонизма ионов. При загрязнении почвы ТМ обязательно нужно учитывать экологический потенциал системы почва – растения, заключающийся в буферной способности почвы и защитных приспособлений растений по ограничению поступления ТМ (Алексеев, 1987; Карпухин, Бушуев, 2007; Водяницкий и др.,, 2012; Ильин, 2012; Ладонин, 2016; Kabata-Pendias, 2011; Пугаев, 2020).

Вопросу накопления ТМ в почве и растениях при длительном использовании удобрений посвящены многочисленные исследования,

результаты которых порой неоднозначны и противоречивы (Овчаренко, 1995; Лучицкая, Личко, 2005; Карпухин, Бушуев, 2007; Карпова, 2007; Лебедовский, 2010; Дубовик, Дубовик, 2016; Стулин, 2017; Конарбаева, Якименко, 2017; Волкова и др., 2019; Симонова и др., 2019). Скорее всего, это связано с особенностями почвенно-климатических условий различных регионов, в которых проводили исследования, свойствами почв и элементов, разнообразием возделываемых культур, их генетическими особенностями и проявлением адаптивности на действие ТМ.

Количество ТМ, поступающее в почву зависит от видов удобрений и дозы. Потенциально опасными с точки зрения накопления Cd являются фосфорные и калийные удобрения, Pb – фосфорные, Zn – органические, Cu – органические и фосфорные (Обухов, Попова, 1992). В таблице 1 представлены результаты по содержанию ТМ в минеральных и органических удобрениях, их количество в агрохимикатах по данным разных авторов могло различаться на порядок (Лебедовский, 2010; Лукин, Четверикова, 2013; Лукин, Селюкова, 2016; Конарбаева, Якименко, 2017; Лукин, Хижняк, 2016; Лукин, Жуйков, 2021; Mu et al., 2020).

Таблица 1 - Содержание ТМ в удобрениях (по данным И.А. Лебедовского (2010), С.В. Лукина с соавторами (2013, 2016, 2016а, 2021), Г.А. Конарбаевой, В.Н. Якименко (2017))

Удобрения	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Sr	Mn
Аммиачная селитра	0,04-0,3	0,3-3,3	1,1-5,2	0,4-1,4	0,3-4,8	0,2-3,5	0,7-9,2	8,3	1,3-16,3
Двойной суперфосфат	0,2-1,8	1,2-7,2	24,5	20,5-28,0	18,1	1,2-17,0	20,9-26,0	201	94-265
Калий хлористый	0,05-1,5	0,5-1,0	15,5	0,4-4,8	15,5	0,3-10,5	2,0-14,4	17,1	7,2-19,3
Навоз КРС (влажность 75%)	0,04-0,14	0,1-4,7	1,7-7,7	3,7-33,8	1,0-9,9	0,2-6,4	11,5-37,4	-	17,4-360,0

На содержание ТМ удобрения могут оказывать не только прямое действие, как их источники, но и косвенное. Так, физиологически кислые минеральные удобрения повышают подвижность тяжелых металлов в почвах, физиологически щелочные, органические и известь – снижают

(Алексеев, 1987; Водяницкий и др., 2012; Дубовик, Дубовик, 2016; Czarnecki, During, 2015).

В работах Д.В. Дубовик, Е.В. Дубовик (2016); А.Ф. Стулина (2017) показано, что длительное (12-50 лет) применение умеренных (оптимальных) доз минеральных удобрений не приводило к накоплению в почве ТМ. В некоторых исследованиях при внесении NPK отмечено накопление в почве валового количества свинца (Лучицкая, Личко, 2005; Волкова и др., 2019), меди (Волкова и др., 2019), подвижной формы марганца (Сычевский и др., 2012; Симонова и др., 2019), кадмия (Ториков и др., 2016; Ефимова и др., 2017), хрома (Ториков и др., 2016). По данным О.А. Лучицкой и В.И. Личко (2005) через 25 лет ведения опыта наоборот наблюдали уменьшение валового содержания Cu в почве на 20 %. Снижение подвижных форм Cd, Zn, Pb и Cu в результате длительного применения минеральных удобрений показано в работе С.И. Поповой с соавторами (2013).

В исследованиях А.И. Карпухина, Н.Н. Бушуева (2007) показано, что влияние длительного применения NPK на содержание ТМ в почве зависело от её типа. В дерново-подзолистой почве наблюдали уменьшение валового количества Cd и Zn, а в темно-серой лесной увеличение (Карпухин, Бушуев, 2007). В этих же исследованиях показано, что длительное внесение навоза способствовало уменьшению в почве валового количества Cd и его подвижной формы, увеличению валовой концентрации Zn. В работе Л.А. Ефимовой с соавторами (2017) показано, что применение навоза также привело к уменьшению подвижной формы Cd, но увеличило его валовое количество.

В работах некоторых авторов показано, что использование органоминеральной системы удобрения приводило к увеличению валового содержания Cd и Zn и их подвижных форм в дерново-подзолистой почве, темно-серой лесной и черноземе типичном и Co в дерново-подзолистой почве (Карпухин, Бушуев, 2007; Ефимова и др., 2017).

В исследованиях Г.А. Конарбаевой, В.Н. Якименко (2017) выявлено, что процесс накопления ТМ в почве зависел от сбалансированности применяемых NPK. Многолетнее применение высоких доз азотно-фосфорных удобрений при сильном дефиците калия не обеспечивало соответствующее увеличение урожайности культур и приводило к заметному накоплению в почве всех форм ТМ. Длительное внесение высоких, но сбалансированных доз минеральных удобрений (NPK), несмотря на заметное дополнительное поступление в агроценоз содержащихся в них ТМ, привело к существенному снижению уровня этих элементов в почве; в наибольшей степени уменьшилось содержание самых мобильных фракций почвенного пула ТМ.

Некоторые авторы отмечают, что удобрения не могут служить существенным источником загрязнения почвы тяжелыми металлами. Даже на фоне применения высоких доз накопление ТМ в почве выше ПДК наступит только через сотни или тысячи лет (Овчаренко, 1995; Лебедовский, 2010; Курбаков и др., 2019).

Почвы являются природными накопителями ТМ в окружающей среде и основным источником загрязнения сопредельных сред, включая растения. Растениям доступны элементы, присутствующие в почве в водорастворимой и обменной форме. Накопление ТМ в растениях зависит от природно-климатических условий произрастания, биологических особенностей, а также технологии возделывания сельскохозяйственной культуры и даже от сорта (Дабахов и др., 2005; Ильин, 2012; Пугаев, 2020).

Существует линейная зависимость между содержанием подвижных форм ТМ в почве и концентрацией их в растениях. Но степень этой зависимости разная. Так при увеличении концентрации элементов в почвенном растворе содержание Pb в растениях возрастало в несколько раз медленнее, чем Cd (Тяжелые металлы в системе…, 1997). В растениях происходит дифференциация ТМ по отдельным органам. Наибольшее количество обнаруживается в корнях, меньше в стеблях и листьях,

минимальное в генеративных органах (Алексеев, 1987; Тяжелые металлы в системе…, 1997; Ильин, 2012). Возможны и исключения, например, концентрация Ni была выше в зерне овса, чем в корнях и соломе (Андреева и др., 2000).

В некоторых исследованиях приводят сведения о накоплении ТМ в растениях при длительном внесении удобрений (Карпова, 2007; Госсе, 2008; Конарбаева, Якименко, 2017; Морозова, Лицуков, 2019; Ильинский, 2020; Ugulu et al., 2020; Wajid et al., 2020). В работе Е.А. Карповой (2007) показано, что наибольшее влияние оказывали гидролитически и физиологически наиболее кислые удобрения (Na, Pc, Ккс), при систематическом внесении которых содержание ТМ возрастало в большинстве культур. Концентрация Ni и Cr в некоторых кормовых культур превышала уровень МДУ.

В исследованиях Г.А. Конарбаевой, В.Н. Якименко (2017) выявлено, что значительным повышение содержания ТМ в картофеле происходило при несбалансированном использовании минеральных удобрений (внесение NP при дефиците калия). Оптимизация минерального питания растений (NPK), обеспечивая полноценный продукционный процесс, снижала концентрацию в картофеле и коэффициент их накопления в ботве и клубнях до естественного уровня.

По данным I. Ugulu с соавторами (2020) количество тяжелых металлов/металлоидов (Zn, Co, Fe, Cd, Pb, Cu и Cr) в зерне пшеницы находилось в безопасных пределах, указанных ФАО/ВОЗ, за исключением Pb. Однако индекс риска для здоровья был выше у пшеницы, выращенной с внесением минеральных удобрений. В работе K. Wajid с соавторами (2020) показано, что наиболее высокое накопление ТМ в кукурузе наблюдали при использовании органо-минеральной системы удобрений, чем органической или минеральной.

В опубликованных работах есть противоположные данные - о снижении уровня содержания некоторых ТМ в выращиваемой продукции при систематическом использовании органических и минеральных

удобрений (Ягодин и др., 1996; Шабанова, 2020). Полученные результаты, возможно, связаны с эффектом «биологического разведения», заключающегося в распределении токсичных элементов в большем объеме полученного урожая.

1.6 Использование осадков сточных вод в качестве удобрения

Потребность в удобрениях может быть удовлетворена полностью только при полной мобилизации всех ресурсов, в том числе осадков городских сточных вод (ОСВ) (Стратегия использования осадков…, 2002; Пахненко, 2007; Васбиева и др., 2019; Касатиков 2020; Мерзлая, Афанасьев, 2020; Сорока и др., 2020; Ефремова и др., 2021). В настоящее время в мире от 10 до 90% ОСВ применяют в качестве удобрений почв сельскохозяйственных угодий, в Западной Европе 30-40% ОСВ используют в агропроизводстве. При этом в России в сельскохозяйственном производстве применяют лишь около 5% осадков (Семерджян и др., 2022).

Химический состав ОСВ сильно колеблется и зависит от условий формирования, типа ОСВ и от соотношения промышленных и бытовых сточных вод. Согласно СанПиН 2.3.2.560–96 в сухой массе осадков содержится в среднем, %: органического вещества – 40-60, азота – 1-3, фосфора – 1-4, калия – 0,2-0,7 и кальция – 3-5. Осадки содержат также магний, серу, другие макро- и микроэлементы необходимые для питания растений. Получаемые после биологической очистки, они обычно имеют реакцию среды близкую к нейтральной (pH 6,5-8,0). Химический состав ОСВ зависит от сроков хранения на иловых площадках (Цуркан и др., 1989). Наибольшее количество органического вещества характерно для свежих ОСВ (70-90 %), по мере их старения происходит минерализация ОВ, и потери могут достигать 25-50 % (Туровский, 1988; Садовникова и др., 1993; Орлов и др., 1995).

По содержанию азота, фосфора, кальция и микроэлементов ОСВ приравниваются к подстилочному навозу или превосходят его, но уступают

ему по содержанию калия (Цуркан и др., 1989; Мерзлая и др., 1995; Минеев и др., 2003). Органическое вещество ОСВ обладает значительно большей зольностью, чем навоза (Садовникова Л.К., 1993).

Анализ литературы показывает, что содержание $C_{орг}$ при внесении ОСВ зависит от свойств исходной почвы. На почвах легкого гранулометрического состава органическое вещество осадков при дозе внесения 15-30 т/га минерализовалось практически полностью за один вегетационный период (Пахненко, 2007). На дерново-подзолистой среднесуглинистой почве ОСВ в дозах от 30 до 120 т/га повысили содержание гумуса в слое 0-30 см на 0,2-0,6 % (Чеботарев, 1997). На чернозёме выщелоченном внесение ОСВ в дозах 12,5 и 25 т/га способствовало пополнению запасов гумуса на 0,2-0,4 т/га/год (Куликова, 2017).

Около 40 % азота, потребляемого человеком, поступает в ОСВ. Азот в ОСВ находится в менее доступной форме, чем в минеральных удобрениях и навозе (Лучицкая, 2007; Börjesson, Kätterer, 2018). Исследования по влиянию ОСВ на азотный режим почвы направлены в основном на изучение минерального и легкогидролизуемого азота (Цуркан и др., 1989; Шуравилин и др., 2006; Варламова и др., 2009; Касатиков, 2020; Börjesson, Kätterer, 2018). Отмечается увеличение данных форм азота в почве (дерново-подзолистые, чернозёмы, серые лесные, аллювиальные), положительное влияние также наблюдают на второй и на третий год исследований. Однако при внесении ОСВ необходимо соблюдать оптимальные нормы внесения по азоту, поскольку высокие дозы удобрения ведут к накоплению нитратного азота (Пахненко, 2005; Покровская, Сергеева, 2005; Sohail et al., 2022).

Содержание фосфора в ОСВ превосходит содержание калия в 10 и более раз, поэтому осадки во всех странах рассматриваются как надёжный резерв восполнения этого элемента в почвах (Пахненко, 2007; Ott, Rechberger, 2012; Gao et al., 2016; Kecskesova et al., 2020). Доступность фосфора в различных осадках не одинакова. В сырых ОСВ она приравнивается к доступности фосфора в монокальцийфосфатах, тогда как, в

подсушенных осадках фосфор труднодоступен для растений (Покровская, Касатиков, 1987). При правильном выборе доз осадки длительное время могут обеспечивать бездефицитный баланс фосфорного питания (Стратегия использования осадков…, 2002; Пахненко, 2007; Vasbieva, Kosolapova, 2015). Большинство исследований направлено на изучение влияния ОСВ на содержание подвижной формы фосфора в почве (Макаренко и др., 1991; Денисов и др., 2007; Межевова и др., 2020).

Данные по влиянию ОСВ на калийный режим почвы противоречивы. Некоторые авторы отмечают при внесении осадков заметное повышение содержания подвижных калийных соединений в почве (Чеботарев, 1997; Воробьева и др., 2001; Хоренко, 2002; Денисов и др., 2007, Касатиков, Шабардина, 2020). По другим данным увеличения содержания подвижных калийных соединений в почве не наблюдается (Цуркан и др., 1989; Мерзлая и др. 1995; Шуравилин и др., 2006; Малахова и др., 2016) или происходит снижение (Макаренко С.В., 1991). Полученные результаты по снижению калия в почве или отсутствие влияние на его режим объясняют низким содержанием этого элемента в ОСВ (0,1-0,6 % K_2O). В исследованиях, проводимых под руководством И.А. Иванова (1996) было отмечено снижение почвенных запасов подвижной формы калия по всем вариантам опыта, причем тем значительнее, чем выше были дозы ОСВ. Авторы объясняют полученные факты выносом растениями и подщелачивание почвы при внесении ОСВ, которое могло привести к необменной фиксации части калия. Применение ОСВ считают некоторые исследователи должно сопровождаться дополнительным внесением минерального калия.

Воздействие ОСВ на кислотность почвы зависит от их состава (показателя pH и содержания обменного кальция и магния), дозы внесения и свойств самой почвы. Большинство исследователей отмечает положительное действие ОСВ на обменную, гидролитическую кислотность, сумму обменных оснований (Чеботарев, 1997; Решецкий, 2004; Пахненко, 2007; Варламова и др., 2009; Малахова и др., 2016; Касатиков и др., 2018; Подстяженок и др.,

2020). В работе С.Д. Малаховой (2016) улучшение показателей кислотности наблюдали при внесении осадков сточных вод в дозе 10-20 т/га по сухому веществу. По данным М.А. Подстяженок с соавторами (2020) при сравнении различных видов органических удобрений (навоз, торф, ОСВ) максимальный мелиорирующий эффект на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве наблюдали при внесении ОСВ.

Воздействие ОСВ на микробиологическую активность почв двустороннее. Микробиологическая активность почвы может с одной стороны повышаться при внесении органического вещества с осадками, а с другой стороны возможен негативный эффект внесенных загрязняющих веществ (ТМ) на микроорганизмы (Селивановская и др., 2001; Мерзлая Г.Е., 2006; Тиньгаев, 2010; Тютюнькова и др., 2019; Ерофеева, Антипкина, 2022). В работе М.В. Тютюньковой с соавторами (2019) отмечено увеличение общего количества микроорганизмов в почве в 1,6 раза. Здесь наблюдали повышение доли бактерий и уменьшение доли актиномицетов. При внесении высоких доз ОСВ (60 т/га и более) отмечают снижение микробной биомассы, что объясняется угнетающим действием тяжелых металлов (Воробьева, 2001; Бадмаев, Дорошкевич, 2006; Мерзлая, 2006). Снижение биомассы микробов в почве отмечают и через 20 лет после внесения ОСВ, сильно загрязненных ТМ (Алексеев, 1987).

Обычными компонентами осадков являются яйца гельминтов, сапрофиты и патогенные бактерии, вирусы, грибы, простейшие, водоросли. Обеззараживание ОСВ может быть осуществлено несколькими способами: термофильным сбраживанием в метатенках или термосушкой; пастеризацией; аэробной стабилизацией; компостированием и выдерживанием на иловых площадках в зависимости от климатического района от 1 до 3 лет (СанПиН 2.3.2.560–96). Многолетние исследования, проведенные в Белорусской ГСХА, показали, что при внесении осадков под зяблевую вспашку процессы самоочищения почвы от биологических

загрязнителей завершаются к концу вегетационного периода (Решецкий, 2004).

Многочисленные исследования свидетельствуют о том, что использование ОСВ в качестве удобрения позволяет довольно существенно повысить урожайность самых различных сельскохозяйственных культур. Получены данные о положительном влиянии ОСВ на урожайность зерновых (озимая и яровая пшеница, озимая рожь, ячмень, овес, яровая тритикале) культур (Жукова и др., 1992; Минеев и др., 2003; Пахненко, 2007; Варламова и др., 2009; Гладких, 2009; Мерзлая, Афанасьев, 2020; Касатиков, 2020; Mañas, 2020), картофеля (Хоренко, 2002; Гладких, 2009; Мерзлая, Афанасьев, 2020), кукурузы (Сорока и др., 2020), многолетних кормовых культур (Туровский, 1988; Кижапкин П.П., 2006; Денисов и др., 2007; Климова, Починова, 2009; Тиньгаев, 2010; Харкевич, 2011; Касатиков, Шабардина, 2020).

Применение ОСВ повышает продуктивность фотосинтеза растений (Климова, Починова, 2009; Сорока и др., 2020; Mañas, 2020; Виноградов и др., 2023), увеличивает массу, длину колоса и массу 1000 зерен. ОСВ обладают длительным последействием, в опытах Н.Г. Захарова (2010) эффективность наблюдалась на пятый год после внесения, а по исследованиям Л.А. Жуковой с соавторами (1992) и на седьмой. Последействие объясняют медленной усвояемостью растениями содержащихся в осадках элементов питания. В ОСВ около 50-60 % соединений содержится в органически связанном состоянии, поэтому наиболее полные с агроэкологической точки зрения результаты можно получить только в последействии, когда в почве начинается процесс минерализации внесённого осадка (Воробьева и др., 2000; Постников и др., 2004).

Осадки по своему действию на урожайность сельскохозяйственных культур не уступают подстилочному навозу (Мерзлая и др., 1995; Пахненко, 2007). Прибавка урожайности озимой ржи от внесения равных доз ОСВ и

навоза 25 т/га составила 16,7-18,5, а овса (в последействии) – 6,6-7,7 ц/га (Гладких, 2009). ОСВ оказались эффективнее навоза на кукурузе, ячмене, и гречихе (Цуркан, 1989).

Применение высоких доз ОСВ является малоэффективным мероприятием или даже может привести к заметному снижению урожая вследствие увеличения угнетающего действия содержащихся в осадках вредных для растений компонентов. В исследованиях Р.П. Воробьевой с соавторами (2001) на чернозёмах выщелоченных наибольший урожай яровой пшеницы (выше, чем в контроле, на 20 %) был получен при внесении ОСВ 60 т/га, внесение 80 т/га привело к снижению урожайности. Внесение ОСВ более 50 т/га снижало урожайность зеленой массы донника (Денисов и др., 2007). Следует учитывать, что доза ОСВ, которая обеспечивает получение максимальной урожайности, не всегда позволит получать и экологически безопасную продукцию. Важным фактором повышения урожайности при использовании ОСВ в качестве удобрения является периодичность внесения (Цуркан, 1989; СанПиН 2.3.2.560–96). При внесении ОСВ также следует уделять внимание выбору первой культуры. И.А. Иванов с соавторами (1996) считает, что лучшим местом для этого будет чистый пар или картофель.

В состав ОСВ входят различные ТМ. Для нормирования их поступления в почву при внесении ОСВ разработаны специальные ограничения на их содержание (ГОСТ Р 17.4.3.07 – 2001). По концентрации ТМ и мышьяка осадки подразделяют на 2 группы. Осадки I группы используют под все виды сельскохозяйственных культур, кроме овощных, грибов, зеленных и земляники. Осадки II группы используют под зерновые, зернобобовые, зернофуражные и технические культуры. Однако, даже если содержание ТМ в осадках меньше ПДК, все равно существует потенциальная опасность загрязнения почвы и продукции, поэтому необходим постоянный контроль за их содержанием.

Исследования показывают, что применение ОСВ может привести к загрязнению почвы ТМ, особенно при использовании их в повышенных

дозах (Макаренко и др., 1991; Чеботарев, 1997; Черных и др., 1999; Кутукова, Плеханова, 2002; Минеев и др., 2003; Решецкий, 2004; Кижапкин и др., 2006; Пахненко, 2007; Чеботарев и др., 2016; Касатиков и др., 2018; Бостубаева, Науанова, 2022; Пинаева, Ельшаева, 2022). Внесение ОСВ в почву в суммарной дозе 360-1440 т/га (50 % влажности) с 1984 по 2015 год привело к увеличению содержания ТМ выше допустимых нормативов для валовых и подвижных форм в 1,2-4 раза в зависимости от элемента, его формы и дозы (Касатиков и др., 2016). Существенное значение при внесении в почву осадков имеет интенсивность разложения органического вещества и освобождение связанных с ним ТМ.

По характеристике подвижности ТМ в ОСВ нельзя судить о потенциальном поведении тяжелых металлов в почве, т.к. ТМ взаимодействуя с органическими и минеральными компонентами почвы образуют новые, более прочносвязанные или, наоборот, более подвижные соединения (Алексеев, 1987; Кутукова, Плеханова, 2002; Минеев и др., 2003). Ю.Д. Кутукова и И.О. Плеханова (2002) считают, что внесение ОСВ в первую очередь влияет не на общее содержание тяжелых металлов, а на подвижные формы. Например, валовая концентрация кадмия при суммарной дозе внесения ОСВ 600 т/га увеличилось в 20-22 раза, а количество подвижных форм в 54-58 раз. Есть данные, что концентрация подвижных форм ТМ возрастает только в первый год после внесения ОСВ, затем через 2-3 года начинается постепенное снижение за счет процессов иммобилизации элементов, их миграции вниз по профилю почвы, транслокации в растениях и переход в труднодоступные соединения (Пахненко, 2007).

С другой стороны расчеты Д.М. Хомякова (1991) показали, что внесение 1-4 т/га сухого вещества ОСВ с содержанием элементов на уровне ПДК может на 8-10 лет обеспечить бездефицитный баланс микроэлементов в севообороте. Это очень важно, поскольку почвы с низкой обеспеченностью микроэлементами составляют в различных районах страны от 10 до 40 % всей площади пашни.

В любом случае применение ОСВ в определенной мере приводит к загрязнению почвы и продукции ТМ. Этот факт ставит задачу строго контроля за применением ОСВ в качестве удобрения с учетом особенностей почв, осадков и удобряемой культуры. В работе Н.Т. Чеботарева с соавторами (2016) показано, что при внесении ОСВ в высоких дозах (60 и 120 т/га) содержание Pb, Cd, Ni, Cr превышало предельно допустимую концентрацию в клубнях картофеля и зерне ячменя в 1,2-15,0 раза.

Заключение по обзору литературы

Длительное экстенсивное сельскохозяйственное использование почвы приводит к существенному изменению и деградации основных параметров её плодородия. Удобрения – основной фактор обеспечивающий сохранение или улучшение свойств почвы и рост урожайности сельскохозяйственных культур. Эффективность и экологическую безопасность использования различных систем удобрений наиболее четко получается проследить в рамках длительных исследований. Это отражено в многочисленных работах отечественных и зарубежных исследователей. Установлено, что в большинстве случаев, органоминеральные и минеральные системы удобрения по влиянию на продуктивность сельскохозяйственных культур и окупаемости имели преимущество над органическими. Выявлено влияние минеральных и органических удобрений на трансформацию органического вещества почвы, изменение азотного, фосфатного и калийного режимов, показателей кислотности, биологических свойств почвы. Изучены экологические аспекты применения удобрений. Установлено положительное и отрицательное влияние систематического применения удобрений, которое зависит от вида, дозы (насыщенности пашни), сбалансированности и периодичности внесения. Выявлено негативное влияние длительного применения минеральных удобрений (особенно при использовании физиологически кислых форм и высоких доз), на показатели кислотности почвы, сумму поглощенных оснований, степень насыщенности почв

основаниями, содержание обменных форм кальция и магния. Внесение органических удобрений в большинстве случаях сглаживает отрицательное воздействие минеральных. Однако многие литературные данные по влиянию удобрений на показатели плодородия почвы часто противоречивы или изучены не достаточно полно, например, показано содержание только подвижных соединений элементов питания, отсутствуют данные по изменению других форм. Большинство исследований посвящено изучению пахотного и подпахотного слоев. Влияние сельскохозяйственного использования пашни и удобрений на более глубокие слои изучено слабо. Часто выводы о влиянии применения различных систем удобрения на плодородие почвы основывается на сравнении с контрольным вариантом на данный момент времени, а не с исходным уровнем или целинными аналогами, что может приводить к искажению трактовки результатов. Также представляет научный интерес изучение влияния длительного применения NPK-дефицитных систем удобрения, особенно моноазотных, на трансформацию параметров плодородия почв. Опубликованных работ в данном направлении немного.

Для сохранения плодородия почв, в сложившихся современных экономических условиях, необходимо использовать все возможные ресурсы, в том числе и применение нетрадиционных удобрений. Многочисленные исследования, проведенные в России и за рубежом, свидетельствуют о возможной утилизации ОСВ в качестве нетрадиционных органических удобрений. В научной литературе накоплен большой материал по влиянию ОСВ на свойства почвы, продуктивность культур и накопление ТМ в объектах окружающей среды. Однако, учитывая разнообразие их химического состава, почвенно-климатических условий и ряд других аспектов данный вопрос до сих пор актуален. Особенно мало исследований по оценке длительного применения ОСВ, большинство исследований носят краткосрочный характер (2-5 лет).

В связи со снижением плодородия почв во многих регионах Российской Федерации существует необходимость комплексных исследований по влиянию систем удобрений на трансформацию параметров плодородия почв и продуктивность сельскохозяйственных культур для пополнения базы данных, которая позволит создать модель почвенного плодородия в условиях повышающейся антропогенной нагрузки с учетом секвестрации атмосферного углерода и его депонирования в почве, критериев антропогенной трансформации органического вещества и элементов минерального питания почвы.

В условиях Среднего Предуралья на основе данных трех длительных полевых опытов Геосети (1969-2022 гг.) проведена оценка эффективности длительного применения различных систем удобрений (органической, минеральной, органоминеральной, NPK-дефицитных систем, с использованием ОСВ), охватывающая исследования количественной и качественной трансформации органического вещества почвы, азотного, фосфатного, калийного режимов, физико-химических свойств, экофизиологических параметров и структуры микробиологических сообществ, изменения продуктивности сельскохозяйственные культур, накопления тяжелых металлов в почве и растениях.

2 УСЛОВИЯ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Диссертационная работа выполнена в Пермском НИИСХ – филиале ПФИЦ УрО РАН на основе данных трех длительных полевых опытов 1969-1978 гг. закладки. Оценка изменений, вызываемых длительным антропогенным воздействием, получена при сравнении данных агроценозов с целинной почвой (злаково-разнотравный луг). Лабораторные исследования выполнены в аналитической лаборатории Пермского НИИСХ, в ИТХ УрО РАН, ИЭГМ УрО РАН, ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока и ФГБУ "ГЦАС "Пермский".

2.1 Объекты и методика исследований

Объектами исследований в данной диссертационной работе были целинная дерново-подзолистая почва, бессменный чистый пар, агрофитоценозы и системы удобрений. Сравнение данных, полученных в условиях агроценозов и ненарушенных (целинных) земель, дают возможность оценить характер изменений, вызываемых антропогенным воздействием. Для наших исследований это особенно актуально, т.к. нет возможности достоверно узнать, когда было проведено сельскохозяйственное освоение земель, на которых позднее было расположено опытное поле Пермского НИИСХ – филиала ПФИЦ УрО РАН. Для этих целей в 2011 году были заложены стационарные участки на злаково-разнотравном лугу, который непосредственно примыкает к опытному полю. Ботанический состав травостоя естественного злаково-разнотравного луга: 62,0 - злаковые, 13,5 - бобовые, 24,5% - разнотравье. Травостой не отчуждался.

Закладка полевых опытов проведена по общепринятым методикам (Опытное дело в полеводстве, 1982; Доспехов, 1968, 1985) на центральном опытном поле Пермского НИИСХ (1969, 1976, 1978 гг.) на дерново-

подзолистых тяжелосуглинистых почвах. Полевые опыты включены в российскую Геосеть.

Полевой опыт №1. Изучение системы удобрения на подзолистых почвах Предуралья (год закладки 1969). Аттестат длительного опыта № 19. Полная схема опыта включает 26 вариантов, для исследований были выбраны 8.

Схема опыта:

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

Минеральные удобрения вносили по эквивалентному содержанию питательных веществ в навозе. 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 по $N_{55}P_{40}K_{80}$ под зерновые и картофель), при насыщенности 20 т/га – 2800, 1900 и 4140 кг/га ($N_{70}P_{50}K_{100}$ в год или по $N_{110}P_{75}K_{165}$ под зерновые и картофель) соответственно. Солома в опыте после уборки до 2013 года отчуждалась. Формы удобрений – аммонийная селитра или мочевина, двойной или простой суперфосфат, калий хлористый. Минеральные удобрения под яровые зерновые и картофель вносили весной перед посевом, под озимые культуры дробно – осенью и весной в подкормку. 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 заложен в двух последовательных во времени закладках (1978 г., 1980 г.). Общая площадь делянки – 120 м^2. Исследования проводили в полевом восьмипольном парозернопропашном севообороте со следующим чередованием культур: чистый пар, озимая рожь, картофель, яровая пшеница с подсевом клевера, клевер 1 г.п., клевер 2 г.п., ячмень, овес. Формы удобрений – аммонийная селитра или мочевина, двойной или простой суперфосфат, калий хлористый. Минеральные удобрения под яровые

зерновые и картофель вносили весной перед посевом, под озимые культуры дробно – осенью и весной в подкормку. Солома в опыте после уборки до 2013 года отчуждалась. 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 опыта:

1. Без удобрений (контроль)
2. Навоз
3. ОСВ
4. NPK - фон
5. Фон + навоз
6. Фон + ОСВ

Органические удобрения (ОСВ, навоз КРС) по 40 т/га натуральной влажности (насыщенность 5,7 т/га в год) вносили в пару 1 раз в ротацию севооборотов. ОСВ вносили в I - VI ротациях, навоз в III-VI ротациях севооборота. Минеральные удобрения (I ротация - $N_{120}P_{120}K_{120}$, II ротация - $N_{90}P_{90}K_{90}$, III-VI ротации - $N_{60}P_{60}K_{60}$) вносили под все зерновые культуры. Повторность вариантов в опыте трехкратная, расположение делянок систематическое. Общая площадь делянки 47,5 $м^2$. Формы удобрений – аммонийная селитра или мочевина, двойной или простой суперфосфат, калий хлористый. Минеральные удобрения под яровые зерновые вносили весной перед посевом, под озимую рожь дробно – осенью и весной в подкормку. Наблюдения проводили в полевом семипольном парозернотравяном севообороте с чередованием культур: чистый пар (I ротация - занятый пар) – озимая рожь – яровая пшеница с подсевом клевера – клевер 1 г.п. – клевер 2 г.п. – ячмень – овес. Солома в опыте после уборки до 2013 года отчуждалась. Химический состав органических удобрений представлен в таблице 2. За пять ротаций севооборота (1976-2013 гг.) с ОСВ и навозом в почву поступило азота – 0,9 и 0,5 т, фосфора – 1,8 и 0,8 т и калия 0,3 т,

соответственно. Осадки, применяемые в опыте в V-VI ротациях севооборота, по агрохимическим показателям и содержанию 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 (прил. 1).

Таблица 2 – Химический состав ОСВ и навоза (усреднённые данные)

Удобрение	Влажность, %	pH_{KCl}	Содержание, % на а.с.в.			
			ОВ	$N_{общ}$	$P_{общ}$	$K_{общ}$
Навоз	72 (62-81)*	7,3 (6,9-7,7)	75 (72-79)	1,8 (1,5-2,1)	2,1 (1,8-2,3)	1,0 (0,8-1,3)
ОСВ	63 (42-83)	6,5 (6,3-6,9)	66 (60-78)	2,0 (0,7-3,5)	3,1 (2,0-4,6)	0,5 (0,3-0,9)

* - диапазон варьирования показателя.

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.

На рисунке 1 представлено размещение объектов исследования в пространстве.

Рисунок 1 – Схема размещения объектов исследования: 1 – злаково-разнотравный луг; 2 – полевой опыт 1; 3 –полевой опыт 2; 4 – полевой опыт 3; 5- бессменный чистый пар

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

2.2 Методика наблюдений и анализов

Отбор образцов почв 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 злаково-разнотравном лугу наблюдения и исследования в верхнем слое почвы (0-20 см) проводили в течение 2011-2021 гг. Почвенный разрез заложен в 2013 г., отобраны образцы по генетическим горизонтам. Отбор образцов по слоям до глубины 1 метр (0-20, 20-40, 40-60, 60-80 и 80-100 см) проведен в 2015 г.

Анализы в воздушно-сухих почвенных образцах проводили с использованием следующих методов:

- ✓ Определение pH солевой вытяжки – потенциометрическим методом (ГОСТ 26483-85).
- ✓ Определение гидролитической кислотности по методу Каппена – потенциометрическим методом (ГОСТ 26212-84).
- ✓ Определение суммы обменных оснований по методу Каппена-Гильковица – титриметрическим методом (ГОСТ 27821-88).
- ✓ Определение степени насыщенности почв основаниями расчётным методом.
- ✓ Определение обменного кальция и магния по методу ЦИНАО (ГОСТ 26487-85)
- ✓ Определение подвижного фосфора по Кирсанову в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26207-91).
- ✓ Определение подвижного калия по Кирсанову в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26207-91).
- ✓ Определение содержания гумуса по Тюрину в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26213-91).
- ✓ Определение обменного аммония в почве по методу ЦИНАО (ГОСТ 26489-85).

- ✓ Определение нитратов в почве ионометрическим методом (ГОСТ 26951-86).
- ✓ Определение общего азота проводили по методу Къельдаля, фракционный состав по Э.И. Шконде, И.Е. Королёвой (Агрохимические методы…, 1975).
- ✓ Определение общего содержания фосфора в почве, его минеральных и органических соединений методом прокаливания Сэндерса и Вильямса Агрохимические методы…, 1975).
- ✓ Определение фракционного состава минеральных фосфатов методом Гинзбург-Лебедевой (Агрохимические методы…, 1975).
- ✓ Степень подвижности фосфатов почвы по методу Карпинского и Замятиной (Агрохимические методы…, 1975).
- ✓ Определение валового содержания калия после мокрого озоления в смеси концентрированной серной кислоты и перекиси водорода (Способ определения валовых…, 2013).
- ✓ Определение легкоподвижной формы калия проводили в 0,01М $CaCl_2$ вытяжке, необменной - по Гедройцу. Расчет содержания необменных соединений определяли по разности содержания калия в 10% HCl вытяжке и подвижных по методу Кирсанова (Агрохимические методы…, 1975).
- ✓ Определение валового содержания тяжелых металлов и их подвижных форм (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).
- ✓ Субстрат-индуцированное дыхание (СИД) почвы оценивали по скорости начального максимального дыхания микроорганизмов после обогащения почвы дополнительным источником углерода и энергии – глюкозой. Навеску почвы (1 г) помещали во флакон (объем 15 мл), добавляли раствор глюкозы (0,1 мл), результирующая концентрация которой составляла 10 мг/г, герметично закрывали и фиксировали время. Обогащенный глюкозой образец почвы инкубировали (3–5 ч при температуре 22°С), затем отбирали шприцем пробу газовой фазы из флакона и вводили в газовый

хроматограф Chrom 5 (катарометр) для регистрации CO_2. Время отбора газовой пробы также фиксировали. Скорость СИД выражали в мкл CO_2/г почвы в час (Ананьева и др., 2011; Anderson, Domsch, 1978).

- ✓ Углерод микробной биомассы ($C_{мик}$) почвы рассчитывали по формуле: $C_{мик}$ (мкг С/г почвы) = СИД (мкл CO_2/г почвы в час) × 40,04 + 0,37 (Ананьева, 2003; Ананьева и др., 2011; Anderson, Domsch, 1978).
- ✓ Скорость базального (микробного) дыхания определяли в нативной (необогащенной) почве (24 ч, 22°С). Измерение БД выполняли как для СИД, а вместо раствора глюкозы в почву вносили воду (0,1 мл/г). Скорость БД выражали в мкг С-CO_2 /г час (Ананьева, 2003; Ананьева и др., 2009).
- ✓ Удельное дыхание микробной биомассы или микробный метаболический коэффициент (qCO_2) рассчитывали как отношение БД/$C_{мик}$ = qCO_2 (мкг CO_2 С/мг С мик час) (Anderson, Domsch, 1978).
- ✓ Долю углерода микробной биомассы в составе органического углерода почвы рассчитывали, как отношение $C_{мик}/C_{орг}$ (%) (Ананьева, 2003).
- ✓ Потенциальную активность азотфиксации определяли ацетиленовым методом (Эмер и др., 2014). В почву добавляли глюкозу в количестве 1% от массы воздушно-сухого образца. Флаконы инкубировали 24 ч при температуре 28°С, после чего закрывали резиновыми пробками и внутрь каждого флакона вводили ацетилен. Через 2 ч инкубации с ацетиленом в пробах газовой смеси определяли количество этилена в ацетилене газово-хроматографическим методом. Количественные измерения проводили на хроматографе Chrom 5.
- ✓ Определение численности микроорганизмов основных эколого-трофических групп и таксонов почвы методом посева на среды:

Из каждого образца для анализа брали по две усредненных навески массой 1,0 г, растирали почву в ступке до кашицеобразного состояния с 1 мл стерильной воды, затем готовили серию последовательных десятикратных разведений (Методы почвенной микробиологии…,1980). Посев на агаризованные среды производили поверхностным методом из трех

последних разведений в трехкратной повторности. Каплю суспензии (0,1 мл) на поверхности агара распределяли шпателем по всей площади среды до полного высыхания. Чашки с посевами инкубировали в термостате при 28^0С в течение 3-14 сут, в зависимости от учитываемой группы микроорганизмов. Количество колониеобразующих единиц (КОЕ) различных эколого-трофических групп пересчитывали на 1 г в.с. почвы с учетом разведения суспензии. Количество микроорганизмов, усваивающих органические формы азота (аммонифицирующих) учитывали на мясо-пептонном агаре (МПА), усваивающих минеральные источники азота – на крахмало-аммиачном агаре (КАА), целлюлозолитиков – на агаре Гетчинсона с пластинкой фильтровальной бумаги в качестве единственного источника углерода, олиготрофных микроорганизмов – на почвенном агаре (ПА), олигонитрофильных и азотфиксирующих микроорганизмов - на агаре Эшби (ЭА), актиномицеты – на казеин-глицериновом агаре (КГА), микроскопические грибы – на агаре Чапека (ЧА) (Практикум по микробиологии, 2005).

Для характеристики изменений в структуре почвенного микробного сообщества рассчитывали коэффициенты минерализации (КАА/МПА), педотрофности (ПА/МПА или ЭА/МПА) (Звягинцев Д.Г., 2003; Титова, Козлов, 2012) и коэффициент трансформации органического вещества ((КАА+МПА)•МПА/КАА)((Зинченко, 2019, 2022).

При выявлении структурных перестроек микробного сообщества в качестве модельной группы микроорганизмов использовали вырастающие на казеин-глицериновом (КГА) агаре актиномицеты, проводя дифференцированный учет колонии разных морфотипов. Для характеристики структуры комплексов определяли частоту встречаемости и долевое участие представителей отдельных секций и серий рода Streptomyces. Морфологические признаки исследовали при помощи светового микроскопа Leica DM 2500 (Carl Zeiss, Германия). Принадлежность выделенных культур актиномицетов к роду *Streptomyces*

определяли на основании характерных морфологических признаков: нефрагментированный мицелий, длинные цепочки спор – на воздушном и отсутствие спор – на субстратном мицелии. Диагностические признаки природных изолятов стрептомицетов изучали на минеральном агаре 1, органическом агаре 11, глицерин-нитратной, овсяной и пептон-дрожжевой средах в соответствии с ключом Гаузе с соавт. (Гаузе и др., 1983). Таксономическое положение выборочно отобранных штаммов (культуры с различными морфотипами колоний) определяли на основе анализа фрагментов 16S рРНК в НПК “Синтол” (г. Москва). Первичный сравнительный анализ полученных нуклеотидных последовательностей с последовательностями из базы данных GenBank проводили с помощью программы NCBI BLAST (http://www. ncbi.nlm.nih.gov/blast). Парное выравнивание последовательностей осуществляли с помощью программы LALIGN (https://embnet.vital-it.ch/ software/LALIGN_form.html).

Элементный состав гуминовых кислот определяли на CHN – элементном анализаторе фирмы «Perkin – Elmer» (США), количество кислорода вычисляли по разности (все расчеты приведены на обеззоленную и безводную навеску, зольность препаратов составляла 8-12%). Повторность определения структурных элементов ГК – шестикратная. ИК-спектры поглощения регистрировали на Фурье-спектрометре VERTEX-80v (фирмы «Bruker», Германия) в диапазоне 4000-400 $см^{-1}$ при спектральном разрешении 2 $см^{-1}$. Обработку спектров проводили с помощью пакета прикладных программ OPUS. Повторность снятия ИК-спектров и кривых дифференциального термического анализа - трехкратная. Препараты гуминовых кислот выделены по классической методике Российской школы почвоведов, которая отличается от рекомендаций Международного гуминового общества (IHSS) (Swift, 1996) тем, что почву экстрагируют щелочью не менее трех раз на обычном воздухе, анализируют объединенный экстракт. Препаративное выделение ГК осуществляли 3-кратным экстрагированием 0,1 н раствором NaOH из декальцированной почвы. Для

очистки от илистой фракции применяли коагулятор Na_2SO_4 и центрифугирование. Из раствора гумусовых веществ, очищенного от минеральных примесей, ГК осаждали при 50-60^oC подкислением до pH 2-3. Для дальнейшей очистки препаратов проводили их 2-кратное переосаждение. Препараты высушивали при температуре 40^oC.

Расчет углеродпротекторной емкости (СРС) проводили по трем уравнениям линейной регрессии:

$СРС_1 = 4{,}09 + 0{,}37\ S_1$ (Hassink, 1997),

$СРС_2 = 3{,}86 + 0{,}41\ S_2$ (Six et al., 2002),

$СРС_3 = 14{,}76 + 0{,}21 S_3$ (Six et al., 2002),

где $СРС_1$, $СРС_2$, $СРС_3$ – углеродпротекторная емкость почвы, гС/кг почвы; S_1 – доля гранулометрических частиц <0,02 мм, % от массы почвы; S_2 – доля гранулометрических частиц <0,02 мм с доминированием 2:1 минералов, % от массы почвы; S_3 – доля гранулометрических частиц <0,05 мм с доминированием 2:1 минералов, % от массы почвы.

В работе J. Six с соавторами (2002) предложено учитывать минералогический состав почвы, поскольку при одном и том же содержании фракций пыли и глины почвы с доминированием 2:1 минералов (преобладание в минеральном составе почвы глины) способны стабилизировать больше углерода, чем почвы с 1:1 минералами (преобладание в минеральном составе почвы оксидов железа и алюминия). В исследуемой дерново-подзолистой почве Предуралья доминируют глинистые минералы (Глазовская и др., 2004), поэтому в работе использовали соответствующие уравнения.

По методу Качинского при определении гранулометрических фракций не проводится определение частиц размером <0,02 мм, пересчет их содержания проводили по кумулятивной кривой распределения содержания гранулометрических фракций в зависимости от логарифма диаметра частиц.

В растительных образцах проводили определение:

✓ общего содержания азота (ГОСТ 13496.4-93);

- ✓ общего содержания фосфора (ГОСТ 26657-97);
- ✓ общего содержания калия (ГОСТ 32250-2013);
- ✓ тяжелых металлов на атомно-абсорбционном спектрометре iCE 3500 с пламенной атомизацией (Thermo Scientific (США)) (Методические указания…, 1992).
- ✓ содержание углерода определяли на элементном анализаторе Elementary Vario ElCub.

Урожайность зерновых культур в полевых опытах учитывали сплошным методом с каждой делянки, клевера – сплошным методом или пробными снопами, картофеля – сплошным методом или косвенным. Урожайность основной продукции культур пересчитывалась на стандартную влажность и чистоту (Доспехов, 1985).

Расчёт баланса органического углерода проводили по методике, предложенной А.М. Лыковым (1979). Баланс углерода рассчитывался как разность между статьями его прихода (гумификация пожнивно-корневых остатков и органических удобрений) и расхода (минерализация при возделывании сельскохозяйственных культур). Потери определяли по выносу азота урожаем сельскохозяйственных культур. Поступление биологического азота с клевером рассчитывали как 2/3 от выноса культурой. Коэффициенты использования элементов питания из удобрений рассчитывали разностным способом. 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

Пермский край граничит на севере с Республикой Коми, на юге с Республикой Башкортостан, на западе – с Кировской областью и Республикой Удмуртия, на востоке – со Свердловской областью. Площадь составляет более 160 тыс. км^2. В структуре земельного фонда значительную площадь занимают земли лесного фонда – 10,7 млн. га (67,1 %), площадь земель сельскохозяйственного назначения занимают 3,8 млн. га (23,6 %) территории.

Почвенный покров Пермского края характеризуется пестротой, мелкоконтурностью и частой пространственной сменой почв, обусловленных влиянием рельефа, почвообразующих пород, уровнем грунтовых вод, характером растительного покрова. По данным почвенного очерка и почвенной карты Пермской области 1989 г. большую часть (69,5 %) почвенного покрова территории региона занимают дерново-подзолистые почвы. На долю серых лесных приходится 12,1 %, дерново-карбонатных – 9,8 %, остальных – 8,6 % (Кайгородов, Пискунова, 2017). По другим данным почти 75 % почвенного покрова региона составляют дерново-подзолистые и подзолистые почвы (Коротаев, 1962). По гранулометрическому составу почвы относятся преимущественно к глинам, тяжелым и средним суглинкам. В целом почвы тяжелого механического состава составляют около 85 % площади края (Петухов, Прокошев, 1964).

Анализ использования удобрений и средств химической мелиорации почв в период интенсивной химизации (1971–1995 гг.) показал, что благодаря их внесению в дозах, превышающих вынос сельскохозяйственными культурами, складывающемуся положительному балансу питательных веществ в земледелии, наблюдали повышение плодородия почв. Современный уровень применения удобрений не только не обеспечивает повышения плодородия, но и не компенсирует выноса с урожаем. В Пермском крае с 1966 по 1990 гг. насыщенность пашни минеральными удобрениями варьировала от 30 до 97 кг/га д.в.,

органическими от 2,0 до 4,3 т/га в год. За последние двадцать лет насыщенность пашни минеральными удобрениями составила 12-18 кг д.в., органическими 1,4-2,4 т/га (Кайгородов, Пискунова, 2017). Удельный вес площади с внесёнными минеральными удобрениями во всей посевной площади края в 2017-2022 гг. варьировал от 32 до 40%, органическими - от 3,9 до 5,2 % (прил. 2). Отрицательный баланс по азоту с 1990 по 2020 года изменялся от минус 25 до минус 60 кг, по фосфору от минус 5 до минус 20 и по калию от минус 25 до минус 75 кг. Возмещение выноса элементов питания в регионе за последние годы с учетом вносимых объемов удобрений, применения сидератов и соломы не превышало 10-15%.

Анализ результатов мониторинга плодородия почвы в Пермском крае свидетельствует о том, что с 2008 г. основные ее агрохимические свойства ухудшаются, как и во всей Нечерноземной полосе. Согласно данным центра агрохимической службы в настоящее время почти 85% пахотных земель в Пермском крае относятся к категории низкой и очень низкой обеспеченности по гумусу, 80 % составляют кислые почвы. Площадь пахотных угодий с содержанием подвижного фосфора менее 100 мг/кг составляет 67 % (очень низкое и низкое содержание (< 50 мг/кг) - 34 %, среднее (50-100 мг/кг) – 33 %). Средневзвешенная обеспеченность фосфором более 100 мг/кг отмечена только в 9 из 33 районов края (Кайгородов, Пискунова, 2017). С 1996 года в некоторых районах произошло уменьшение доли пашни с высоким и очень высоким содержанием в почве фосфора в 1,5-2,0 раза (Мудрых, 2019). Содержанием подвижного калия менее 120 мг/кг наблюдается на 55 % площадей пахотных угодий (очень низкое и низкое содержание (< 80 мг/кг) - 14 %, среднее (80-120 мг/кг) – 41 %).

Почва исследуемых объектов – дерново-подзолистая тяжелосуглинистая (Классификация и диагностика почв, 1977 г.; Самофалова, 2011). 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).

Агрохимическая характеристика почвы до закладки опытов приведена в таблице 3. Описание почвенных разрезов целинной и пахотной почвы, агрохимические свойства, морфологические признаки и гранулометрический состав представлены в приложениях 3-7.

Таблица 3 - Агрохимическая характеристика пахотного слоя почвы (0-20 см) полевых опытов перед закладкой

Год закладки	$C_{орг}$,%	S	Hг	Hо	V, %	pH_{KCl}	P_2O_5	K_2O
		смоль(экв)/кг					мг/кг	
Опыт 1								
1969, 1970 (среднее)*	1,33	16,4	3,1	0,12	84	5,5	162	173
Опыт 2								
1978, 1980 (среднее)**	1,24	21,0	2,0	0,025	91	5,6	175	203
Опыт 3								
1976***	1,28	18,1	3,7	-	83	4,8	154	170
Бессменный чистый пар								
1977***	1,22	15,5	2,3	-	87	5,2	225	196

*- до известкования; ** - после известкования, *** - не известковали.

Почвы слабогумусированные (Справочник агронома-эколога…, 2012), слабо- и среднекислые, содержание подвижного фосфора – высокое и очень высокое, подвижного калия – повышенное и высокое. Степень насыщенности почв основаниями повышенная и высокая. По содержанию частиц физической глины в верхних слоях - почвы тяжелосуглинистые (прил. 7).

2.4 Климатические условия проведения исследований

Отличительной особенностью климата Предуралья, составной частью которого является Пермский край, по сравнению с другими районами Нечерноземной зоны России, является его континентальность, обусловленная расположением Урала в глубине материка. На большей части равнинной территории средняя температура самого холодного месяца года - января равна –15-16^{0}С, в Предгорной части вдоль Уральского хребта –17-18^{0}С. Самый теплый месяц – июль со средней температурой от 16^{0}С до 18^{0}С и более. Разница между средними температурами июля и января в Перми

составляет 33,2^{0}С, а в близких к ней по широте Иваново и Костроме она равна 29,2^{0}С и 29,4^{0}С. О выраженной континентальности климата Уральского региона Нечерноземной зоны свидетельствует и высокая вероятность засух и суховеев, которая составляет 24,0-24,9% по сравнению с 9,4-10,0% в Костромской и Ивановской областях.

Зима в Предуралье холодная, продолжительная и многоснежная. Устойчивый снежный покров устанавливается в конце октября – начале ноября, а сходит в конце апреля – начале мая, высота снежного покрова варьирует от 50 до 80 см. В весенне-летний период возможны возвраты холодов, связанные с вторжением арктического воздуха. Длительный период со снежным покровом (150-170 дней) и вероятность возврата холодов после его схода создают неблагоприятные условия для перезимовки озимых зерновых культур и многолетних трав.

На равнинной части Предуралья продолжительность периода активной вегетации с температурами 10^{0}С и выше – 114-132 дня, безморозный период – 90-120 дней, сумма активных температур колеблется в северных районах, освоенных в сельскохозяйственном отношении в пределах 1600-1800^{0}С, южных – 1800-2000^{0}С. Осадков выпадает 400-600 мм в год, на вершинах и склонах гор – до 1000 мм в год. Отличительной особенностью для большинства районов Предуралья является достаточная или избыточная обеспеченность сельскохозяйственных растений влагой и умеренная или недостаточная - теплом. В целом климатические условия Пермского края благоприятны для возделывания зерновых (озимой ржи, озимой и яровой пшеницы, овса, ячменя), зернобобовых (горох, озимая и яровая вика) культур, многолетних и однолетних трав, картофеля.

Проведённый анализ динамики климатических ресурсов в Пермском крае за 1957-2010 гг. (по пяти зонам: 1 – северная, 2 – северо-западная, 3 – центральная, 4 – южная, 5 – юго-восточная) показал, что климат в Пермском крае становится более неустойчивым (Косолапова, Васбиева, 2011). В течение вегетации отмечаются большие перепады (10-15 °С) среднесуточных

температур воздуха и количества выпавших осадков. Отмечено повышение среднесуточных температур в течение вегетационного периода на 0,6 ^{0}С, количества выпавших осадков в зависимости от зоны – на 54-68 мм. В Пермском крае увеличилась продолжительность безморозного периода, а вегетационный период удлинился за счёт осенних месяцев (октябрь, 1 декада ноября). Положительные температуры воздуха в октябре и первой половине ноября отрицательно сказываются на посевах озимых культур, высеянных в рекомендуемые сроки (для северной зоны – 1-10 августа, центральной – 15-20 августа, южной – 15-25 августа). Они наращивают большую вегетативную массу, интенсивно кустятся, из-за чего создаются плохие условия для перезимовки растений озимых культур. На фоне избыточного количества атмосферных осадков наблюдаются поздние весенние снижения температуры и ранние осенние заморозки, как на почве, так и в воздухе.

Потепление климата особенно проявилось в северо-западной и центральной частях Пермского края. Это, скорее всего, обусловлено деятельностью человека. В частности, в северо-западной части вырубаются большие массивы лесов, а в центральной сконцентрированы предприятия, загрязняющие окружающую среду, перерабатывающие комплексы химической и нефтеперерабатывающей промышленности на фоне слабой залесённости и высокой степени распаханности территории.

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% (рис. 2, прил. 8). Сумма средних суточных активных температур выше 10^0 варьировала от 1223 (1992) до 2148 (2021) °С (рис. 3). 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 сельскохозяйственных культур.

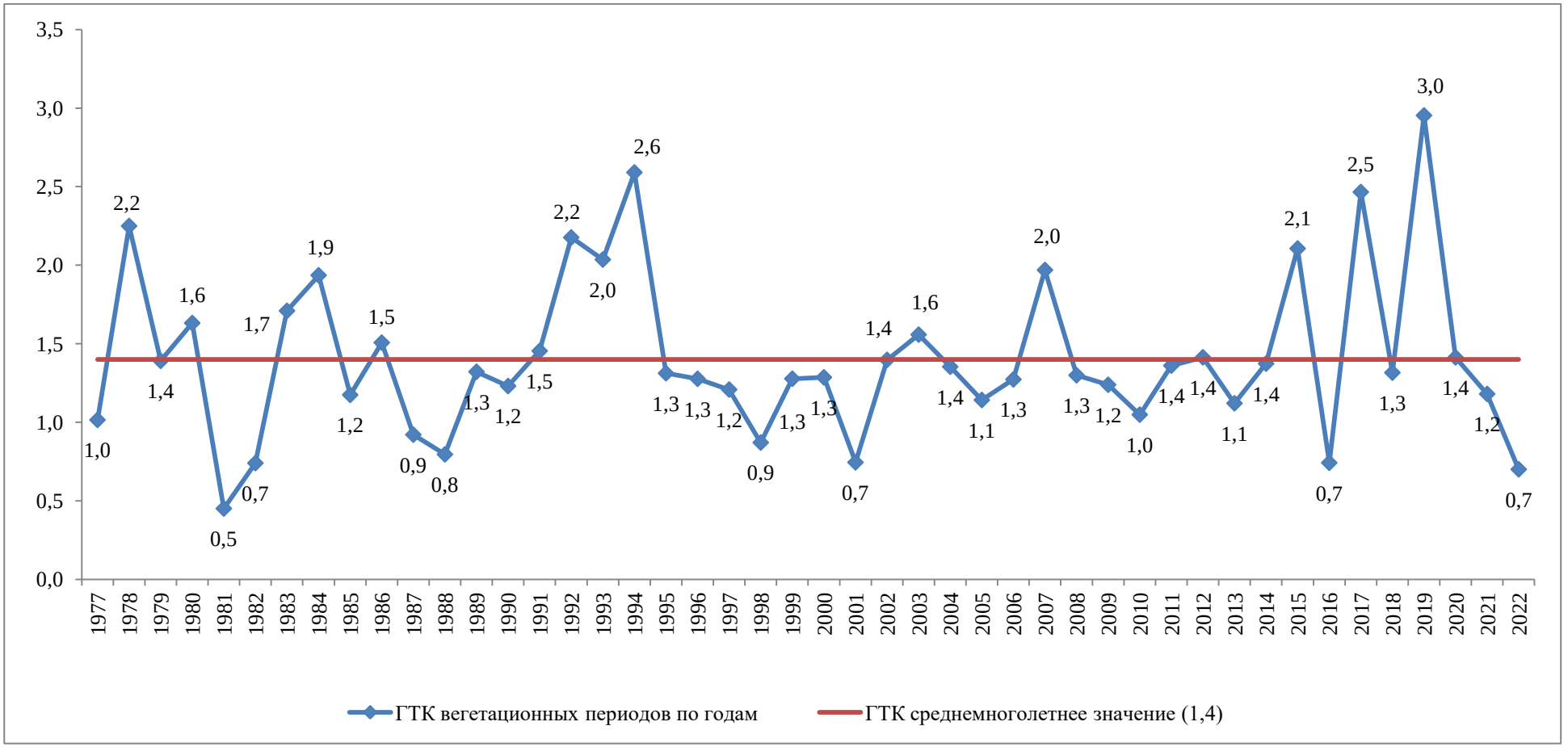


Рисунок 2 - Гидротермический коэффициент вегетационных периодов (май-август) сельскохозяйственных культур по годам исследований (1977-2022 гг.)

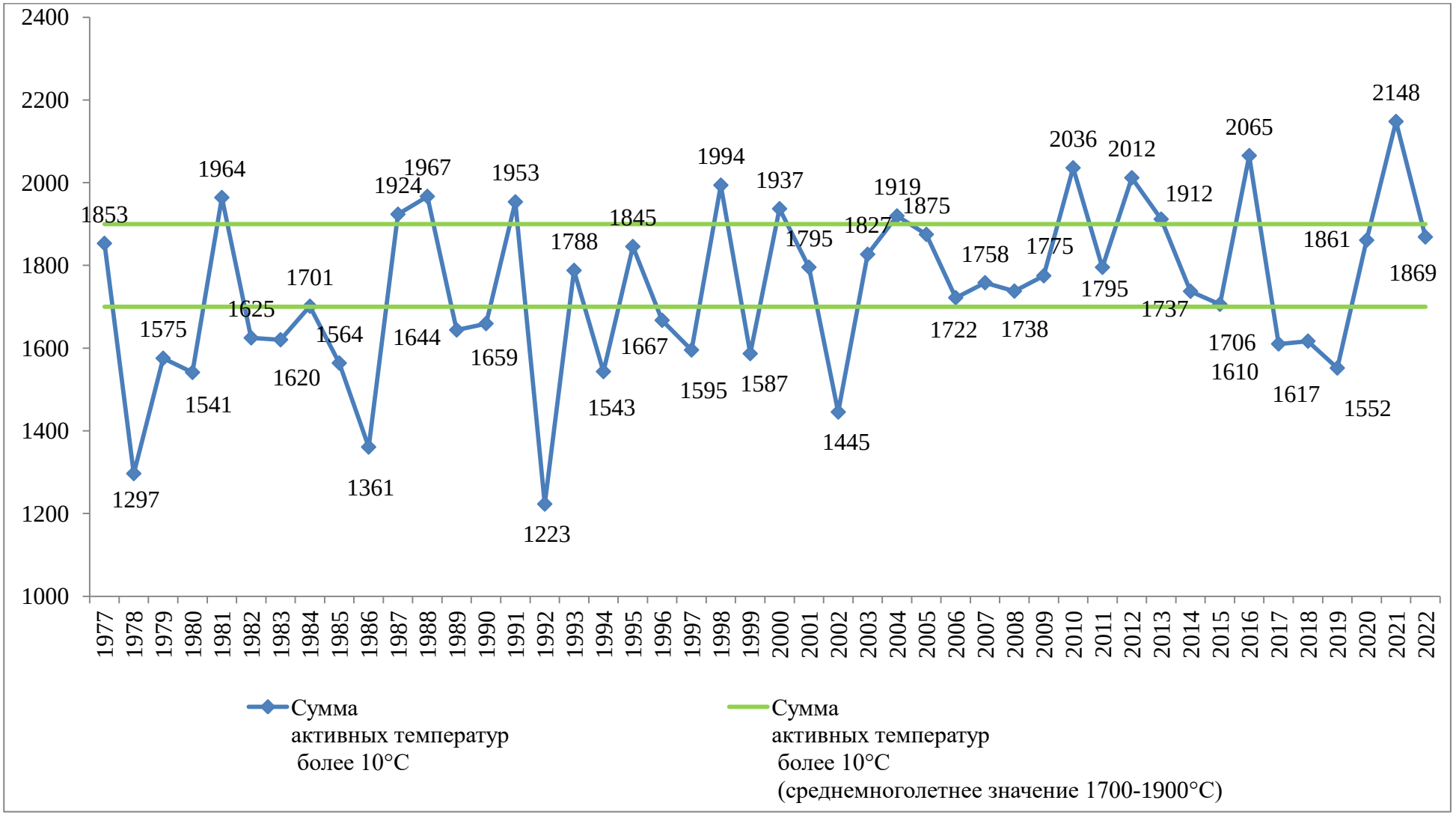


Рисунок 3 - Сумма средних суточных активных температур выше 10^0 по годам исследований (1977-2022 гг.)

3 РЕЖИМ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПАШНИ И ПРИМЕНЕНИИ УДОБРЕНИЙ

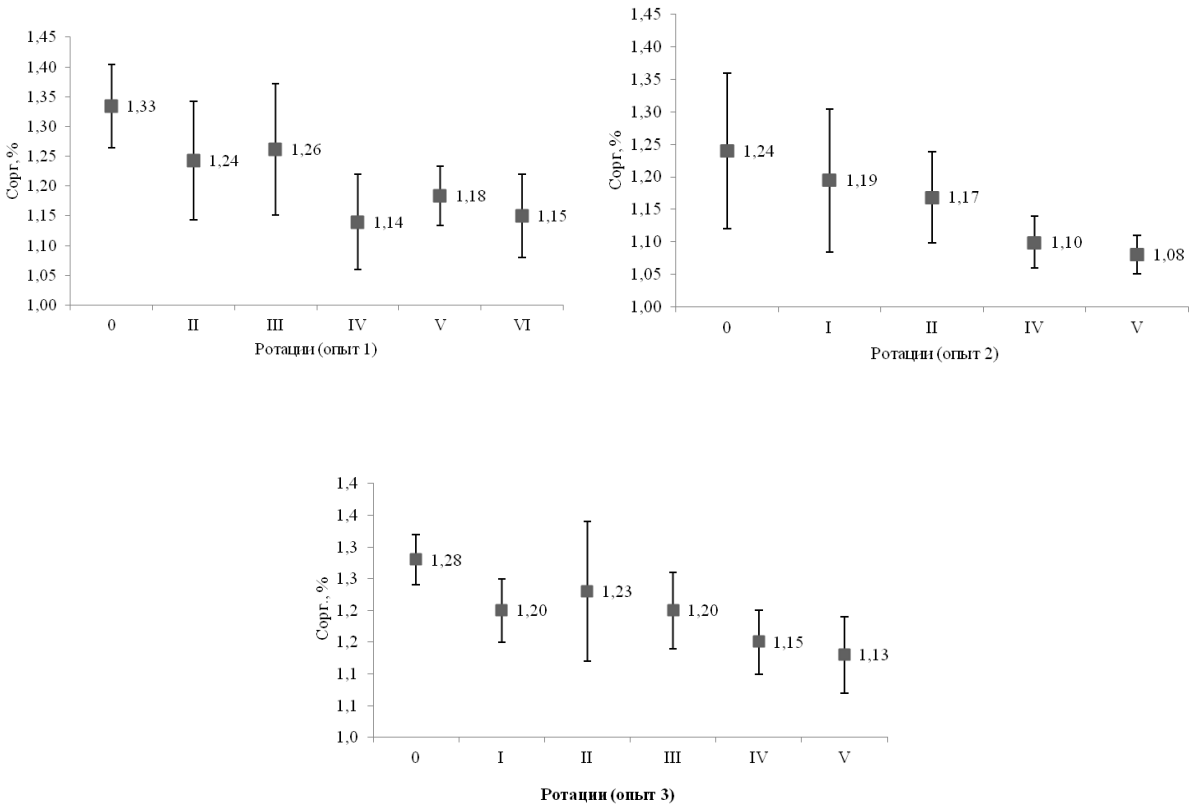
Почва – основное средство производства в сельском хозяйстве. Не рациональное использование почв ведёт к деградации их плодородия, дегумификации накопленного органического вещества. Уменьшение содержания ОВ в почве с ухудшением его качественного состава несёт серьезную угрозу экологической сбалансированности биосферы и устойчивому сельскохозяйственному производству (Семенов, Когут, 2015).

3.1 Содержание органического углерода в почве

Содержание органического углерода ($C_{орг}$) в почве под злаково-разнотравным 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 стационарных опытах (1,22-1,33%) перед закладкой.

Длительное экстенсивное (без применения удобрений) возделывание сельскохозяйственных культур в полевом севообороте (35-50 лет) привело к уменьшению содержания $C_{орг}$ в почве относительно исходного уровня на 13-14 % (рис. 4). Запасы $C_{орг}$ в пахотном слое почвы (0-20 см) снизились на 4-5 т/га.

В длительном полевом опыте Д.Н. Прянишникова № 2, заложенном на ДАОС в 1931 г. снижение органического углерода в дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве от исходного в первые 30 лет было более высоким, чем по результатам наших исследований и составило 32 % (Литвинский и др., 2010).



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

Рисунок 4 - Динамика содержания органического углерода в пахотном слое контрольных вариантов длительных стационарных опытов по ротациям севооборотов (опыт 1, 2 – севооборот полевой восьмипольный, опыт 3 – севооборот полевой семипольный).

Подобные различия могут быть связаны с разными типами севооборотов, что влияет на количество поступающих в почву корневых и пожнивных остатков, а также вынос элементов питания сельскохозяйственными культурами. В полевом опыте Д.Н. Прянишникова № 2 исследования проводили в 4-польном севообороте: клевер – озимая рожь (с 1975 г. – озимая пшеница) - пропашная культура (кормовая свекла, с 1960 г. по 1994 г. – картофель, затем подсолнечник) – овес с подсевом клевера. В наших опытах наличие двух полей клевера могло снизить процессы дегумификации в почве. Данные выводы находят подтверждение в работах А.Х. Куликовой (2011), Н.Е. Завьяловой с соавторами (2007; 2021), С.А. Замятина, В.М. Изместьева (2016), Л.М. Козловой с соавторами (2020).

Наиболее близкие экспериментальные данные к нашим результатам по динамике органического вещества в дерново-подзолистой почве представлены в работах Н.Ф. Гомоновой (2010; 2012).

Минимальным уровнем $C_{орг}$ для данной климатической зоны характеризовалась почва, находящаяся под чистым паром с 1977 года. Обработка почвы, отсутствие покровной растительности привело к существенным потерям почвенного углерода. Наибольшее уменьшение $C_{орг}$ отмечено в бессменном чистом пару в первые 10 лет (рис. 5). Содержание $C_{орг}$ в почве снизилось с 1,22 до 0,92 %, почти на 20%. Запасы $C_{орг}$ в пахотном слое почвы уменьшились с 32 до 25 т/га.

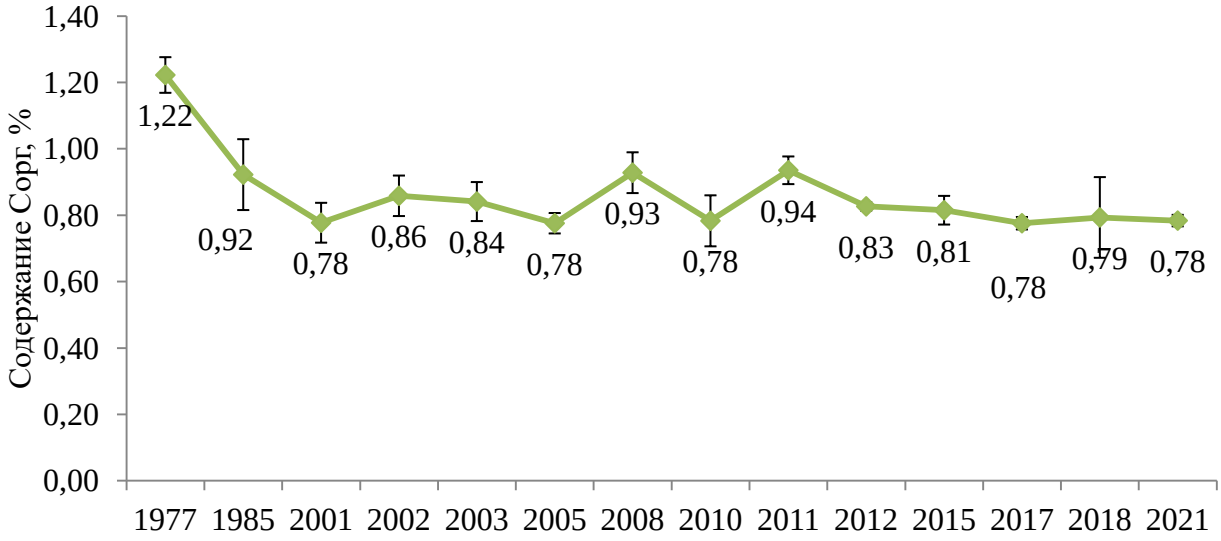


Рисунок 5 - Динамика изменения органического углерода в бессменном чистом пару (1977-2021 гг.), %

В следующие 35 лет содержание $C_{орг}$ в почве бессменного пара менялось незначительно и варьировало от 0,78 до 0,94 %. Данные изменения в динамике содержания $C_{орг}$ связаны с поступлением различного количества биомассы сорной растительности и гидротермическим режимом вегетационных периодов. В исследованиях Н.Е. Завьяловой с соавторами (2004, 2007), проведённых в данном варианте, минимальное содержание $C_{орг}$ в бессменном чистом пару - 0,78 % принимается как C_{min} для дерново-подзолистых тяжелосуглинистых почв Предуралья. Это значение соответствует состоянию почвы, когда она в несбалансированной по

органическому веществу системе земледелия практически перестает терять $C_{орг}$. Проведённые исследования в последующие 15 лет подтверждают данный вывод.

Противодействие обезуглероживанию почвы, поддержание содержания органического углерода в почве бессменного чистого пара на определённом уровне может реализоваться через механизм негативной обратной связи. Считается, что чем больше нагрузка на почву, тем более устойчивое ОВ разрушается и тем более сильные центры фиксации ОВ высвобождаются. Чем больше свободных центров фиксации и чем сильнее они могут связывать ОВ, тем больше свежих растительных остатков может прочно зафиксироваться почвой и перейти в долговременный пул (Холодов и др., 2020).

Оценка изменения содержания $C_{орг}$ по профилю почвы показала, что длительное экстенсивное сельскохозяйственное использование пашни (без удобрений) оказало существенное влияние только на верхний слой почвы (0-20 см) (рис. 6). В постоянном чистом пару достоверное снижение $C_{орг}$ наблюдали также только в слое 0-20 см.

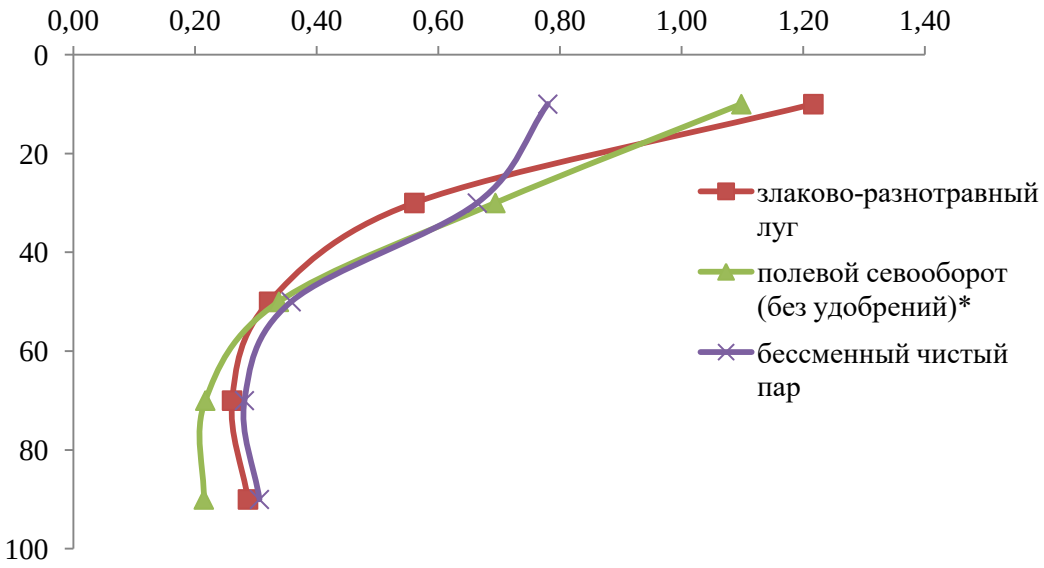


Рисунок 6 - Содержание органического углерода по профилю дерново-подзолистой почвы при различных типах землепользования (* - здесь и далее: полевой севооборот (без удобрений) – усреднённые данные контрольных вариантов опытов 1-3)

В *опыте 1* изучали влияние на режим органического вещества дерново-подзолистой почвы органической, минеральной и органоминеральной систем удобрения. Результаты исследований показали, что оптимизация минерального питания растений способствовала поддержанию содержания $C_{орг}$ в почве на заметно более высоком уровне по сравнению с контрольным вариантом опыта (рис. 7). Применение всех систем удобрения обеспечило к концу VI ротации севооборота увеличение содержания $C_{орг}$ в почве относительно контрольного варианта на 10-30 % (табл. 4).

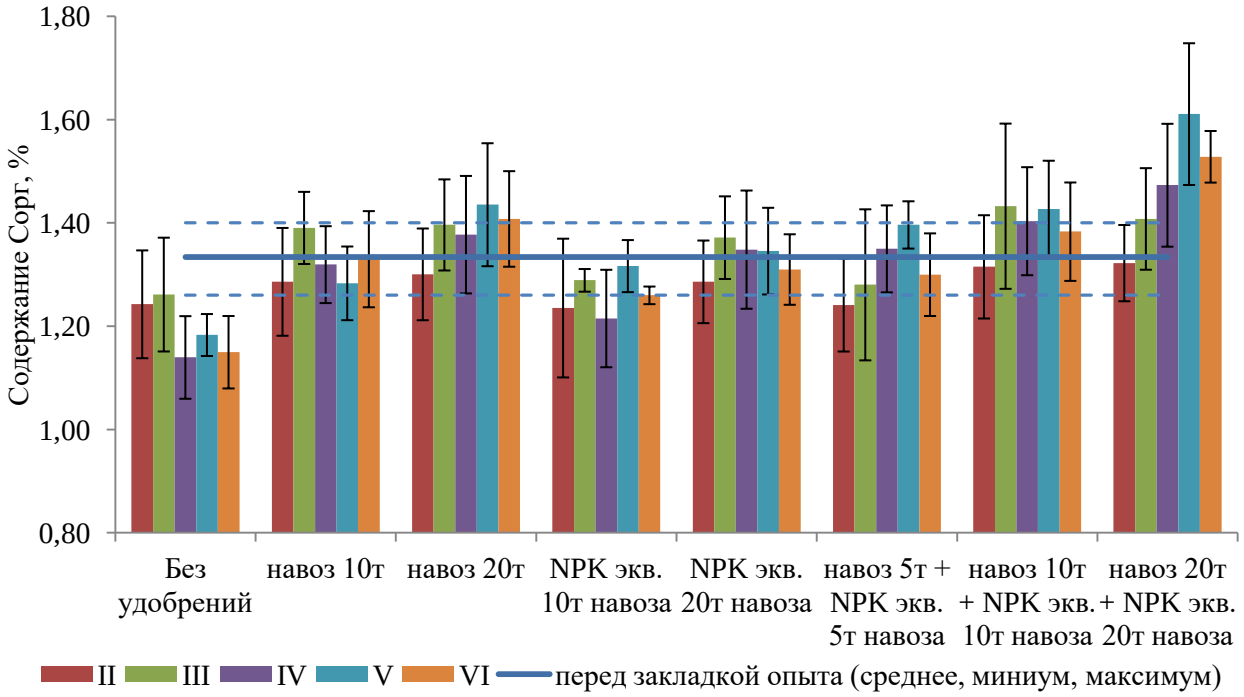


Рисунок 7 - Изменение содержания $C_{орг}$ в дерново-подзолистой почве (0-20 см) при длительном применении органической, минеральной и органоминеральной систем удобрений (среднее по двум закладкам, II-VI ротации, 1977-2017 гг.), %

При внесении навоза в дозе 10 т/га в год наблюдали поддержание содержания $C_{орг}$ на исходном уровне, при насыщенности 20 т/га в год отмечены тенденции к росту. При минеральной системе удобрения поддержание органического углерода на исходном уровне отмечено только при более высокой насыщенности пашни NPK – «NPK экв. навозу 20 т/га в год».

Таблица 4 - Изменение содержания $C_{орг}$ по профилю почвы при длительном применении органической, минеральной и органоминеральной 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
Исходное содержание	1,33	-	-	-	-	35	-	-
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

Минеральные удобрения могут поддерживать уровень содержания органического вещества в почве благодаря росту количества поступающего органического материала с пожнивными остатками, увеличению разнообразия, численности и активности почвенных микроорганизмов (Дьяконова и др., 1990; Завьялова и др., 2014; Семенов, Когут, 2015; Гамзиков, Анкудович, 2018; Чебаторев и др., 2021; Christopher, Lal, 2007). В других источниках отмечается, что внесение NPK отрицательно влияет на биологические процессы в почве, может привести к их существенному торможению, в т.ч. и процессов минерализации органического вещества, что влияет на сохранение содержания $C_{орг}$ (Лыков и др., 2004). При более низкой насыщенности минеральными удобрениями - «NPK экв. навозу 10 т/га» в отдельные ротации севооборота выявлено уменьшение $C_{орг}$ до 10% от исходного.

При применении органоминеральной системы удобрений в варианте «навоз 10 т/га в год + NPK экв. навозу» наблюдали поддержание $C_{орг}$ на исходном уровне. В варианте с максимальной насыщенностью удобрениями «навоз 20 т/га в год + NPK экв. навозу» отмечено увеличение содержания органического углерода выше исходного уровня, его содержание возросло на 15 %. Запасы $C_{орг}$ возросли в пахотном слое почвы почти на 5 т/га. Достоверное увеличение $C_{орг}$ в почве наблюдается с IV ротации севооборота.

По уровням содержания органического вещества в почвах агроэкосистем, выделяют четыре тренда его многолетней динамики: аккумуляционно-насыщающий, перманентно-минимальный, равновесно-сбалансированный и циклически-флуктуационный (Семенов, Когут, 2015; Magdoff, Weil, 2004). Циклически-флуктуационный тренд наблюдается в варианте «навоз 5 т/га + NPK эквивалентно навозу». В этих условиях отмечено в отдельные ротации, как уменьшение, так и увеличение количества $C_{орг}$ относительно исходного уровня, что, скорее всего, связано с динамикой урожайности сельскохозяйственных культур по ротациям.

Разница в динамике изменения уровня $C_{орг}$ по ротациям также может быть обусловлена наличием аналитической ошибки, пространственной вариабельностью и сезонной составляющей.

Распределение запасов $C_{орг}$ по профилю является одним из важнейших показателей генезиса почвы и ее окультуренности. Запасы $C_{орг}$ в корнеобитаемом слое определяют производительность почв и в большой мере способствуют устойчивости урожаев сельскохозяйственных культур, благодаря способности органического вещества к накоплению и сохранению почвенной влаги во время засухи и поддержанию благоприятного воздушного режима в период избыточного увлажнения. Кроме того, запас $C_{орг}$ по профилю определяет интенсивность биологической активности всего корнеобитаемого слоя почвы, способствующей высвобождению необходимых для растений элементов питания и закреплению их избытка с последующей мобилизацией в зависимости от потребности растений и почвенной биоты (Сычёв и др., 2019).

Установлено, что длительное применение органической и органоминеральной систем удобрения привело к накоплению содержания $C_{орг}$ в слое 0-40 см. Максимальная насыщенность пашни удобрениями «навоз 20 т/га в год + NPK эквивалентно навозу» способствовала достоверному увеличению количества $C_{орг}$ в слое 0-60 см (табл. 4). В результате запасы $C_{орг}$ в данном варианте в слое 0-40 см возросли с 46 (без удобрений) до 67 т/га (на

46 %), а в слое 0-100 см с 79 до 111 т/га (на 40%). Углерод, накопленный в глубинных слоях почвы, будет храниться более длительно, т.е. находиться на депонировании. В вариантах «навоз 10 и 20 т/га в год», «навоз 5 и 10 т/га в год + NPK эквивалентно навозу» отмечено повышение запасов $C_{орг}$ в слое 0-40 на 8-13 т/га (на 17-28 %).

В *опыте 2* изучали влияние на режим органического вещества дерново-подзолистой почвы видов, доз и соотношений минеральных удобрений.

Установлено, что длительное одностороннее применение азотных удобрений (N_{90}) не способствовало сохранению $C_{орг}$ на исходном уровне, содержания $C_{орг}$, как и в контрольном варианте, снизилось на 14 % (рис. 8, табл. 5). Аналогичные результаты отмечены в работе А.И. Иванова (2000, 2015), В.В. Лапы с соавторами (2018).

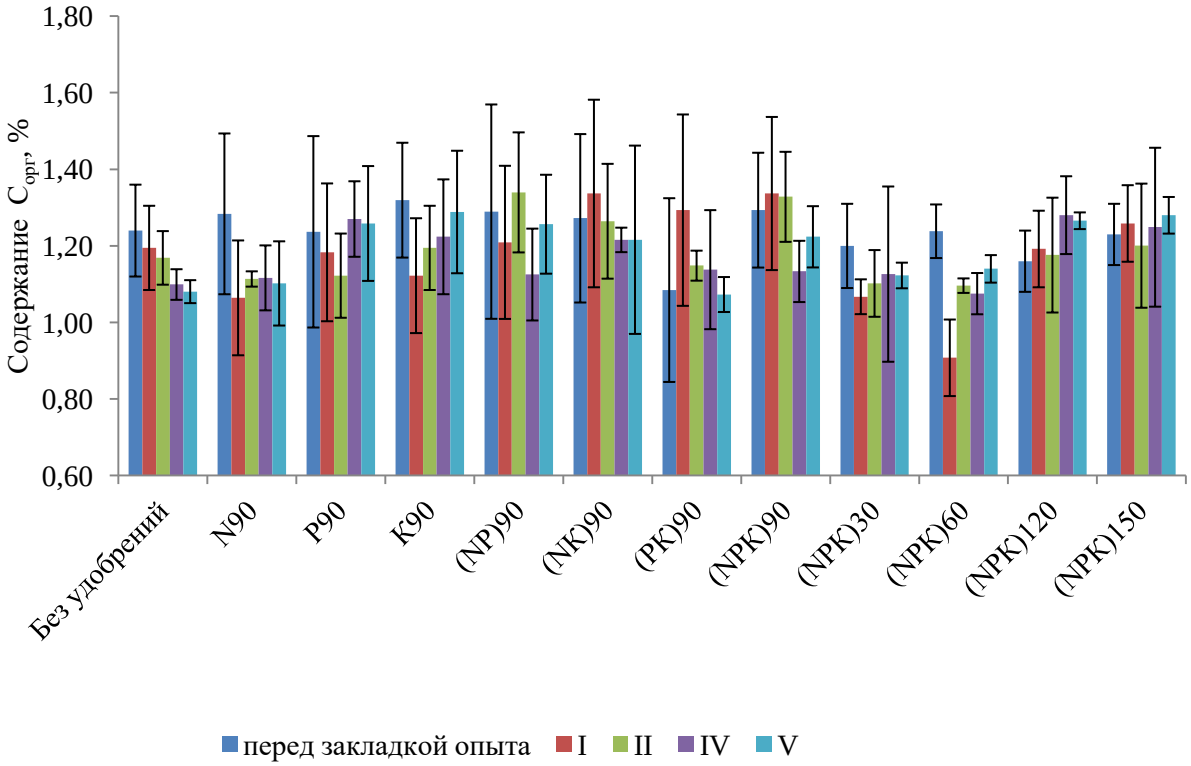


Рисунок 8 – Изменение содержания $C_{орг}$ в пахотном слое почвы (0-20 см) при длительном применении различных видов, доз и соотношений минеральных удобрений (среднее по двум закладкам, I-V ротации, 1978-2019 гг.), % (*опыт 2*)

Таблица 5 – Изменение содержания уровня органического углерода в дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве при длительном применении минеральных удобрений (*опыт 2*)

Вариант	До закладки	V ротация	Изменение содержания $C_{орг}$ относительно контрольного варианта, % (±)	Изменение содержания $C_{орг}$ относительно исходного уровня, % (±)	Запасы, т/га		
					исходное	V ротация	изменение содержания запасов $C_{орг}$ относительно исходного
Без удобрений	1,24	1,08	-	-13	32	28	-4
N_{90}	1,28	1,10	2	-14	33	29	-5
P_{90}	1,24	1,26	16	2	32	33	1
K_{90}	1,32	1,27	17	-4	34	33	-1
$(NP)_{90}$	1,29	1,26	17	-2	34	33	-1
$(NK)_{90}$	1,27	1,22	13	-4	33	32	-1
$(PK)_{90}$	1,08	1,07	-1	-1	28	28	0
$(NPK)_{90}$	1,29	1,22	13	-6	34	32	-2
$(NPK)_{30}$	1,20	1,12	4	-6	31	29	-2
$(NPK)_{60}$	1,24	1,14	6	-8	32	30	-3
$(NPK)_{120}$	1,16	1,27	17	9	30	33	3
$(NPK)_{150}$	1,23	1,28	18	4	32	33	1
$НСР_{05}$	-	0,18	-	-	-	-	5

Следует отметить, что в контрольном варианте наблюдали постепенное снижение $C_{орг}$, а при применении азотных удобрений максимальные потери отмечены в первой ротации севооборота, далее происходило поддержание содержания $C_{орг}$ примерно на одном уровне. Полученные результаты можно объяснить тем, что даже при применении азотных удобрений, растения 30-50 % своих потребностей в этом элементе удовлетворяют за счет его органически связанных соединений, переходящих в доступную форму в результате минерализации (Кулаковская, 1978; Лыков и др., 2004; Сычёв и др., 2022). Однако, согласно И.А. Лавровой (1992), систематическое применение минеральных удобрений приводит к стабилизации процессов минерализации-иммобилизации в почве, в результате чего увеличивается закрепление азота в почве, снижаются его потери, повышается роль азота удобрений и снижается значение азота почвы в питании растений. Это могло в дальнейшем повлиять на стабилизацию содержания $C_{орг}$ в пахотном слое почвы данного варианта.

При одностороннем применении фосфорных и калийных удобрений в первые ротации отмечены тенденции к снижению содержания $C_{орг}$, что обусловлено выносом растениями азота. Однако в IV-V ротациях наблюдали небольшое увеличение содержание $C_{орг}$ и выравнивание с исходным уровнем. Возможно, улучшение калийного и фосфатного режимов почвы, обеспеченность растений данными элементами питания повлияли на количество и качество послеуборочных остатков, поступающих в почву (Медведев и др., 2013, 2014) и соответственно привели к стабилизации содержания органического вещества в почве. Известно, что оптимальное фосфорное питание усиливает развитие корневой системы (Соколов, 1950; Дзюин, 2020). Калий усиливает азотфиксацию и способствует формированию клубеньков на корнях бобовых (Прокашев, Дерюгин, 2000; Беляев, 2005; Пухальская и др., 2009).

В работе В.Н. Якименко (2012) показано, что фиксация аммония почвой в сильной степени зависела от ее калийного состояния. В почве с истощенными запасами калия содержание необменного аммония заметно снизилось (вероятно, до минимального уровня), тогда как при бездефицитном калийном балансе в агроценозе количество фиксированного аммония в почве значительно увеличилось.

Необменный или фиксированный аммоний составляет до 90 % минерального азотного фонда почвы. Аммоний, имея близкие ионные размеры с калием, непосредственно конкурирует с ним в почвенных процессах фиксации-мобилизации (Блек, 1975; Якименко, 2010). Повышение уровня необменного калия в почве ингибирует высвобождение фиксированного аммония с занимаемых позиций в кристаллитах. Очевидно, что оптимизация калийного состояния почвы существенно влияла на почвенный фонд минерального азота, регулируя процессы фиксации–мобилизации аммония. Возможно, улучшение калийного режима почвы приводило к закреплению в почве соединений азота и тем самым, способствовало поддержанию $C_{орг}$ на исходном уровне.

При внесении азотно-калийных, фосфорно-калийных, азотно-фосфорных удобрений и при внесении полного минерального удобрения $(NPK)_{90}$ отмечено существенное варьирование содержания $C_{орг}$ по ротациям, что, скорее всего, связано с динамикой урожайности сельскохозяйственных культур по ротациям.

Рассмотрение внесения возрастающих доз полного минерального удобрения показало, что поддержание содержания $C_{орг}$ на исходном уровне отмечено только при использовании высоких доз $(NPK)_{120}$ и $(NPK)_{150}$ (рис. 8). При внесении более низких доз полного минерального удобрения наблюдали тенденцию к уменьшению количества $C_{орг}$ в почве (в отдельные ротации на 5-27 %).

Установлено, что длительное одностороннее применение азотных удобрений в опыте, получение высоких урожаев культур в данном варианте при сохранении количества $C_{орг}$ в пахотном слое на относительно стабильном уровне в течение нескольких ротаций севооборота привели к истощению нижележащих слоев почвы. 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 (контрольный вариант) до 37 т/га (на 26 %) и в слое 0-100 см с 77 до 56 т/га (на 27 %) (табл. 6).

Таблица 6 - Изменение содержания $C_{орг}$ по профилю почвы при длительном применении различных видов, доз и соотношений 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 вариантах с односторонним применением калия хлористого, а также сочетании NK отмечается тенденция увеличения $C_{орг}$ по всему метровому профилю. Запасы $C_{орг}$ в слое 0-100 см при длительном одностороннем внесении калия хлористого и азотно-калийных удобрений возросли до 109-110 т/га (на 40 %). При внесении полного минерального удобрения $(NPK)_{90}$ не наблюдается такого значимого увеличения по профилю почвы $C_{орг}$, возможно внесение суперфосфата стабилизирует содержание органического углерода в почве.

Полученные результаты влияния калия хлористого на изменение содержания $C_{орг}$ в почве могут быть связаны с хлорид-ионом, содержащимся в данном виде удобрений.

Основной формой калийных удобрений в России и за рубежом является хлористый калий. Влиянию главного компонента этого удобрения – калия на плодородие почвы и продуктивность культур посвящено множество научных работ, тогда как сопутствующий ему анион остаётся относительно малоизученным (Якименко, 2019). Хлор, наряду с калием, относится к необходимым элементам минерального питания растений: участвует в общефизиологических процессах поддержания гомеостаза (Алёхина и др., 2005; Якименко, Конарбаева, 2015). Считается, что хлорид ион обладает высокой растворимостью и миграционной способностью. Накопление хлора в почве во многом зависит от режима увлажнения почвы, гранулометрического состава (Харьков, 1964; Танин, 1965; Назарюк, Маслова, 1990, Фадькин, 2012; Конарбаева, Якименко, 2015; Якименко, 2019). По данным В.Н. Якименко (2019) длительное внесение KCl приводит к существенному возрастанию концентрации хлора по всему профилю почвы.

При наличии в почве хлорид-ионов возможно их взаимодействие с органическим веществом почвы с образованием хлорорганических соединений. Биотическое хлорирование почвенного органического вещества происходит в аэробных условиях при участии H_2O_2, образующейся под действием пероксидаз, выделяемых микроорганизмами, преимущественно

микроскопическими грибами. Абиотическое хлорирование осуществляется в результате окислительно-восстановительных реакций с участием системы Fe^{3+}/Fe^{2+}, но протекает в несколько раз медленнее (Водяницкий, Макаров, 2017). Необходимые для реакции компоненты (железо в реакционной форме и перекись водорода) присутствуют во многих почвах в достаточно большом количестве (Заварзин, Колотилова, 2001). Природные хлорорганические соединения гораздо менее подвижны по сравнению с ионами Cl^- и представляют неотъемлемую часть органического вещества естественных экосистем (Winterton, 2000; Водяницкий, Макаров, 2017). Хлорорганические соединения устойчивы к выщелачиванию. Так в исследованиях M. Montelius с соавторами (2015) показано, что время удерживания Cl^- в почве лесных насаждений варьировало от 1 до 9 месяцев. Срок удерживания $Cl_{орг}$ в гумусовом горизонте почвы варьировал от 11 лет под дубом до 65 лет под черной сосной.

Приведённые литературные данные показывают, что хлорид ион, благодаря своей подвижности может легко мигрировать по профилю почвы и постепенно превращаться в устойчивые к разложению хлорорганические вещества, в верхних горизонтах почвы возможно при участи микроорганизмов, в более глубоких слоях – абиотическим путём.

Внесение возрастающих доз NPK не оказало значимого влияния на изменение содержания углерода в глубинных горизонтах почвы.

В *опыте 3* изучали влияние на режим органического вещества дерново-подзолистой почвы нетрадиционного органического удобрения – осадков городских сточных вод и проводили сравнение с навозом КРС.

Внесение навоза КРС 40 т/га (насыщенность 5,7 т/га в год) замедлило процессы потерь органического вещества в почве, но не компенсировало его полностью (рис. 9). В шестой ротации севооборота отмечена тенденция снижения $C_{орг}$ на 8 %. Внесение ОСВ 40 т/га (насыщенность 5,7 т/га в год) позволило поддерживать содержание $C_{орг}$ в почве на исходном уровне. Более существенное влияние ОСВ, чем навоза, на содержание органического

вещества почвы возможно связано с качеством поступающего органического материала. Органическое вещество ОСВ на 70-80 % состоит из органических соединений, которые не экстрагируются 0,1 моль/л $Na_4P_2O_7$ и 0,1 моль/л NaOH. Это показывает, что соединения очень стабильны и медленно подвергаются процессам минерализации в почве (Маринова-Гарванска, 2004).

В варианте NPK (I ротация - $N_{120}P_{120}K_{120}$, II ротация – $N_{120\text{-}90}P_{90}K_{90}$, III-VI ротации - $N_{60}P_{60}K_{60}$) наблюдали тенденцию к снижению содержания ОВ с IV ротации, что возможно связано с уменьшением дозы. Полное воспроизводство $C_{орг}$ отмечено при совместном применении органических (навоза, ОСВ) и минеральных удобрений.

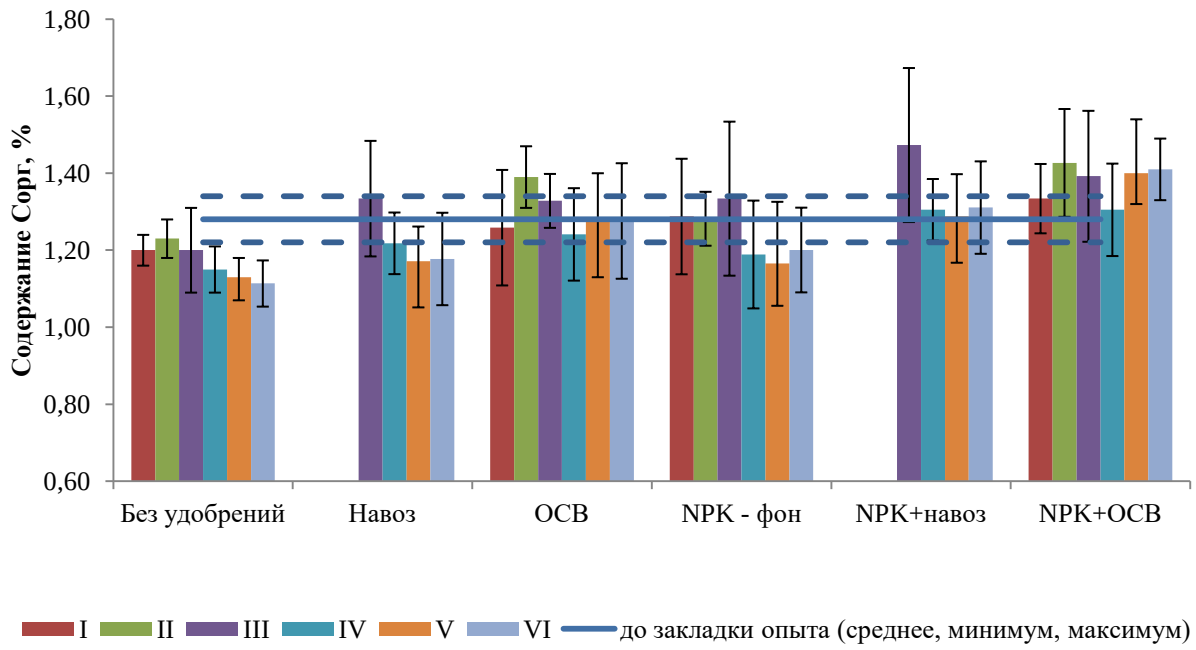


Рисунок 9 – Изменение содержания $C_{орг}$ в дерново-подзолистой почве (0-20 см) при длительном применении осадков сточных вод (I-VI ротации, 1976-2018 гг.), %

Длительное внесение ОСВ по фону минеральных удобрений достоверно повысило содержание $C_{орг}$ в подпахотном слое почвы (табл.7).

Таблица 7 – Изменение содержания $C_{орг}$ по профилю почвы при длительном применении ОСВ (V ротация, 2013 г.) *(опыт 3)*

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
Исходное содержание	1,28	-	-	-	-	33	-	-
Без удобрений	1,13	0,48	0,38	0,34	0,27	29	42	73
Навоз	1,18	0,52	0,36	0,29	0,28	31	45	73
ОСВ	1,28	0,64	0,40	0,35	0,32	33	51	83
NPK – фон	1,17	0,74	0,41	0,33	0,33	30	50	83
Фон + навоз	1,31	0,78	0,37	0,30	0,26	34	55	83
Фон + ОСВ	1,40	1,05	0,50	0,33	0,41	36	65	98
$НСР_{05}$	0,11	0,23	$F_ф<F_т$	$F_ф<F_т$	$F_ф<F_т$	4	6	10

Запасы $C_{орг}$ в слое почвы 0-40 см возросли на 30% (к фону). При внесении навоза 40 т/га по фону минеральных удобрений существенных изменений содержания $C_{орг}$ в нижележащих слоях почвы относительно фона не выявлено.

В данном опыте длительное применение минеральных удобрений обеспечило достоверное увеличение органического углерода в подпахотном слое (в 1,5 раза), запасы в слое почвы 0-40 см относительно контрольного варианта возросли почти на 20%.

Таким образом, результаты исследований в условиях длительных стационарных опытов показали, что изменение многолетней динамики органического вещества в пахотном слое почвы происходило по 4 трендам: аккумуляционно-насыщающий, перманентно-минимальный, равновесно-сбалансированный и циклически-флуктуационный. При экстенсивном возделывании сельскохозяйственных культур (без удобрений) изменение многолетней динамики органического вещества шло по перманентно-минимальному уровню, где расход превышал приход ОВ в почве, что привело к уменьшению в почве запасов органического углерода на 4-5 т/га. Аналогичный тренд наблюдался при внесении в почву невысоких доз минеральных $(NPK)_{30-60}$ и органических удобрений (насыщенность навозом 5,7 т/га), при внесении азотных удобрений N_{90}. Циклически-флуктуационный тренд отмечен при применении $(NK)_{90}$, $(PK)_{90}$, $(NP)_{90}$, $(NPK)_{90}$, органо-

минеральной системе с невысокой насыщенностью почвы удобрениями (навоз 5 т/га в год + NPK эквивалентно навозу). Это связано с несбалансированностью элементов питания, качеством навоза, различным влиянием удобрений на урожайность культур по ротациям, погодными условиями вегетационных периодов. При длительном внесении высоких доз полного минерального удобрения ($(NPK)_{120-150}$, NPK экв. 20 т навоза), органический системе удобрений с насыщенностью пашни навозом 10-20 т/га в год, органоминеральной системе (навоз 10 т/га + NPK эквивалентно навозу) или внесении ОСВ (насыщенность 5,7 т/га в год) наблюдался равновесно-сбалансированный тренд. Только при очень высоком насыщении почвы удобрениями – «навоз 20 т/га в год + NPK эквивалентно навозу» характерен ярко выраженный аккумуляционно-насыщающий тренд.

Оценка содержания $C_{орг}$ по профилю почвы показала, что длительное экстенсивное сельскохозяйственное использование пашни (без удобрений) в сравнении с целинным аналогом привело к существенным изменениям только в верхнем слой почвы (0-20 см). Длительное применение удобрений оказало влияние на изменение органического углерода в слое 0-40, 0-60 или по всему метровому профилю, что зависело от насыщенности пашни удобрениями, их видов. Длительное использование органической и органо-минеральной систем удобрения привело к увеличение содержания $C_{орг}$ в слое 0-40 см, а при макисмальной насыщенности пашни удобрениями (навоз 20 т/га в год + NPK эквивалентно навозу) в слое 0-60 см. Углерод, накопленный в глубинных слоях почвы, будет храниться более длительно, т.е. находиться на депонировании. Длительное применение азотных удобрений N_{90} привело к уменьшению содержания $C_{орг}$ в слое почвы 0-60 см, запасы $C_{орг}$ в метровом слое уменьшились почти на 30 %. При использовании калия хлористого K_{90} и сочетании $(NK)_{90}$ отмечается тенденция увеличения $C_{орг}$ в метровом слое. Запасы $C_{орг}$ в слое 0-100 см возросли на 40 %.

3.2 Аккумуляция атмосферного углерода полевыми культурами, почвенная секвестрация при использовании различных систем удобрения и углеродпротекторная емкость почвы

Вопросы глобального изменения климата привели к тому, что учёные стали во всем мире много внимания уделять оценке углеродсеквестрирующей способности агроэкосистем (Кудеяров, 2015; Семенов, Когут, 2015; Когут и др., 2021; Завьялова, 2022; Six et al., 2002; Wang et al., 2022; Wilcox et al., 2023). Под почвенной секвестрацией органического углерода понимается перевод атмосферного углекислого газа (CO_2) в живое органическое вещество растений (фотосинтез) с последующей трансформацией мортмассы в почвенное органическое вещество и его долговременное хранение в почвенном резервуаре с минимальным риском немедленного возврата в атмосферу (Семенов, Когут, 2015; Бойцова и др., 2019; Когут и др., 2021; Завьялова, 2022; Lal, 2004). Почвенная секвестрация углерода обязательно предусматривает удаление CO_2 из атмосферы за счет получения новой биомассы, депонирование $C_{орг}$ в почве направлено на его сохранение и предотвращение относительно быстрого возврата из почвы в атмосферу в ходе минерализации. Разумное сочетание секвестрации и депонирования $C_{орг}$ обеспечит повышение или сохранение гумусированности почв, увеличение урожайности сельскохозяйственных культур и сокращение эмиссии CO_2 в атмосферу (Когут, Семёнов, 2020; Когут и др., 2021).

Расчетные данные показали, что *в опытах 1 и 2* культуры полевого восьмипольного севооборота за ротацию без применения удобрений секвестрировали из атмосферы 22,5-23,3 т/га углерода или 82,4-85,5 т/га CO_2 (табл. 8, 9, прил. 9), *в опыте 3* культуры полевого семипольного севооборота в процессе фотосинтеза поглотили из атмосферы– 18,6 т/га углерода или 68,2 т/га CO_2 (табл. 10). Аккумуляция углерода растениями в *опыте 1* в среднем в год (вегетационный период) возрастала при использовании различных систем удобрения с 2,8 (контроль) до 3,1 (навоз 10 т/га) - 3,4 (навоз 20 т/га в год + NPK экв. навозу) т/га.

Таблица 8 - Аккумуляция атмосферного углерода сельскохозяйственными культурами полевого восьмипольного севооборота за вегетационный период (среднее по 2 закладкам за 5 ротаций севооборота, 1977-2017 гг.) *(опыт 1),* т/га

Вариант	Озимая рожь				Яровая пшеница				Клевер 1 г.п.			Клевер 2 г.п.			Ячмень			
	зерно	солома	ПКО	сумма	зерно	солома	ПКО	сумма	сено	ПКО	сумма	сено	ПКО	сумма	зерно	солома	ПКО	сумма
Без удобрений	1,23	1,98	1,29	4,50	0,88	1,26	0,87	3,01	1,86	1,84	3,70	1,20	1,70	2,90	1,26	1,19	1,06	3,51
Навоз 10 т/га	1,46	2,30	1,38	5,13	1,02	1,46	0,95	3,44	1,96	1,87	3,83	1,27	1,71	2,99	1,38	1,30	1,12	3,80
Навоз 20 т/га	1,55	2,37	1,41	5,33	1,09	1,52	0,99	3,60	2,04	1,89	3,93	1,25	1,71	2,96	1,42	1,55	1,14	4,11
NPK экв. 10 т навоза	1,48	2,75	1,39	5,62	1,17	1,66	1,03	3,86	1,84	1,84	3,68	1,30	1,72	3,02	1,38	1,31	1,12	3,81
NPK экв. 20 т навоза	1,56	2,60	1,42	5,57	1,34	1,90	1,12	4,36	1,73	1,82	3,55	1,35	1,73	3,08	1,41	1,31	1,14	3,86
Навоз 5 т+NPK экв.	1,49	2,35	1,39	5,24	1,12	1,69	1,00	3,81	1,93	1,86	3,79	1,37	1,73	3,10	1,40	1,50	1,14	4,04
Навоз 10 т + NPK экв.	1,54	2,48	1,41	5,43	1,26	1,90	1,07	4,23	1,74	1,82	3,56	1,38	1,74	3,12	1,40	1,38	1,13	3,91
Навоз 20 т + NPK экв.	1,53	2,42	1,41	5,35	1,35	2,12	1,12	4,59	1,63	1,79	3,43	1,42	1,75	3,17	1,42	1,42	1,14	3,98

Продолжение таблицы 8

Вариант	Картофель				Овёс				За севооборот, т/га		За севооборот с основной и побочной продукцией, т/га		За севооборот с ПКО, т/га	
	клубни	ботва	ПКО	сумма	зерно	солома	ПКО	сумма	C	CO_2	C	CO_2	C	CO_2
Без удобрений	1,19	0,25	0,61	2,05	1,02	1,01	0,75	2,78	22,5	82,4	14,3	52,6	8,2	29,8
Навоз 10 т/га	1,36	0,31	0,72	2,39	1,18	1,22	0,82	3,23	24,8	90,9	16,2	59,5	8,6	31,4
Навоз 20 т/га	1,50	0,32	0,74	2,56	1,24	1,25	0,85	3,33	25,8	94,7	17,1	62,7	8,7	32,0
NPK экв. 10 т навоза	1,57	0,36	0,79	2,72	1,25	1,47	0,85	3,58	26,3	96,4	17,5	64,3	8,8	32,1
NPK экв. 20 т навоза	1,60	0,38	0,84	2,82	1,28	1,36	0,87	3,51	26,7	98,1	17,8	65,3	8,9	32,8
Навоз 5 т+NPK экв.	1,57	0,36	0,80	2,73	1,20	1,33	0,83	3,37	26,1	95,6	17,3	63,5	8,8	32,1
Навоз 10 т + NPK экв.	1,64	0,38	0,84	2,85	1,26	1,44	0,86	3,56	26,7	97,8	17,8	65,3	8,9	32,5
Навоз 20 т + NPK экв.	1,67	0,40	0,88	2,95	1,26	1,59	0,86	3,71	27,2	99,7	18,2	66,9	9,0	32,8

Таблица 9 - Аккумуляция атмосферного углерода сельскохозяйственными культурами полевого восьмипольного севооборота за вегетационный период (среднее по 2 закладкам за 5 ротаций севооборота, 1978-2019 гг.) *(опыт 2),* т/га

Вариант	Озимая рожь				Картофель				Яровая пшеница				Клевер 1 г.п.			Клевер 2 г.п.		
	зерно	солома	ПКО	сумма	клубни	ботва	ПКО	сумма	зерно	солома	ПКО	сумма	сено	ПКО	сумма	сено	ПКО	сумма
Без удобрений	1,34	1,86	1,33	4,54	1,17	0,26	0,62	2,05	0,67	1,01	0,77	2,45	1,79	1,83	3,62	1,58	1,78	3,37
N_{90}	1,55	2,70	1,42	5,67	1,44	0,32	0,72	2,47	0,88	1,40	0,88	3,16	1,71	1,81	3,52	1,75	1,82	3,57
P_{90}	1,38	2,28	1,35	5,01	1,34	0,29	0,68	2,31	0,71	1,08	0,79	2,59	1,54	1,77	3,32	1,67	1,80	3,47
K_{90}	1,51	2,29	1,40	5,20	1,30	0,28	0,66	2,25	0,76	1,25	0,81	2,82	1,83	1,84	3,67	1,63	1,79	3,42
$(NP)_{90}$	1,47	2,68	1,38	5,53	1,58	0,34	0,77	2,69	0,88	1,45	0,88	3,21	1,38	1,74	3,11	1,54	1,77	3,32
$(NK)_{90}$	1,55	2,60	1,42	5,57	1,51	0,35	0,79	2,65	0,88	1,32	0,88	3,08	1,75	1,82	3,57	1,58	1,78	3,37
$(PK)_{90}$	1,51	2,42	1,40	5,33	1,32	0,30	0,69	2,31	0,76	1,29	0,81	2,86	2,09	1,90	3,98	1,63	1,79	3,42
$(NPK)_{90}$	1,51	2,34	1,40	5,25	1,58	0,36	0,80	2,74	1,05	1,59	0,96	3,60	1,67	1,80	3,47	1,38	1,74	3,11
$(NPK)_{30}$	1,51	2,40	1,40	5,31	1,52	0,33	0,74	2,58	0,88	1,41	0,88	3,17	1,42	1,75	3,16	1,54	1,77	3,32
$(NPK)_{60}$	1,55	2,60	1,42	5,57	1,63	0,37	0,82	2,82	1,09	1,51	0,99	3,59	1,67	1,80	3,47	1,79	1,83	3,62
$(NPK)_{120}$	1,55	2,63	1,42	5,60	1,64	0,37	0,83	2,84	1,01	1,76	0,94	3,71	1,38	1,74	3,11	1,54	1,77	3,32
$(NPK)_{150}$	1,55	2,71	1,42	5,68	1,70	0,40	0,88	2,98	1,05	1,71	0,96	3,72	1,33	1,73	3,06	1,54	1,77	3,32

Продолжение таблицы 9

Вариант	Ячмень				Овёс				За севооборот, т/га		За севооборот с основной и побочной продукцией, т/га		За севооборот с ПКО, т/га	
	зерно	солома	ПКО	сумма	зерно	солома	ПКО	сумма	C	CO_2	C	CO_2	C	CO_2
Без удобрений	1,11	1,48	0,98	3,57	1,32	1,53	0,88	3,73	23,3	85,5	15,1	55,5	8,2	30,0
N_{90}	1,27	1,68	1,07	4,02	1,57	2,06	0,99	4,62	27,0	99,1	18,3	67,2	8,7	31,9
P_{90}	1,27	1,71	1,04	4,03	1,23	1,25	0,85	3,33	24,1	88,2	15,8	57,9	8,3	30,3
K_{90}	1,19	1,46	1,02	3,67	1,23	1,30	0,85	3,38	24,4	89,5	16,0	58,8	8,4	30,7
$(NP)_{90}$	1,15	1,61	1,00	3,76	1,49	1,72	0,95	4,16	25,8	94,5	17,3	63,4	8,5	31,1
$(NK)_{90}$	1,23	1,60	1,04	3,88	1,45	1,69	0,93	4,07	26,2	96,0	17,5	64,3	8,7	31,7
$(PK)_{90}$	1,31	1,71	1,09	4,11	1,28	1,28	0,86	3,42	25,4	93,2	16,9	61,9	8,5	31,3
$(NPK)_{90}$	1,31	1,84	1,09	4,24	1,53	1,91	0,97	4,41	26,8	98,4	18,1	66,2	8,7	32,2
$(NPK)_{30}$	1,31	1,80	1,09	4,20	1,40	1,64	0,92	3,96	25,7	94,2	17,2	62,9	8,5	31,3
$(NPK)_{60}$	1,35	1,65	1,13	4,13	1,53	1,68	0,97	4,18	27,4	100,4	18,4	67,6	9,0	32,8
$(NPK)_{120}$	1,35	1,68	1,11	4,14	1,45	1,52	0,93	3,90	26,6	97,7	17,9	65,6	8,7	32,1
$(NPK)_{150}$	1,35	1,76	1,11	4,22	1,45	1,63	0,93	4,01	27,0	99,0	18,2	66,7	8,8	32,3

Таблица 10 - Аккумуляция атмосферного углерода сельскохозяйственными культурами полевого семипольного севооборота за вегетационный период (среднее за III -VI ротации, 1993-2020 гг.) *(опыт 3),* т/га

Вариант	Озимая рожь				Яровая пшеница				Клевер 1 г.п.			Клевер 2 г.п.			Ячмень			
	зерно	солома	ПКО	сумма	зерно	солома	ПКО	сумма	сено	ПКО	сумма	сено	ПКО	сумма	зерно	солома	ПКО	сумма
Без удобрений	0,87	1,41	1,15	3,43	0,67	0,94	0,79	2,40	2,12	1,90	4,02	1,50	1,76	3,26	1,09	1,12	0,97	3,18
Навоз	1,14	1,84	1,25	4,23	0,83	1,17	0,87	2,87	2,58	2,01	4,59	1,82	1,84	3,66	1,30	1,34	1,08	3,72
ОСВ	1,16	1,87	1,26	4,29	0,90	1,27	0,91	3,08	2,59	2,01	4,60	1,84	1,84	3,68	1,31	1,36	1,09	3,76
NPK – фон	1,18	1,91	1,27	4,36	0,92	1,30	0,92	3,14	2,20	1,92	4,12	1,61	1,79	3,40	1,54	1,60	1,21	4,35
Фон + навоз	1,28	2,07	1,31	4,66	1,08	1,53	1,01	3,62	2,41	1,97	4,38	1,66	1,80	3,46	1,58	1,64	1,23	4,45
Фон + ОСВ	1,23	1,99	1,29	4,51	1,13	1,60	1,04	3,77	2,33	1,95	4,28	1,81	1,83	3,64	1,47	1,52	1,17	4,16

Продолжение таблицы 10

Вариант	Овёс				За севооборот, т/га		За севооборот с основной и побочной продукцией, т/га		За севооборот с ПКО, т/га	
	зерно	солома	ПКО	сумма	C	CO_2	C	CO_2	C	CO_2
Без удобрений	0,71	0,79	0,81	2,31	18,6	68,2	11,2	41,1	7,4	27,1
Навоз	0,88	0,97	0,90	2,75	21,8	80,0	13,9	50,9	7,9	29,1
ОСВ	0,98	1,07	0,95	3,00	22,4	82,2	14,3	52,6	8,1	29,6
NPK – фон	1,23	1,35	1,09	3,67	23,0	84,5	14,8	54,4	8,2	30,1
Фон + навоз	1,28	1,41	1,11	3,80	24,4	89,4	15,9	58,5	8,5	30,9
Фон + ОСВ	1,38	1,52	1,17	4,07	24,4	89,6	16,0	58,6	8,4	31,0

Накопление углерода в биомассе полевых культур в *опыте 2* в среднем в год увеличилось с 2,9 на контроле без удобрений до 3,0 (P_{90}, K_{90}) - 3,4 (N_{90}, $(NPK)_{60}$, $(NPK)_{150}$) т/га. Аккумуляция углерода в растениях в *опыте 3* в среднем в год повысилась с 2,7 на контроле до 3,1-3,5 т/га при применении различных систем удобрения. Максимальные значения получены при использовании ОСВ и навоза по фону минеральных удобрений.

Максимальное накопление углерода в растительной биомассе 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 лугового 1 года пользования составило 3,06-4,60 т/га, 2 года пользования -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 сельскохозяйственных культур. В современном земледелии на долю послеуборочных остатков приходится 60-65% от всех источников ОВ для почвы (Скируха и др., 2017; Суховеева, 2022). Количество привносимого в почву углерода с пожнивно-корневыми остатками (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. Корневая биомасса трав является основным источником накопления органического вещества в глубоких слоях почвы (Когут и др., 2021; Liebmann et al., 2020). Всего с пожнивно-корневыми остатками полевых культур за ротацию восьмипольного севооборота в почву поступило 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, происходящего из растительной биомассы, вновь минерализуется и возвращается в атмосферу (Körschens, 2018; Когут и др., 2021).

Важное значение имеет не только количество, но и качество послеуборочных остатков. ПКО многолетних трав обычно более богаты питательными веществами, особенно азотом, по сравнению с однолетними культурами (Скируха и др., 2017). По нашим данным, содержание азота в ПКО клевера было выше, чем у ячменя (табл. 11). Соотношение C:N в пожнивно-корневых остатках клевера составило 19,6-25,7, ячменя - 36,1-93,7. Наиболее доступными для разложения ПКО ячменя и клевера были при минеральной системе удобрения (NPK экв. навозу 10 и 20 т/га). В этих вариантах процесс минерализации ОВ в почве преобладал над его накоплением.

Таблица 11 - Содержание углерода и азота в пожнивно-корневых остатках клевера лугового и ячменя (2021-2022 гг.) *(опыт 1)*

Вариант	Клевер 2 г.п.			Ячмень		
	C, %	N, %	C/N	C, %	N, %	C/N
Без удобрений	40,6	1,58	25,7	40,3	0,43	93,7
Навоз 10 т/га	40,6	1,73	23,5	40,0	0,60	66,7
Навоз 20 т/га	40,2	1,78	22,6	39,8	0,63	63,2
NPK экв. 10 т навоза	40,3	1,95	20,7	39,7	1,10	36,1
NPK экв. 20 т навоза	40,2	2,05	19,6	39,3	0,88	44,7
Навоз 5 т+NPK экв.	40,5	1,63	24,8	39,4	0,60	65,7
Навоз 10 т + NPK экв.	40,2	1,80	22,3	39,2	0,80	49,0
Навоз 20 т + NPK экв.	40,4	1,85	21,8	39,1	1,03	38,0
$НСР_{05}$	Fф<Fт	0,11	-	0,60	0,10	-

Оценку накопления углерода в почве проводят по изменению запасов $С_{орг}$ в метровом слое почвы или по балансу $С_{орг}$ (Семёнов и др., 2008). В наших исследованиях были использованы оба подхода (табл. 12-14). Полученные данные разных подходов в вариантах с удобрениями по сравнению с контрольными вариантами не всегда согласуются, т.к. используемые агрохимикаты оказывают существенное влияние на направленность трансформации свойств почвы.

Таблица 12 - Влияние систем удобрения на аккумуляцию углерода в растительной продукции (основной и побочной) и почвенном органическом веществе (*опыт 1*)

Вариант	Накопление C-CO_2, т/га/ год			Баланс C-CO_2, т/га/ год		Аккумуляция CO_2, т/га/ год			
	в почве		в растениях ***			всего		за счёт систем удобрения	
	1*	2**		1	2	1	2	1	2
Без удобрений	-0,13	-0,10	1,79	1,66	1,69	6,09	6,20	-	-
Навоз 10 т/га	0,15	-0,13	2,03	2,18	1,90	7,99	6,96	1,89	0,76
Навоз 20 т/га	0,48	-0,04	2,14	2,62	2,10	9,60	7,69	3,50	1,49
NPK экв. 10 т навоза	-0,17	-0,25	2,19	2,02	1,94	7,42	7,13	1,33	0,92
NPK экв. 20 т навоза	-0,10	0,04	2,23	2,13	2,27	7,80	8,31	1,71	2,11
Навоз 5 т + NPK экв.	-0,02	-0,13	2,17	2,15	2,04	7,87	7,46	1,77	1,26
Навоз 10 т + NPK экв.	0,14	0,04	2,22	2,36	2,26	8,67	8,30	2,58	2,10
Навоз 20 т + NPK экв.	0,55	0,56	2,28	2,83	2,84	10,37	10,41	4,28	4,21

* -расчет по балансу $C_{орг}$, ** - расчет через изменение запасов $C_{орг}$ в слое почвы 0-100 см; *** - накопление углерода в урожае зерна, соломы, сена клевера, клубнях и ботве картофеля.

Таблица 13 - Влияние минеральных удобрений на аккумуляцию углерода в растительной продукции (основной и побочной) и почвенном органическом веществе в условиях полевого восьмипольного севооборота (*опыт 2*)

Вариант	Накопление C-CO_2, т/га/ год			Баланс C-CO_2, т/га/ год		Аккумуляция CO_2, т/га/ год			
	в почве		в растениях ***			всего		за счёт систем удобрения	
	1*	2**		1	2	1	2	1	2
Без удобрений	-0,14	-0,10	1,89	1,75	1,79	6,42	6,57	-	-
N_{90}	-0,03	-0,63	2,29	2,26	1,66	8,29	6,09	1,87	-0,47
P_{90}	-0,15	-0,25	1,97	1,82	1,72	6,68	6,31	0,26	-0,25
K_{90}	-0,19	0,73	2,01	1,82	2,74	6,66	10,03	0,23	3,46
$(NP)_{90}$	-0,01	0,38	2,16	2,15	2,54	7,89	9,32	1,46	2,75
$(NK)_{90}$	-0,01	0,70	2,19	2,18	2,89	8,00	10,60	1,57	4,03
$(PK)_{90}$	-0,20	0,38	2,11	1,91	2,49	7,00	9,13	0,58	2,56
$(NPK)_{90}$	-0,02	0,45	2,26	2,24	2,71	8,21	9,93	1,79	3,36
$(NPK)_{30}$	-0,16	0,10	2,15	1,99	2,25	7,28	8,23	0,86	1,67
$(NPK)_{60}$	-0,09	0,03	2,30	2,21	2,33	8,12	8,56	1,70	1,99
$(NPK)_{120}$	0,06	0,20	2,24	2,30	2,44	8,42	8,93	2,00	2,37
$(NPK)_{150}$	0,13	0,25	2,27	2,40	2,52	8,81	9,25	2,39	2,68

* -расчет по балансу $C_{орг}$, ** - расчет через изменение запасов $C_{орг}$ в слое почвы 0-100 см; *** - накопление углерода в урожае зерна, соломы, сена клевера, клубнях и ботве картофеля.

Таблица 14 - Влияние ОСВ на аккумуляцию углерода в растительной продукции (основной и побочной) и почвенном органическом веществе в условиях полевого семипольного севооборота (*опыт 3*)

Вариант	Накопление С-CO_2, т/га/ год			Баланс С-CO_2, т/га/ год		Аккумуляция CO_2, т/га/ год			
	в почве		в растениях ***			всего		за счёт систем удобрения	
	1*	2**		1	2	1	2	1	2
Без удобрений	-0,09	-0,11	1,60	1,51	1,49	5,54	5,47	-	-
Навоз	0,03	-0,11	1,98	2,01	1,87	7,38	6,87	1,84	1,40
ОСВ	0,06	0,17	2,05	2,11	2,22	7,73	8,13	2,18	2,66
NPK – фон	-0,09	0,17	2,12	2,03	2,29	7,45	8,40	1,90	2,93
Фон + навоз	0,09	0,17	2,28	2,37	2,45	8,68	8,97	3,14	3,50
Фон + ОСВ	0,10	0,60	2,28	2,38	2,88	8,74	10,57	3,20	5,10

* -расчет по балансу $C_{орг}$, ** - расчет через изменение запасов $C_{орг}$ в слое почвы 0-100 см; *** - накопление углерода в урожае зерна, соломы, сена клевера.

Результаты опытов *1, 3* показали, что максимальная почвенная секвестрация CO_2 происходила при использовании навоза 20 т/га в год и экв. количества NPK, применении ОСВ по фону NPK. Здесь можно говорить о депонировании углерода в ОВ почвы. Внесение навоза 20 т/га в год + NPK эквивалентно навозу способствовало увеличению количества $C_{орг}$ в слое 0-60 см (табл. 4). В результате запасы $C_{орг}$ в слое 0-100 см возросли относительно контрольного варианта на 40%. Длительное внесение ОСВ по фону минеральных удобрений увеличило содержание $C_{орг}$ в слое почвы 0-40 см (табл. 7). Запасы $C_{орг}$ в слое почвы 0-40 см возросли на 30% (к фону). При этом, по мнению некоторых исследователей секвестрация органического углерода в почве требует определенного срока (~100 лет), чтобы считать устойчивым повышение его содержания по сравнению с исходным под воздействием сельскохозяйственных мероприятий (Stockmann, 2013). Полученные данные в *опыте 2* не позволяют сделать достоверный вывод о влиянии изучаемых удобрений на процессы депонирования углерода в почве.

Накопление $C_{орг}$ в почве зависит не только от количества и качества поступающего органического материала, но и от скорости и прочности стабилизации органических компонентов в почве (Когут, Семёнов, 2020; Cotrufo et al., 2015). Секвестрация возможна лишь до определенного уровня,

дальнейшее поступление свежего ОВ больше не будет приводить к дополнительному росту $C_{орг}$ в почве. Считается, что способность почв стабилизировать и сохранять углерод в первую очередь определяется содержанием тонкодисперсных гранулометрических фракций пыли и глины размером 0,05 (0,02) мм (Когут, Семёнов, 2020; Wiesmeier et al., 2014; Lal, 2018). Количество возможного стабилизированного органического вещества в почве называют углеродпротекторной емкостью почвы (СРС) или углероддепонирующим потенциалом.

СРС почвы рассчитывали по трём различным уравнениям регрессии. Обсуждения проведены по средним значениям, т.к. в этом случае сглаживаются частные различия в свойствах почв (Когут, Семёнов, 2020). Средняя величина СРС пахотного слоя исследуемой дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы в *опыте 1* составила 29-31 г С/кг (или 76-80 т/га), в *опыте 2* - 31-33 г С/кг (или 81-84 т/га), в *опыте 3* - 27-28 г С/кг (или 70-73 т/га) и существенно не зависела от применяемых систем удобрения (табл.15).

В исследованиях Б.М. Когута, В.М. Семёнова (2020) величина СРС верхнего слоя (0–10 или 0–20 см) ряда почв Европейской части России варьировала от 11 до 30 г С/кг. По углеродпротекторной емкости почвы располагались в следующей последовательности: бурая лесная кислая (30 г С/кг) > чернозем типичный (29 г С/кг) > чернозем обыкновенный (29 г С/кг) > луговая слитизированная (29 г С/кг) > чернозем выщелоченный (28 г С/кг) > серая лесная (25 г С/кг) > пойменная луговая (23 г С/кг) > каштановые (22 г С/кг) > бурая полупустынная (15 г С/кг) > дерново-подзолистая (11 г С/кг). Было установлено, что в черноземе депонируется в 2,6 раза больше углерода, чем в дерново-подзолистой почве. Исследователи отмечают, что при всех способах расчета максимальная величина СРС среди рассматриваемых типов почв не превышала 35 г С/ кг, что дает основание считать этот уровень верхним пределом углеродпротекторной емкости для почв. Размеры СРС для типов почв, залегающих в Европе, Америке, Африке и Австралии находятся также в интервале 5–35 г С/ кг (Hassink, 1997).

Таблица 15 – Углеродпротекторная емкость пахотных дерново-подзолистых тяжелосуглинистых почв (0-20 см)

Вариант	Содержание частиц, % от массы почвы		Углеродпротекторная емкость почвы					Насыщенность $C_{орг}$, %
	сумма частиц <0,02 мм	сумма частиц <0,05мм	$СРС_1$ (<0,02 мм)	$СРС_2$ (<0,02 мм 2:1)	$СРС_3$ (<0,05мм 2:1)	СРС среднее		
			г С/кг			г С/кг	т С /га	
Опыт 1								
Без удобрений	65,2	72,0	28	31	30	30	77	39
Навоз 10 т/га	68,9	76,9	30	32	31	31	80	44
Навоз 20 т/га	65,7	73,0	28	31	30	30	77	48
NPK экв. 10 т навоза	65,7	73,2	28	31	30	30	77	43
NPK экв. 20 т навоза	66,7	74,7	29	31	30	30	78	44
Навоз 5 т + NPK экв.	67,8	75,6	29	32	31	30	79	43
Навоз 10 т + NPK экв.	64,6	71,7	28	30	30	29	76	47
Навоз 20 т + NPK экв.	65,2	72,7	28	31	30	30	77	52
Опыт 2								
Без удобрений	70,8	79,2	30	33	31	32	82	35
$(NPK)_{30}$	69,2	77,8	30	32	31	31	81	36
$(NPK)_{60}$	68,9	78,0	30	32	31	31	80	40
$(NPK)_{90}$	72,7	81,8	31	34	32	32	84	40
$(NPK)_{120}$	69,0	78,3	30	32	31	31	81	43
$(NPK)_{150}$	74,5	84,8	32	34	33	33	84	43
Опыт 3								
Без удобрений	61,1	66,4	27	29	29	28	73	40
Навоз	59,2	64,3	26	28	28	27	71	44
ОСВ	60,6	66,0	27	29	29	28	73	45
NPK – фон	57,6	62,5	25	27	28	27	70	43
Фон + навоз	60,8	66,3	27	29	29	28	73	47
Фон + ОСВ	60,3	65,9	26	29	29	28	72	50

Исследуемые дерново-подзолистые почвы по содержанию частиц физической глины (40,1-44,9 %) в слое 0-20 см относятся к тяжелосуглинистым (прил. 7). Содержание тонкодисперсных гранулометрических фракций пыли и глины размером менее 0,05 и 0,02 мм в опытах варьировало от 62,5 до 84,8 и от 57,6 до 74,5 %, соответственно. В изучаемых дерново-подзолистых почвах количество фракций размером менее 0,05 и 0,02 мм было в несколько раз выше, чем в дерново-подзолистых почвах, представленных в работе Б.М. Когута, В.М. Семёнова (2020) (12 и 22 %), что соответственно повлияло на величину СРС.

Минимальная насыщенность почвы $C_{орг}$ в опытах была отмечена при экстенсивном возделывании (без удобрений) сельскохозяйственных культур (35-40%). Наибольшую насыщенность $C_{орг}$ (50-52%) пахотного слоя наблюдали при внесении навоза 20 т/га в год + NPK эквивалентно навозу и внесении ОСВ по фону NPK.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что у пахотных дерново-подзолистых тяжелосуглинистых почв высокий потенциал для секвестрации атмосферного углерода, его накопления и депонирования в почве. Для реализации этого потенциала необходима смена условий землепользования: внесение высоких доз органических и минеральных удобрений, переход на минимальную обработку почвы, возделывание сельскохозяйственных культур и сортов, активно секвестрирующих углерод атмосферы. Возможно, биоклиматический потенциал зоны лимитирует процесс сорбции органического углерода минеральной фазой почвы (Когут, Семёнов, 2020). Однако, в работе Н.Е. Завьяловой (2022) показано, что целинная почва под смешанным лесом данной климатической зоны полностью насыщенна углеродом.

Таким образом, установлено, что аккумуляция из атмосферы углекислого газа культурами полевых севооборотов в среднем в год (вегетационный период) без применения удобрений составила 9,7-10,7 т/га или 2,7-2,9 т/га углерода. Накопление углерода в биомассе растений в результате применения удобрений увеличивалось на 9-31%. 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. Максимальная почвенная секвестрация CO_2 и депонирование углерода в глубинных горизонтах почвы происходили при использовании навоза 20 т/га в год и экв. количества NPK, а также при применении ОСВ по фону NPK.

3.3 Элементный состав и структура гуминовых кислот дерново-подзолистой почвы

Изучение процессов трансформации гуминовых кислот (ГК), как важнейшей фракции ОВ, при длительном антропогенном воздействии на почву вызывает большой научный интерес, так как ГК проявляют высокую функциональную активность, определяют специфику водных, физических, химических и тепловых свойств почвы. Их состав и структура зависят от условий почвообразования и изменяются при антропогенном воздействии на почву (Орлов, 1990; Чимитдоржиева и др., 2008; Холодов и др., 2011; Гасанова и др., 2018; Чимитдоржиева и др., 2021).

Гуминовые вещества, и гуминовые кислоты в частности, определяют плодородие и функции почвы, однако их происхождение, молекулярная структура и устойчивость являются предметом дискуссий (Заварзина и др., 2019; 2021; Piccolo, 2002; Sutton, Sposito, 2005). По доминирующей парадигме второй половины 20 века считалось, что преобладающая часть почвенного ОВ представлена гуминовыми веществами - высокомолекулярными, обогащенными гетероциклическим азотом, стабильными полимерами с ароматическим ядром и обширной алифатической периферией, которые и придают ОВ многообразие и специфичность его свойств и функций, а соотношение Сгк:Сфк отражает качество почвенного ОВ (Иванов и др., 2017; Заварзина и др., 2021; Semenov et al., 2013). В последнее время поставлена под сомнение концепция гумификации и факт существования гуминовых веществ как отдельного класса органических соединений (Заварзина и др., 2019, 2021; Холодов и др., 2020). ОВ почв предложено рассматривать как континуум биомолекул на разных стадиях деградации (Lehmann, Kleber, 2015; Baveye, Wander, 2019). Накопление этих веществ в почвах обеспечивается не молекулярной структурой, а физико-химическими, биологическими и экологическими условиями, ограничивающими скорость деструкции (Заварзина и др., 2021; Schmidt et al., 2011). Важную роль играет взаимодействие с минеральной

частью почвы (Заварзина и др., 2021; von Lützow et al., 2006; Kögel-Knabner, Amelung, 2021). Формирование супрамолекулярных агрегатов обеспечивается слабыми и сильными (близкими к ковалентным) водородными связями (Заварзина и др., 2021; Wells, 2019; Wells, Stretz, 2019), а также слабыми дисперсионными взаимодействиями (силы Ван-дер-Ваальсовая, π – π, CH-π) (Иванов и др., 2017; Холодов и др., 2020; Заварзина и др., 2021; Semenov et al., 2013; Olk et al., 2019). Новую информацию о природе образования, составе и строении ОВ дают инструментальные методы анализа (инфракрасная Фурье-спектроскопия, масс-спектроскопия, ядерно-магнитный резонанс, рентгеноструктурный анализ, электронное микроскопирование и др.) (Когут, Семёнов, 2015; Мамонтов и др., 2023; Wershaw, 2004; Kleber, Johnson, 2010).

Развитие в последнее время современных спектральных методов анализа является перспективным подходом к изучению природного ОВ in situ (Schaeffer et al., 2015), но не может полностью заменить экстракционные методы. По мнению А.Г. Заварзиной с соавторами (2021) экстракция и исследования in situ должны быть взаимодополняющими. Они предлагают трактовать щелочную экстракцию не как способ селективного извлечения особой группы специфических веществ, а относиться к этой процедуре, как к способу растворения количественно значимой (30–80% от $C_{орг}$ почв) (Stevenson, 1994) части ОВ, включающей интактные и измененные (гумифицированные) его компоненты. Относиться, как к способу, позволяющему изучить компонентный состав этой части (Olk et al., 2019). Традиционную щелочную экстракцию следует рассматривать как способ извлечения гидрофильных полярных веществ, осаждение кислотой – как их концентрирование для дальнейшего изучения. Данные авторы считают, что исторические названия гумусовых фракций (ГК, ФК, гумин) следует сохранить как устоявшиеся групповые понятия и названия препаратов, полученных определенным способом, не придавая этим фракциям значения

особых специфических веществ. Их изучение может помочь решить важные научные и практические вопросы современного земледелия.

Для получения информации о строении ОВ, наличии основных конституционных элементов в его структурных фрагментах и направлении трансформации ОВ под действием природных и антропогенных факторов нами был изучены препараты гуминовых кислот методом элементного анализа. Выражение результатов элементного анализа в атомных процентах дает информацию о тех изменениях, которые происходят с ОВ в ходе почвообразования. Соотношения H:C, O:C и C:N характеризуют направление процессов трансформации компонентов ОВ при антропогенном воздействии на почву. Соотношение H:C определяет степень обогащенности структуры компонентов ОВ ароматическими фрагментами, O:C - степень окисленности, C:N – отражает роль азотсодержащих компонентов в построении ОВ (Орлов, 1990; Гасанова и др., 2018). При описании полученных результатов под гуминовыми кислотами или компонентами ОВ почвы понимаются компоненты ОВ, выделенные щелочной экстракцией.

Результаты исследований показали, что в структуре ОВ целинной почвы под лугом преобладают компоненты с пониженным содержанием углерода и азота. Низкая микробиологическая активность способствует невысокой скорости минерализации органического материала, что приводит к возрастанию доли алифатических группировок в структуре ОВ, отношение H:C составляет 1,4 (табл. 16).

В пахотной почве элементный состав компонентов ОВ имел свои особенности и зависел от видов и доз применяемых удобрений.

В *опыте 1* длительное применение органических удобрений (насыщенность пашни навозом по 10 т/га в год) привело к накоплению и формированию ОВ в почве с повышенным содержанием ароматических структурных фрагментов с более высоким содержанием углерода (36,9 ат.%), чем в других вариантах длительного опыта.

Таблица 16 – Элементный состав, атомные отношения и степень окисленности (*W*) гуминовых кислот пахотной и целинной почвы

Вариант	Содержание, %					Атомные отношения			*W*
	C	H	O	N	S	H:C	O:C	C:N	
Злаково-разнотравный луг	49,1 32,1	5,8 45,7	40,0 19,6	4,2 2,4	0,8 0,2	1,4	0,6	13,6	-0,20
Опыт 1									
Без удобрений	42,0 30,4	4,7 40,6	48,9 26,6	3,4 2,1	1,0 0,3	1,3	0,9	14,3	0,41
Навоз 10 т/га	51,7 36,9	4,6 39,5	38,7 20,7	4,3 2,6	0,7 0,2	1,1	0,6	13,9	0,05
NPK экв. 10 т навоза	44,9 30,5	5,4 44,1	45,3 23,1	3,4 2,0	1,0 0,2	1,5	0,8	15,3	0,07
Навоз 5 т+NPK экв. навозу	46,0 32,3	5,0 41,8	45,1 23,7	3,4 2,0	0,5 0,1	1,3	0,7	15,8	0,18
Навоз 10 т + NPK экв. навозу	42,6 30,4	4,8 41,2	48,9 26,2	3,2 2,0	0,5 0,1	1,4	0,9	15,6	0,37
Опыт 2									
Без удобрений	50,6 32,7	5,9 46,1	38,3 18,6	4,4 2,5	0,7 0,2	1,4	0,6	13,3	-0,27
$N_{60}P_{60}K_{60}$	51,3 33,0	6,0 46,3	37,4 18,1	4,5 2,5	0,9 0,2	1,4	0,6	13,4	-0,31
$N_{90}P_{90}K_{90}$	51,4 33,3	5,9 45,7	37,3 18,1	4,7 2,6	0,7 0,2	1,4	0,5	12,8	-0,28
$N_{150}P_{150}K_{150}$	51,8 34,6	5,4 43,3	38,1 19,1	4,0 2,3	0,7 0,2	1,3	0,5	15,0	-0,15
Опыт 3									
Без удобрений	50,5 35,5	4,9 40,9	40,0 21,1	3,6 2,2	1,1 0,3	1,1	0,6	16,2	0,03
Навоз	39,8 28,9	4,7 40,9	51,3 27,9	3,1 1,9	1,1 0,3	1,4	1,0	15,0	0,52
ОСВ	46,3 34,2	4,3 38,5	44,8 24,8	3,5 2,2	1,1 0,3	1,1	0,7	15,6	0,33
NPK – фон	46,9 34,4	4,4 38,9	44,1 24,8	3,4 2,1	1,2 0,3	1,1	0,7	16,3	0,28
Фон +навоз	44,5 31,8	4,8 40,9	46,4 24,9	3,4 2,1	1,0 0,3	1,3	0,8	15,3	0,28
Фон + ОСВ	46,2 31,8	5,2 43,2	43,7 22,6	3,6 2,1	1,3 0,3	1,4	0,7	15,0	0,06

Примечание – над чертой – массовая доля, под чертой – атомная доля (все расчеты приведены на обеззоленные препараты).

Для этого варианта выявлено более низкое отношения H/C, которое составило 1,1 и минимальная степень окисленности структурных фрагментов (*W*=0,05) (табл. 16; рис. 10). В унавоженной почве компоненты ОВ более обогащены азотом, атомное отношение C:N было минимально и составило 13,9.

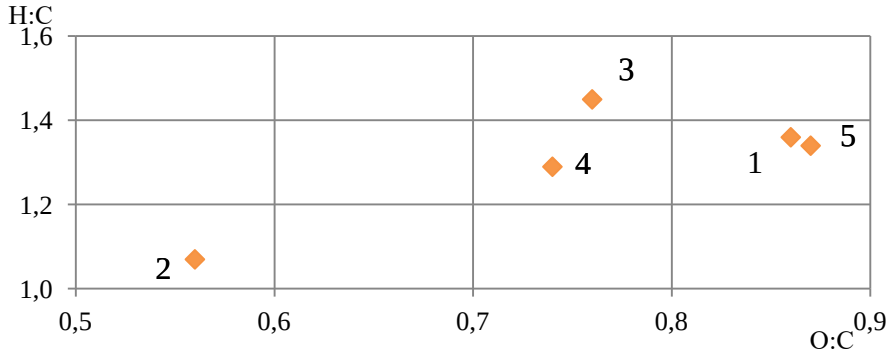


Рисунок 10 - Диаграмма атомных отношений ГК дерново-подзолистой почвы: 1 - без удобрений, 2 - навоз 10 т/га, 3 - NPK экв. 10 т навоза, 4 - навоз 5 т/га + экв. NPK, 5 - навоз 10 т/га + экв. NPK *(опыт 1)*.

При минеральной системе удобрения (NPK эквивалентно 10 т навоза) структурные компоненты ОВ, выделенные щелочной экстракцией, характеризуются низким содержанием углерода и повышенным – водорода, структура представлена значительно большим количеством алифатических групп, отношение H:C составило 1,5, степень окисленности – 0,07.

Гуминовые кислоты варианта без удобрений наиболее окислены (*W*=0,41), слабо обуглерожены (30,4 ат.%), характеризуются не высоким содержанием азота (2,1 ат.%). Отношение H/C, равное 1,3 указывает на преобладание алифатических фрагментов в структуре ГК этого варианта.

Варианты с органоминеральной системой удобрения занимали промежуточное положение по содержанию основных конституционных элементов в компонентах органического вещества, выделенных щелочной экстракцией, трансформация органического вещества протекала в направлении накопления и образования фрагментов, где преобладали алифатические группы, атомное отношение H/C варьировало в интервале 1,3-1,4.

В *опыте 2* отмечено увеличение в компонентах органического вещества, выделенных щелочной экстракцией, содержания углерода от 32,7 в варианте без удобрений до 34,6 ат.% при максимальной дозе $(NPK)_{150}$, изменения в содержании водорода имели обратную тенденцию. Процесс трансформации органического вещества при внесении минеральных удобрений сопровождался процессом окисления, содержание в них

кислорода увеличивалось от 18,6 в варианте без удобрений до 19,1 ат.% при $(NPK)_{150}$. Отмечена тенденция уменьшения отношения H:C в компонентах ОВ с увеличением дозы NPK. Компоненты ОВ почвы в варианте $(NPK)_{150}$ имели самое высокое содержание углерода среди исследуемых вариантов опыта и самое низкое водорода. Полученное соотношение H:C в данном варианте указывает на более высокую долю ароматических фрагментов в их составе по сравнению с другими вариантами длительного стационарного опыта (рис. 11).

Компоненты ОВ в варианте $(NPK)_{90}$ были более насыщены азотом, чем в других вариантах и характеризовались самым узким отношением C:N=12,8. Увеличение степени окисленности отмечено при длительном внесении минеральных удобрений в дозе $(NPK)_{150}$.

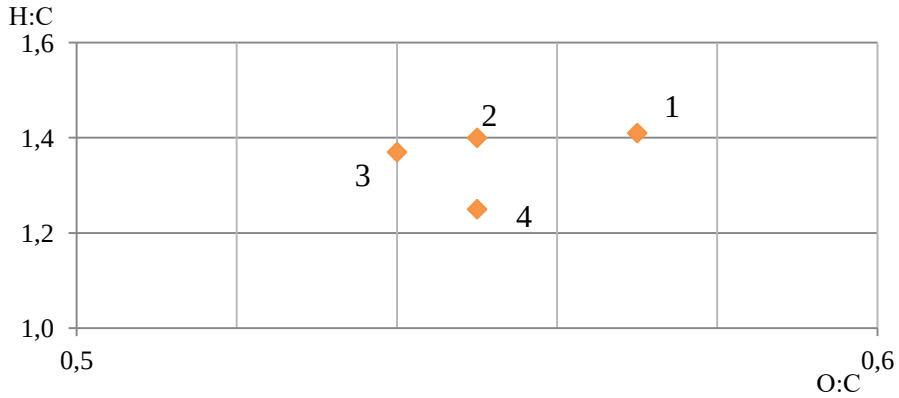


Рисунок 11–Диаграмма атомных отношений ГК дерново-подзолистой почвы: 1 – без удобрений, 2 – $N_{60}P_{60}K_{60}$, 3 – $N_{90}P_{90}K_{90}$, 4 – $N_{150}P_{150}K_{150}$ *(опыт 2)*

В *опыте 3* длительное применение навоза, ОСВ и их сочетание с минеральными удобрениями привело к обогащению компонентов ОВ азотом, отношения C/N составило 14,5-15,6 против 16,2 в варианте без удобрений. Применение удобрений в данном опыте существенно повысило степень окисленности (с 0,03 в варианте без удобрений до 0,28-0,52). Только при внесении ОСВ на фоне минеральных удобрений, степень окисленности сохранилась на уровне контроля. Максимальная степень окисленности и обогащение компонентов ОВ азотом отмечено при применении

традиционного органического удобрения – навоза КРС (насыщенность 5,7 т/га в год).

При внесении ОСВ отмечено увеличение ароматических фрагментов в составе ОВ (H/C=1,1). Использование традиционного органического удобрения (навоз КРС) привело к увеличению алифатических групп, о чем свидетельствует более широкое отношение H:C равное 1,4. При использовании навоза и ОСВ по фону минеральных удобрений, по-видимому, происходило накопление и формирование ОВ, состоящего из большого количества разнообразных алифатических и ароматических фрагментов, различной функциональной способности (рис. 12). Такая структура является наиболее оптимальной с агрономической точки зрения.

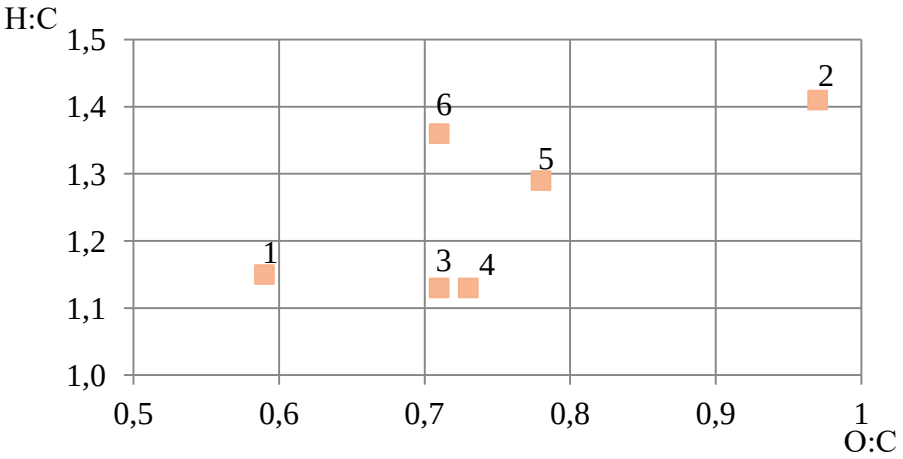


Рисунок 12 - Диаграмма атомных отношений ГК дерново-подзолистой почвы: 1 – без удобрений, 2 – навоз, 3 – ОСВ, 4 – NPK (фон), 5 – фон+ навоз, 6 фон+ ОСВ *(опыт 3)*

Возможность идентифицировать атомные группировки, получить информацию о типе связей и элементах структуры «молекулярных ансамблей» гуминовых кислот даёт метод инфракрасной спектроскопии. Совокупность и интенсивность полос поглощения позволяют судить о роли ароматических и алифатических фрагментов в структуре компонентов ОВ, выделенных щелочной экстракцией (Орлов, 1990; Старых и др., 2019; Шевцова и др., 2019).

При сравнительном изучении спектров было выявлено, что гуминовые кислоты всех вариантов, имеют однотипные ИК-спектры, что позволяет говорить об общем мотиве их построения. Инфракрасные спектры препаратов гуминовых кислот почвы под злаково-разнотравным лугом типичны для дерново-подзолистых почв (рис. 13). Они характеризуются большим набором полос поглощения. Полосы поглощения в области 2800-3000 $см^{-1}$ обусловлены валентными колебаниями С-Н метильных (CH_3) и метиленовых (CH_2) группировок. Широкая полоса поглощения в области 3300-3500 $см^{-1}$ ответственна за водородные связи. Отмечено интенсивное поглощение в области 1700-1720 $см^{-1}$, которое обусловлено колебаниями групп >С=О карбоновых кислот.

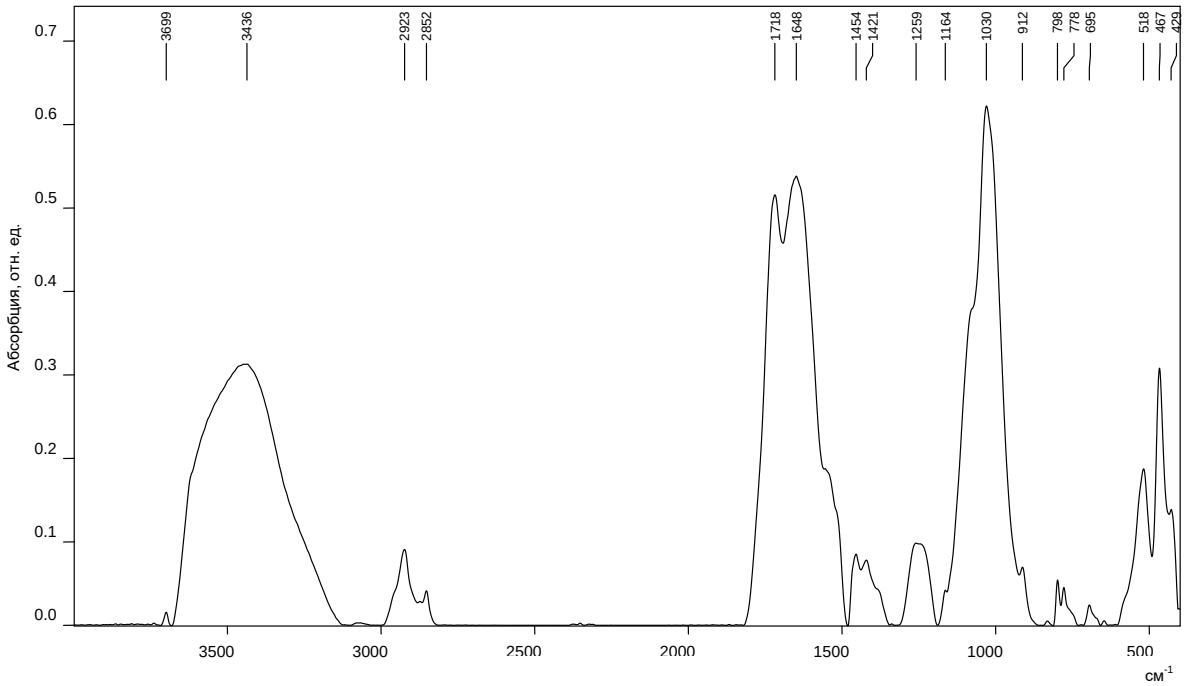


Рисунок 13 – Инфракрасный спектр гуминовых кислот дерново-подзолистой почвы под злаково-разнотравным лугом

На присутствие ароматических группировок в агрегатах ГК указывает полоса поглощения при 1605-1670 $см^{-1}$, которая обусловлена валентными колебаниями сопряженных двойных связей углеродных атомов. Полоса (плечо) в области 1510 $см^{-1}$ свидетельствует о наличии ароматических С=С связей, однако интенсивность ее слабая. Поглощение в области 1400-1470 $см^{-1}$ может быть отнесено к деформационным колебаниям связи

С-Н в группах CH_2. Полосы поглощения с максимумом при 1200-1280 $см^{-1}$ обусловлены колебаниями связи С-О простых эфиров и им подобных соединений. Возможно, поглощение в этой области вызвано ассиметричными валентными колебаниями в группах С-О-С, что подтверждается характерными симметричными колебаниями этой группы в области 1030 $см^{-1}$. О высокой степени замещения бензольных колец можно судить по отсутствию выраженной полосы в области 3030 $см^{-1}$. Полученные результаты ИК-Фурье спектров говорят о том, что состав ОВ целинной дерново-подзолистой почвы характеризуется небольшим количеством ароматических фрагментов и значительно большим количеством алифатических структур, что свидетельствует о низкой степени гумификации органического вещества.

ИК-Фурье спектры гуминовых кислот, выделенных из почвы длительных стационарных опытов, характеризовались аналогичным набором полос, как и ГК целинной почвы, но отличались интенсивностью валентных колебаний группировок и зависели от системы удобрений и насыщенности почвы удобрениями. В спектрах ГК пахотных почв отмечено более сильное поглощение в области 2800-3000 $см^{-1}$, что указывает на большее количество в структуре супрамолекулярных агрегатов алифатических компонентов сравнительно низкой молекулярной массы, чем в почве злаково-разнотравного луга.

Гуминовые кислоты почвы длительного стационарного *опыта 1* имели полосы поглощения в диапазоне длины волны от 500 до 3500 $см^{-1}$ (рис. 14). Изучаемые системы удобрения оказали слабое влияние на наличие наиболее характерных атомных группировок и интенсивность полос их поглощения. Полоса поглощения при 3436-3465 $см^{-1}$ обусловлена валентными колебаниями групп ОН, связанных межмолекулярными водородными связями. Поглощение в данной области максимально для гуминовых кислот варианта «навоз 10 т/га», минимально в контрольном варианте.

На ИК-спектрах полосы поглощения в области 2927 $см^{-1}$ обусловлены валентными колебаниями С-Н метильных (CH_3) и метиленовых (CH_2)

группировок. Наиболее интенсивно эти полосы проявились в спектрах ГК вариантов «навоз 10 т/га» и «навоз 5 т/га + экв. NPK», что свидетельствует о наличии в структуре ГК достаточного количества концевых метильных групп. Эта полоса значительно слабее в варианте «навоз 10 т/га + экв. NPK», что может быть вызвано уменьшением содержания метильных и метиленовых группировок в результате деструкции органического вещества. Наличие вышеуказанных групп подтверждено деформационными колебаниями связи С-Н в группах CH_2 в области 1450-1416 $см^{-1}$.

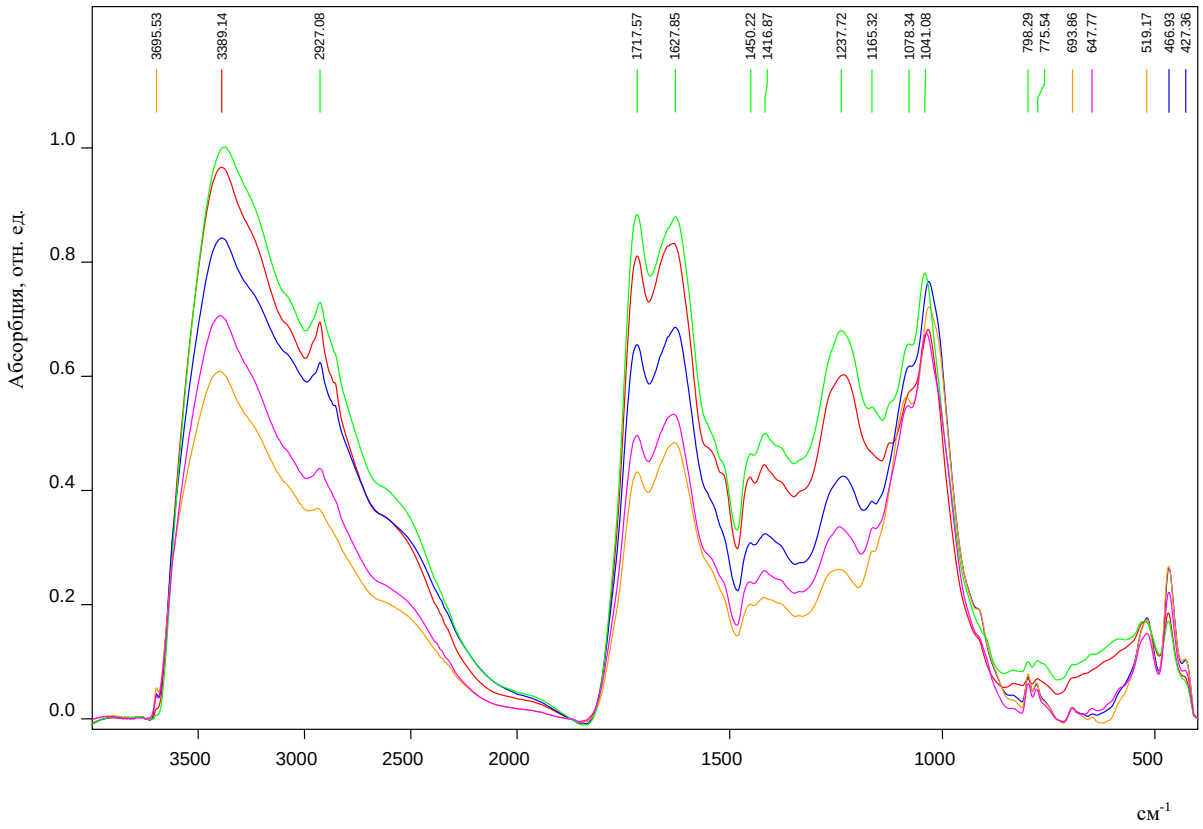


Рисунок 14 - Инфракрасные спектры гуминовых кислот почвы: синий – контроль (без удобрений), красный - навоз 10 т/га, розовый - NPK экв. 10 т навоза, зеленый - навоз 5 т/га + экв. NPK, коричневый - навоз 10 т/га + экв. NPK *(опыт 1)*

В области волновых чисел 1717-1627 $см^{-1}$ четко проявляются полосы поглощения, присутствующие у препаратов ГК всех изучаемых вариантов опыта. Они могут быть обусловлены наличием карбоксилат-ионов и деформационными колебаниями NH_2 амидов (полоса Амид II). Полоса

1717см$^{-1}$, обусловлена колебаниями группы >C=O карбоновых кислот. Судя по интенсивности этой полосы, наибольшее количество карбоксильных групп в своем составе имеют ГК вариантов «навоз 10 т/га» и «навоз 5 т/га + экв. NPK». Наиболее слабо колебания группы >C=O карбоновых кислот выражены в гуминовых кислотах почвы при минеральной системе удобрения.

На незначительное участие ароматических колец указывает полоса поглощения в области 1627 см$^{-1}$, которая обусловлена валентными колебаниями сопряженных двойных связей углеродных атомов (C=C) ароматических структур в супрамолекулярных агрегатах ГК. Наиболее выражена эта полоса в ИК-спектрах вариантов «навоз 10 т/га» и «навоз 5 т/га + экв. NPK». Слабо проявляется данная полоса при минеральной системе удобрения и в варианте «навоз 10 т/га + экв. NPK».

В области волновых чисел 1237-500 см $^{-1}$ трактовка полос поглощения достаточно затруднительна. В этой области могут проявляться кислородсодержащие группировки различной природы (спирты, эфиры, фенолы), то есть группы OH. Можно предположить, что в пределах волновых чисел 1237-1000 см$^{-1}$ полосы поглощения обусловлены кислородсодержащими группировками ГК.

Результаты ИК-спектроскопии указывают на то, что длительное применение органической системы удобрения сопровождалось формированием в составе ОВ почвы большого количества ароматических групп по сравнению с другими изучаемыми вариантами. Более высокая интенсивность поглощения группы >C=O карбоновых кислот в области 1717 см$^{-1}$ и двойных связей углеродных атомов при 1627 см$^{-1}$ подтверждает это положение.

В *опыте 2* на спектрах ГК всех изученных вариантов присутствовало интенсивное поглощение >C=O группы карбоновых кислот в области 1700-1720 см$^{-1}$ (рис. 15).

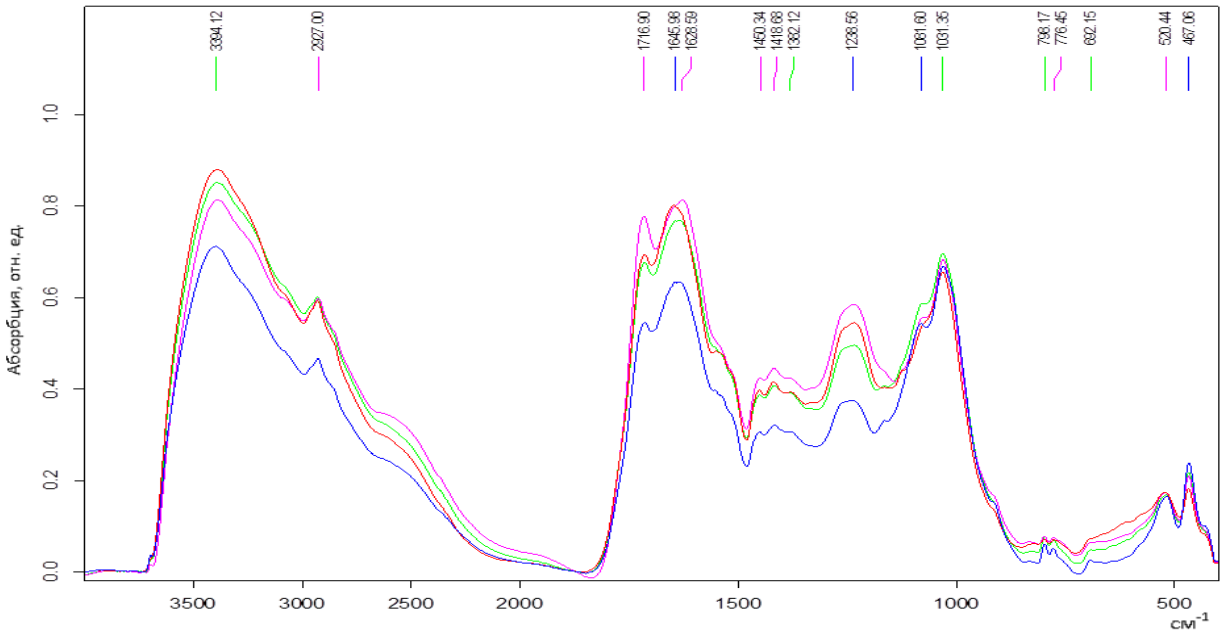


Рисунок 15 – ИК-спектры ГК почвы: зеленый – без удобрений, 2 синий – $(NPK)_{60}$, красный – $(NPK)_{90}$, розовый – $(NPK)_{150}$ *(опыт 2)*

Максимальное поглощение отмечено для ГК варианта $(NPK)_{150}$. Проявились колебания группы C=O ароматических колец в области 1605-1670 $см^{-1}$. Наличие интенсивных полос поглощения при 3394 и 2927 $см^{-1}$ обусловлено ассиметричными валентными колебаниями C-H метильных (CH_3) и метиленовых (CH_2) группировок. Наличие этих же групп подтверждается полосой поглощения в области 1382-1450 $см^{-1}$. Полоса поглощения при 1400-1470 $см^{-1}$ может быть отнесена к деформационным колебаниям связи C-H в группах CH_2. Полосы поглощения с максимумом при 1200-1280 $см^{-1}$ обусловлены колебаниями связи C-O простых эфиров и им подобных соединений. Возможно, это вызвано асимметричными валентными колебаниями в группах C-O-C. Симметричным валентным колебаниям в той же группе соответствуют полосы 1030 $см^{-1}$. Судя по интенсивности полос поглощения в варианте $(NPK)_{150}$ состав ОВ характеризуется большим количеством ароматических компонентов в сравнении с контрольным вариантом опыта.

В *опыте 3* по данным ИК-Фурье спектроскопии ГК всех вариантов имели широкую полосу поглощения при 3466-3423 $см^{-1}$, обусловленную

валентными колебаниями групп ОН, связанных межмолекулярными водородными связями (рис. 16).

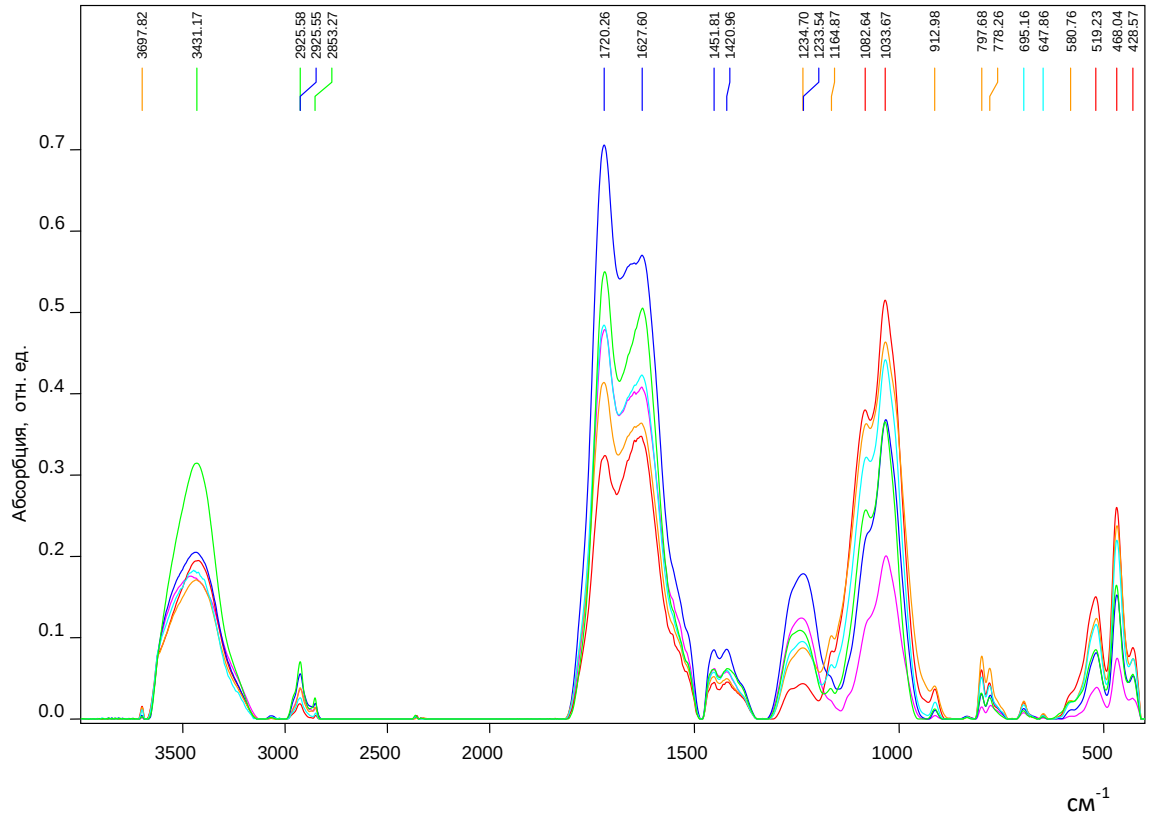


Рисунок 16 - ИК-спектры ГК дерново-подзолистой почвы: синий - контроль, красный - навоз, розовый - ОСВ, зеленый - NPK (фон), голубой - фон + навоз, коричневый - фон + ОСВ *(опыт 3)*

В области валентных колебаний С-Н метильных и метиленовых группировок на спектрах ГК фиксируется до двух полос поглощения при 2927-2925 и 2863-2862 см $^{-1}$. Полосы поглощения 2925 и 2862 см$^{-1}$ (валентные колебания С-Н метиленовых группировок) наиболее интенсивны в контрольном варианте и варианте NPK, что свидетельствует о наличии разветвленных алифатических цепочек с концевыми метильными группами (полоса поглощения 2925 см $^{-1}$). В остальных вариантах интенсивность этих полос поглощения уменьшается. В области волновых чисел 1800-1300 см$^{-1}$ в спектре ГК контрольного варианта фиксируется полоса поглощения при 1720 см$^{-1}$, которая имеет высокую интенсивность и обусловлена колебаниями группы > С=О карбоновых кислот. Увеличение нагрузки антропогенного фактора на почву (внесение органических и минеральных удобрений)

привело к снижению ее интенсивности. В спектре ГК контрольного варианта наблюдали четкое выделение полосы поглощения 1628 $см^{-1}$. Эта полоса поглощения достаточно интенсивна и для варианта NPK. Поглощение в данной области указывает на присутствие ароматических колец в ГК, обусловлено валентными колебаниями двойных связей углеродных атомов. В наименьшей мере на интенсивность этой полосы поглощения воздействует применение навоза и ОСВ.

Полосы поглощения (1440-1430 $см^{-1}$ и 1405-1400 $см^{-1}$) могут быть обусловлены деформационными колебаниями С-Н метильных и метиленовых группировок, карбоновыми кислотами, карбоксилат-ионом, причем интенсивность этих полос в спектрах ГК контрольного варианта существенно выше, чем для других вариантов опыта.

Внесение навоза КРС и ОСВ совместно с NPK привело к увеличению в составе гуминовых кислот алифатических группировок.

Следует отметить достаточно сильное колебание полученных данных по элементному анализу и ИК-спектроскопии между опытами, что может быть связано с гетерогенностью почв, типом севооборота, временем отбора почвенных проб и другими факторами.

Таким образом, проведенные исследования в почвенно-климатических условиях Предуралья показали, что гуминовые кислоты, выделенные препаративно из пахотных почв длительных стационарных опытов и их целинного аналога, по содержанию конституционных элементов (C, H, N, O, S) соответствуют средним показателям ГК дерново-подзолистых почв, имеют однотипные ИК-спектры, что позволяет говорить об общем мотиве их построения. По данным ИК-спектроскопии в пахотной почве длительных опытов в сравнении с целинным аналогом в структуре супрамолекулярных агрегатов отмечено более высокое содержание алифатических компонентов сравнительно низкой молекулярной массы. Сходство ГК целинной и пахотной почвы обусловлено практически одинаковым набором факторов

почвообразования, различия – интенсивностью антропогенного воздействия и случайностью сочетания факторов.

Система удобрения и насыщенность (доза) пашни удобрениями оказали влияние на элементный состав ГК, соотношения H:C, O:C и C:N и степень окисленности, интенсивность валентных колебаний группировок в ИК-спектрах. По данным элементного состава и ИК- спектроскопии 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 органического вещества. При внесении минеральных удобрений (NPK) отмечено преобладание структурных фрагментов алифатической природы. Однако при длительном внесении высокой дозы $(NPK)_{150}$ состав ОВ характеризуется большим 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 азота в почве, его запасы, формы и подвижность в существенной степени определяют плодородие почвы и урожайность сельскохозяйственных культур. Органическое вещество – основной резерв и источник азотного питания растений. Более 90 % азота в почве представлено органической формой, в то время как органический фосфор составляет 30-50 % от валового, а весь калий почвы представлен минеральной формой (Лыков и др., 2004; Сычёв и др., 2009). В связи с этим изучение запасов и форм азота неразрывно связано с изучением органического вещества почв. В естественных условиях почва, как саморегулирующаяся система, сохраняет сбалансированный цикл азота. Отчуждение с растительной продукцией в агроэкосистемах азота из почвы нарушает его круговорот, что делает необходимым восполнение возникающего дефицита через удобрения (Гомонова, Минеев, 2012; Алфёров, 2020).

Общее содержание азота ($N_{общ}$) в целинной дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве в слое 0-20 см составило 1490 (±130) мг/кг (рис. 17). Степень обогащённости органического вещества азотом высокая: C:N – 8 (табл. 17). Общие запасы азота в верхнем слое составили 3,4 т/га (почти 40 % от его запасов в метровом слое). В пахотной почве при экстенсивном возделывании сельскохозяйственных культур наблюдали более низкое содержание общего азота. Его количество зависело от погодных условий вегетационного периода, условий минерализации органического вещества, возделываемой культуры. Общее содержание азота на конец ротации полевых севооборотов (овёс – *опыты 1 и 3*, ячмень – *опыт 2*) было на 18-23 % ниже, чем в целинной почве. Общие запасы азота уменьшились в среднем на 0,4 т/га. Также наблюдали снижение степени обогащённости органического вещества азотом. Изменения в пахотной почве связаны с длительным возделыванием сельскохозяйственных культур, выносом азота

из почвы, минерализацией и потерей ОВ почвы, припахиванием нижележащих горизонтов. В более глубоких слоях почвы содержание общего азота было близким к целинному аналогу.

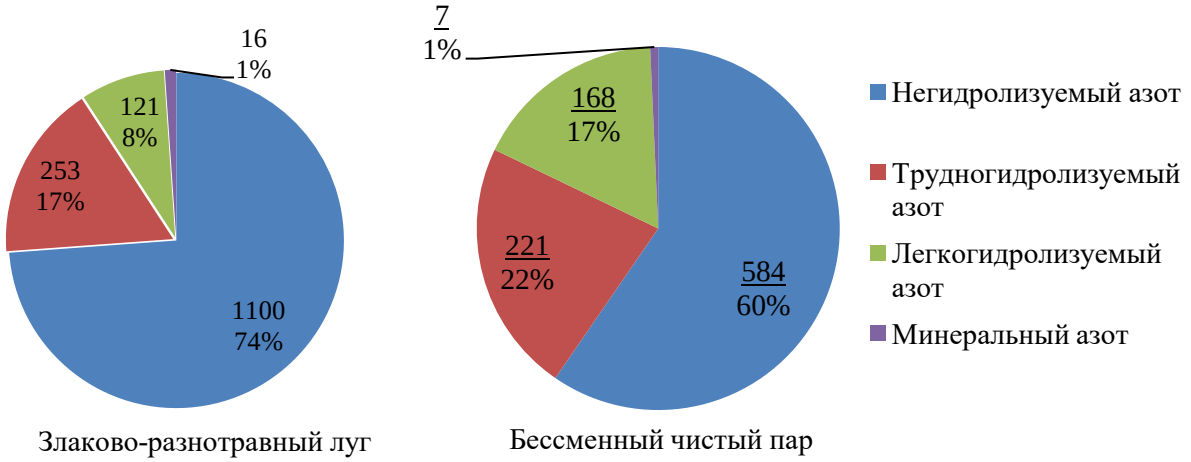


Рисунок 17 - Азотный фонд почвы злаково-разнотравного луга и бессменного чистого пара, мг/кг (% от общего содержания)

Таблица 17 - Запасы общего азота и его фракций в дерново-подзолистой почве, т/га

Вариант	$N_{общ}$	$N_{нг}$	$N_{тг}$	$N_{лг}$	$N_{мин}$	C:N	$N_{общ}$	$N_{нг}$	$N_{тг}$	$N_{лг}$	$N_{мин}$
	0-20						0-100				
Злаково-разнотравный луг	3,4±0,3	2,5±0,2	0,6±0,1	0,3±0,1	0,04±0,01	8	9,2±0,4	6,2±0,6	1,9±0,2	0,8±0,1	0,12±0,01
Полевой севооборот(без удобрений)	3,0*±0,2	2,1±0,2	0,6±0,2	0,3±0,1	0,05±0,03	10	10,1±0,5**	5,9±0,8	2,9±0,7	1,1±0,2	0,25±0,02
Бессменный чистый пар	2,5±0,2	1,5±0,2	0,6±0,1	0,4±0,1	0,02±0,01	8	-	-	-	-	-

*– усреднённые данные контрольных вариантов опытов 1-3; ** - данные опыта 3.

Минимальное содержание общего азота наблюдали в бессменном чистом пару – 980 (±90) мг/кг. Бессменное парование в течение 45 лет привело к потере относительно целинного аналога 35% общего азота почвы. Запасы уменьшились на 0,9 т.

Фракция негидролизуемого азота ($N_{нг}$), представленная более стойкими к гидролизу и микробиологическому разложению органическими азотсодержащими соединениями, необменным аммонием, составила

большую часть валовых запасов азота целинной почвы - 74 %. На втором месте находится трудногидролизуемая ($N_{тг}$) – 17 % и на третьем легкогидролизуемая фракция ($N_{лг}$) – 8 %. Суммарное содержание легко- и трудногидролизуемого азота представляет собой гидролизуемый азот почвы, который может служить источником пополнения запасов его минеральных форм. Доля минеральной фракции ($N_{мин}$) составила всего 1 %. Результаты согласуются с данными, полученными при изучении дерново-подзолистых почв Предуралья В.П. Дьяковым (1971), Л.К. Юферовой (1969), А.С. Пискуновым (1994).

В результате длительного экстенсивного возделывания культур в севообороте отмечены тенденции к увеличению в почве (0-20 см) доли гидролизуемых (в среднем с 25 до 29 %) и снижению доли негидролизуемых соединений азота (в среднем с 74 до 68 %). Максимальную интенсивность данных изменений наблюдали при бессменном паровании почвы.

Абсолютное количество всех фракций азота в почве злаково-разнотравного луга находилось в прямой зависимости от общего содержания элемента и вниз по профилю почвы постепенно уменьшалось (табл. 18).

Таблица 18 - Азотный фонд дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы под злаково-разнотравным лугом

Злаково-разнотравный луг	Общий азот, мг/кг	Негидро-лизуемый азот	Трудногидро-лизуемый азот	Легко-гидролизуемый азот	Минеральный азот
A_1 (0-22 см)	1490	1100 74	253 17	121 8	16 1
A_2B (22-28 см)	1064	766 72	189 18	93 9	17 2
B_1 (28-76 см)	560	352 63	141 25	59 11	8 1
B_2 (76-105 см)	518	325 63	133 26	51 10	9 2
B_2C (105-127 см)	560	370 66	130 23	52 9	8 1
C (от 127 см)	574	367 64	147 26	41 7	19 3

Длительное экстенсивное возделывание сельскохозяйственных культур привело к повышению подвижности азотного фонда в метровом слое почвы, наблюдали снижение доли негидролизуемой фракции и увеличение доли гидролизуемой и минеральной фракции в сравнении с целинной почвой (табл. 29). При внесении удобрений отмечено как сдерживание данных процессов, так и усиление.

Исследования азотного режима почвы в *опыте 1* под разными культурами севооборота показали, что содержание общего азота и его фракционный состав зависел от возделываемой культуры (рис. 18).

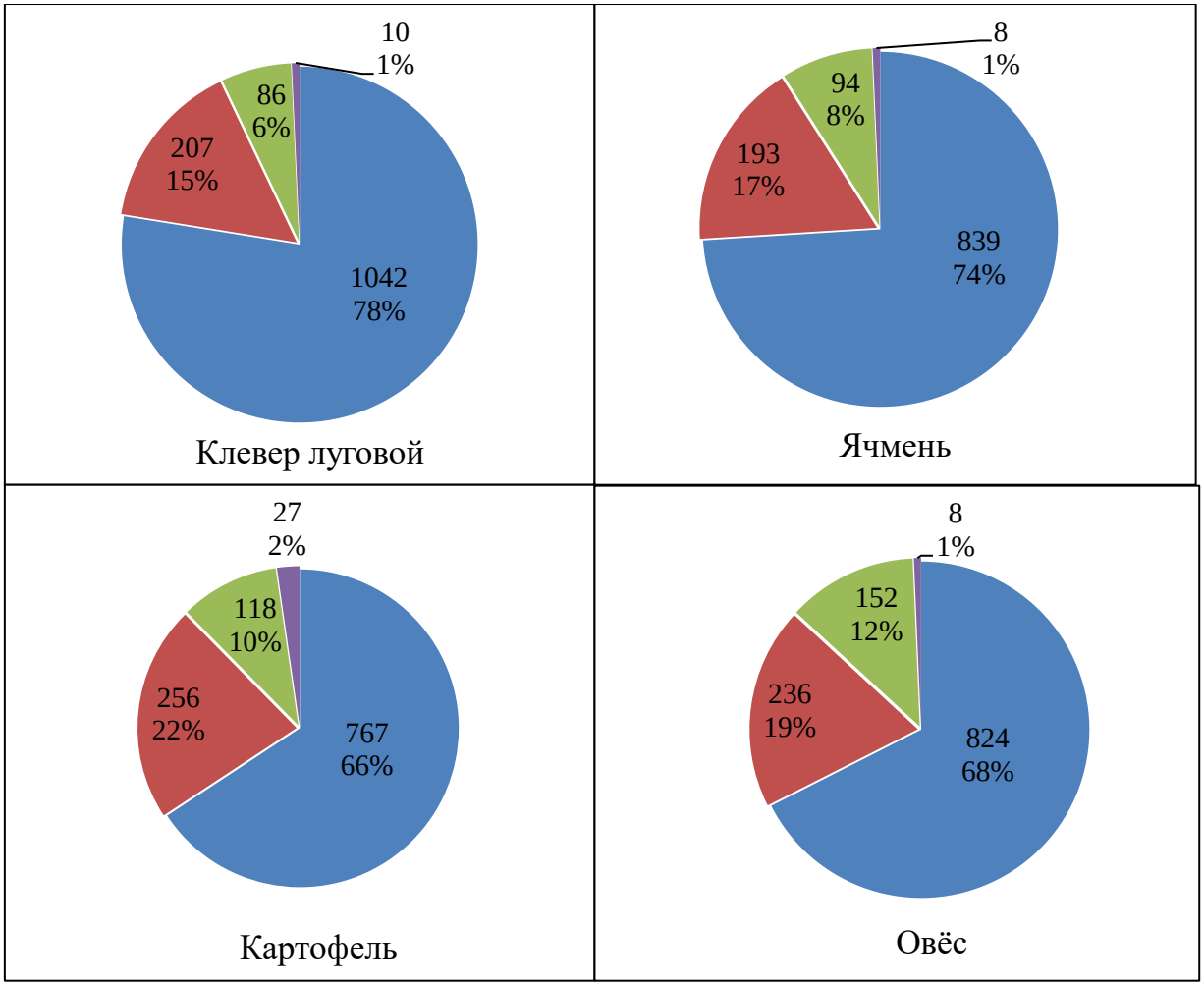


Рисунок 18 - Азотный фонд дерново-подзолистой почвы под различными сельскохозяйственными культурами, мг/кг (%), 2013-2017 гг. *(опыт 1)*

Максимальное содержание общего азота в почве контрольного варианта отмечено под клевером луговым - 1344 мг/кг. Также здесь наблюдали наиболее высокое содержание негидролизуемой фракции азота.

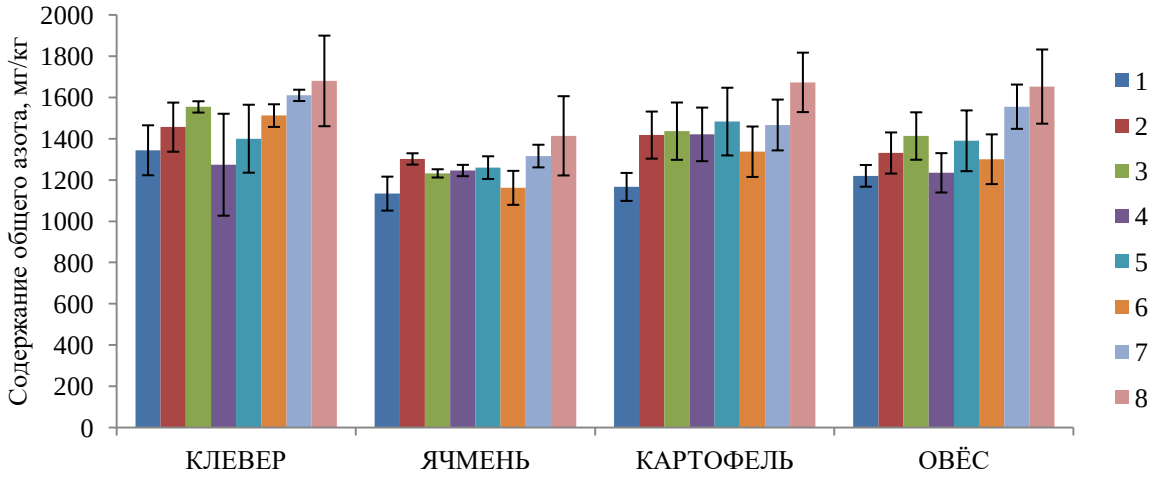
Возделывание клевера лугового в полевых севооборотах – важный фактор повышения плодородия почвы (Лыскова и др., 2019; Налиухин, Рыжакова, 2021). Поступление ОВ с пожнивно-корневыми остатками клевера, накопление биологического азота, а также отсутствие механизированной обработки почвы в течение двух лет способствовало поддержанию и стабилизации азотного режима, соотношение фракций азота в почве было наиболее близким к целинной почве. По данным Н.М. Пьянковой (2007) в условиях Предуралья после механизированной уборки клевера лугового 2 г.п. в почву поступало до 20 т/га пожнивно-корневых остатков и 300 кг/га азота. Считается, что многолетние бобовые культуры оказывают более сильное влияние на плодородие почвы, чем органические удобрения.

Распашка пласта клевера и возделывание ярового ячменя привели к уменьшению содержания общего азота в почве до 1134 мг/кг за счёт фракции негидролизуемого азота. Её количество снизилось с 1042 мг/кг под клевером до 839 мг/кг под ячменём (на 20 %).

Под картофелем наблюдали минимальное содержание негидролизуемого азота. Также существенно возросло количество минерального и легкогидролизуемого азота. Рыхление междурядий создавало благоприятные условия для минерализации ОВ и способствовало усилению процессов нитрификации в почве. Под картофелем содержание минерального азота было в 3 раза выше, чем под зерновыми культурами и клевером.

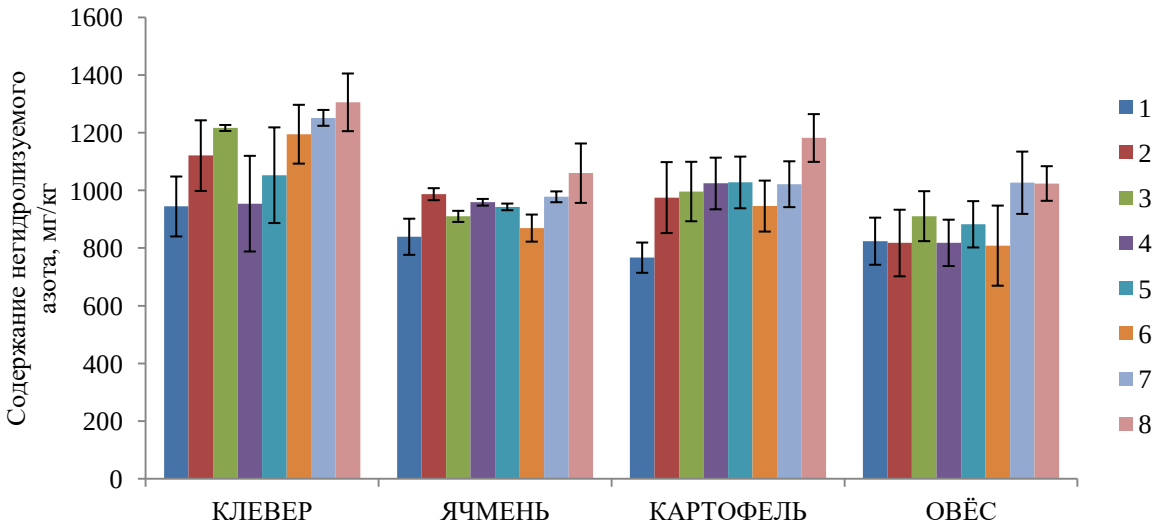
В вариантах с удобрениями под клевером и ячменём относительно контроля в почве отмечено более высокое содержания общего азота, увеличение произошло за счёт негидролизуемой формы. При этом под клевером луговым наибольшее положительное влияние проявилось при органической и органоминеральной системах удобрения. Все системы удобрений были эффективны на ячмене. Чётких закономерностей не выявлено по изменению содержания в почве форм трудногидролизуемого, легкогидролизуемого и минерального азота. Соотношение форм азота в

почве соответствовало контрольному варианту. Это может быть связано с бóльшим положительным влиянием на азотный режим почвы клевера лугового, чем удобрений (рис. 19-23).



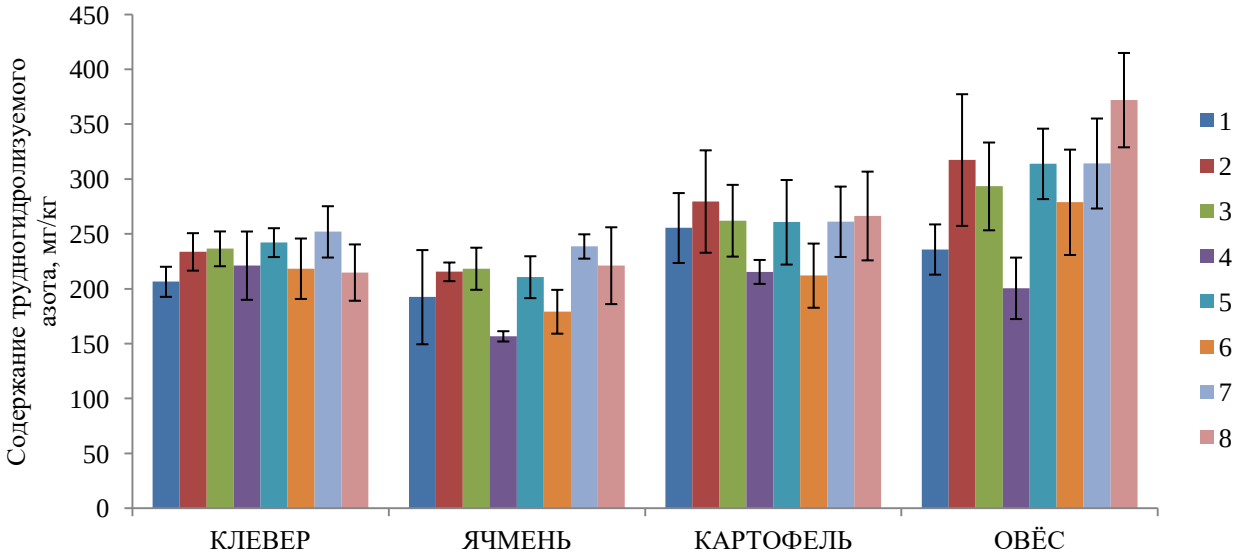
1 - без удобрений; 2 - навоз 10 т/га; 3 - навоз 20 т/га; 4 - NPK экв. 10 т навоза; 5 - NPK экв. 20 т навоза; 6 - навоз 5 т+NPK экв.; 7 - навоз 10 т + NPK экв.; 8 - навоз 20 т + NPK экв.

Рисунок 19 - Содержание общего азота в почве при длительном применении различных систем удобрения (0-20 см), мг/кг, 2013-2017 гг. *(опыт 1)*



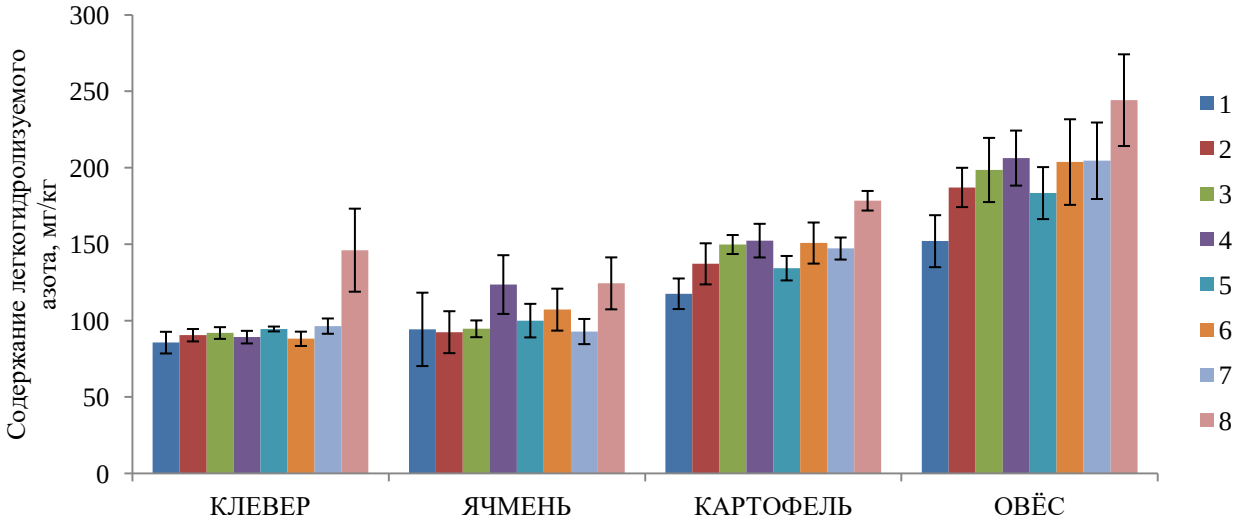
1 - без удобрений; 2 - навоз 10 т/га; 3 - навоз 20 т/га; 4 - NPK экв. 10 т навоза; 5 - NPK экв. 20 т навоза; 6 - навоз 5 т+NPK экв.; 7 - навоз 10 т + NPK экв.; 8 - навоз 20 т + NPK экв.

Рисунок 20 - Содержание негидролизуемого азота в почве при длительном применении различных систем удобрения (0-20 см), мг/кг, 2013-2017 гг. *(опыт 1)*



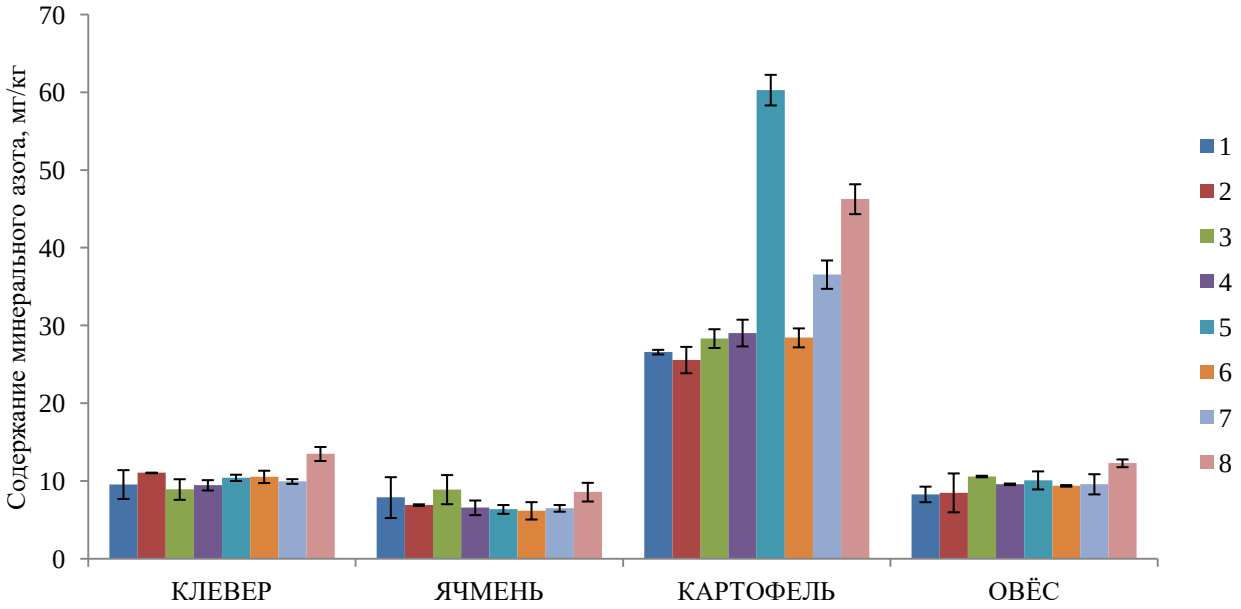
1 - без удобрений; 2 - навоз 10 т/га; 3 - навоз 20 т/га; 4 - NPK экв. 10 т навоза; 5 - NPK экв. 20 т навоза; 6 - навоз 5 т+NPK экв.; 7 - навоз 10 т + NPK экв.; 8 - навоз 20 т + NPK экв.

Рисунок 21 - Содержание трудногидролизуемого азота в почве при длительном применении различных систем удобрения (0-20 см), мг/кг, 2013-2017 гг. *(опыт 1)*



1 - без удобрений; 2 - навоз 10 т/га; 3 - навоз 20 т/га; 4 - NPK экв. 10 т навоза; 5 - NPK экв. 20 т навоза; 6 - навоз 5 т+NPK экв.; 7 - навоз 10 т + NPK экв.; 8 - навоз 20 т + NPK экв.

Рисунок 22 - Содержание легкогидролизуемого азота в почве при длительном применении различных систем удобрения (0-20 см), мг/кг, 2013-2017 гг. *(опыт 1)*



1 - без удобрений; 2 - навоз 10 т/га; 3 - навоз 20 т/га; 4 - NPK экв. 10 т навоза; 5 - NPK экв. 20 т навоза; 6 - навоз 5 т+NPK экв.; 7 - навоз 10 т + NPK экв.; 8 - навоз 20 т + NPK экв.

Рисунок 23 - Содержание минерального азота в почве при длительном применении различных систем удобрения (0-20 см), мг/кг, 2013-2017 гг. *(опыт 1)*

Внесение органических и минеральных удобрений под картофель способствовало увеличению содержанию общего азота в 1,1-1,4 раза прямо пропорционально росту насыщенности пашни удобрениями. Отмечено достоверное повышение негидролизуемой и легкогидролизуемой форм азота во всех вариантах опыта. В варианте «NPK эквивалентно 20 т навоза» наблюдали максимальное накопление минеральной формы азота, как относительно контроля, так и варианта «навоз 20 т/га в год».

Более полно оценить эффективность применения всех изучаемых систем удобрений на азотный режим почвы можно только после овса, замыкающей культуры севооборота. Достоверное повышение (в 1,1-1,6 раз) в почве содержания общего азота и всех его форм в сравнении с контролем отмечено в вариантах «навоз 20 т/га в год», «NPK эквивалентно 20 т навоза» и «навоз 10 и 20 т/га в год + NPK эквивалентно навозу» (табл. 19). Запасы общего азота в пахотном слое почвы возросли на 0,5-1,2 т/га (табл. 20). Интенсивность баланса азота в данных вариантах составила 113-193 %.

Таблица 19 - Влияние длительного применения различных систем удобрений на азотный режим дерново-подзолистой почвы (0-20 см) (VI ротация, среднее по двум закладкам, 2016-2017 гг.) *(опыт 1)*

Вариант	Общий азот, мг/кг	Негидролизуемый азот	Трудногидролизуемый азот	Легкогидролизуемый азот	Минеральный азот	C:N
		мг/кг (%)				
Без удобрений	1220	824 68	236 19	152 12	8 1	9
Навоз 10 т/га	1331	818 61	317 24	187 14	9 1	10
Навоз 20 т/га	1413	911 64	293 21	199 14	11 1	10
NPK экв. 10 т навоза	1235	818 66	201 16	206 17	10 1	10
NPK экв. 20 т навоза	1390	883 63	314 23	183 13	10 2	9
Навоз 5 т+NPK экв.	1301	809 62	279 21	204 16	9 1	10
Навоз 10 т + NPK экв.	1555	1027 66	314 20	205 13	10 1	9
Навоз 20 т + NPK экв.	1653	1024 62	372 23	244 15	12 1	9
$НСР_{05}$	168	59	57	30	2	-

Таблица 20 - Влияние длительного применения различных систем удобрений на запасы общего азота и его фракций в дерново-подзолистой почве (0-20 см), т/га (VI ротация, среднее по двум закладкам, 2016-2017 гг.) *(опыт 1)*

Вариант	Общий азот	Негидролизуемый азот	Трудногидролизуемый азот	Легкогидролизуемый азот	Минеральный азот
Без удобрений	3,1	2,1	0,6	0,4	0,02
Навоз 10 т/га	3,3	2,1	0,8	0,5	0,02
Навоз 20 т/га	3,7	2,4	0,8	0,5	0,03
NPK экв. 10 т навоза	3,1	2,1	0,5	0,5	0,02
NPK экв. 20 т навоза	3,6	2,3	0,8	0,5	0,03
Навоз 5 т+NPK экв.	3,3	2,1	0,7	0,5	0,02
Навоз 10 т + NPK экв.	4,0	2,7	0,8	0,5	0,02
Навоз 20 т + NPK экв.	4,3	2,7	1,0	0,6	0,03
$НСР_{05}$	0,4	0,2	0,1	0,1	0,01

Содержание и запасы общего азота в почве (0-20 см) в вариантах «навоз 20 т/га в год», «NPK эквивалентно 20 т навоза» и «навоз 10 и 20 т/га в год + NPK эквивалентно навозу» находятся на уровне целинного аналога или выше. Применение всех систем удобрений обеспечило существенное

увеличение в почве легкогидролизуемой фракции азота - в 1,2-1,6 раза относительно контроля и в 1,4-1,9 раза относительно целинного аналога.

Если после картофеля при внесении навоза происходило увеличение в большей степени негидролизуемых соединений азота, то на второй год после внесения (под овсом) наблюдали снижение их содержания и увеличение количества гидролизуемых форм азота. Особенно быстро этот процесс происходил при более низкой насыщенности пашни навозом - в вариантах «навоз 10 т/га в год» и «навоз 5 т/га + NPK эквивалентно навозу».

Длительное применение различных систем удобрения оказало существенное влияние на изменение содержания минерального азота в метровом слое почвы (табл. 21). Характер распределения аммонийного и нитратного азота по профилю почвы сильно зависит от постоянно протекающих в почве процессов аммонификации, нитрификации, денитрификации и иммобилизации азота, которые для каждого горизонта отличаются своей интенсивностью и направленностью. В почве постоянно происходит перераспределение значительной части $N_{мин}$ по слоям, что усложняет получение чёткой картины при изучении изменения содержания минерального азота. Однако выявить общие закономерности вполне возможно.

В большей степени во всех вариантах отмечены достоверные изменения в верхнем слое почвы 0-40 см и в слое 80-100 см. На данном почвенном участке, на глубине 70-100 см находится горизонт В или горизонт вмывания, возможно, поэтому здесь наблюдается накопление минерального азота. В слое 80-100 см установлено накопление аммонийного азота при использовании органической, минеральной и органоминеральной систем удобрения, нитратного – только при минеральной и органоминеральной. Увеличение количества минерального азота в слое 80-100 см может быть связано с изменением направления почвенных процессов в результате длительного внесения удобрений и перераспределения азота из одной формы в другую.

Таблица 21 - Изменение содержания минерального азота по профилю почвы при длительном применении различных систем удобрения (VI ротация, среднее по двум закладкам, 2016-2017 гг.) *(опыт 1)*

Вариант	Содержание, мг/кг					Запасы, кг/га		
	0-20	20-40	40-60	60- 80	80-100	0-20	0-40	0-100
$N_{мин}$								
Без удобрений	12,8	11,4	13,5	13,0	10,9	33	64	179
Навоз 10 т/га	14,2	17,8	15,8	11,0	17,0	37	85	219
Навоз 20 т/га	16,7	11,7	15,8	15,0	19,4	43	75	229
NPK экв. 10 т навоза	18,9	11,6	13,9	16,7	21,7	49	80	242
NPK экв. 20 т навоза	19,7	19,0	17,5	12,1	19,1	51	103	252
Навоз 5 т+NPK экв.	16,5	15,3	16,9	12,5	12,5	43	84	212
Навоз 10 т + NPK экв.	22,2	16,6	14,7	11,9	18,1	58	103	240
Навоз 20 т + NPK экв.	17,0	23,0	22,4	19,3	18,1	44	106	289
$НСР_{05}$	3,8	4,9	4,5	6,0	5,8	10	20	41
$N\text{-}NO_3$								
Без удобрений	1,1	1,7	0,9	1,0	0,8	3	8	16
Навоз 10 т/га	1,2	1,9	1,0	0,9	0,9	3	8	17
Навоз 20 т/га	3,3	3,1	1,5	1,1	0,9	8	17	27
NPK экв. 10 т навоза	1,0	3,7	3,5	3,6	3,8	3	13	46
NPK экв. 20 т навоза	2,8	1,9	1,2	1,5	3,9	7	12	33
Навоз 5 т+NPK экв.	2,4	1,7	1,4	1,2	1,3	6	11	23
Навоз 10 т + NPK экв.	2,8	3,5	2,1	2,1	3,2	7	17	39
Навоз 20 т + NPK экв.	2,3	4,7	2,9	3,1	3,9	6	19	49
$НСР_{05}$	1,2	1,8	1,2	1,1	1,0	3	5	16
$N\text{-}NH_4$								
Без удобрений	11,7	9,7	12,6	12,0	10,1	30	57	163
Навоз 10 т/га	13,0	15,9	14,8	10,1	16,0	34	77	202
Навоз 20 т/га	13,5	8,6	14,3	13,9	18,4	35	58	202
NPK экв. 10 т навоза	17,9	7,9	10,4	13,1	17,9	47	68	196
NPK экв. 20 т навоза	16,9	17,1	16,3	10,6	15,2	44	90	219
Навоз 5 т+NPK экв.	14,1	13,6	15,5	11,3	11,2	37	73	189
Навоз 10 т + NPK экв.	19,4	13,1	12,6	9,8	14,9	51	86	201
Навоз 20 т + NPK экв.	14,7	18,4	19,6	16,2	14,3	38	88	240
$НСР_{05}$	2,8	5,1	3,5	3,1	2,8	10	25	38

Повышение содержания минерального азота по всему метровому слою почвы в 1,3-2,0 раза отмечено при максимальной насыщенности пашни удобрениями в варианте «навоз 20 т/га + NPK эквивалентно навозу», накопление минерального азота происходило, как за счёт нитратной, так и аммонийной формы азота. Запасы в слое почвы 0-100 см увеличились со 179 до 289 кг/га. Также в отдельных вариантах с минеральной и органоминеральной системах установлено увеличение по всему метровому слою содержания нитратного азота.

На изменение содержания нитратного и аммонийного азота в почве влияла насыщенность пашни удобрениями. При рассмотрении минеральной системы удобрения в варианте «NPK эквивалентно 10 т/га навоза» наблюдали накопление по профилю почвы нитратной формы азота, в варианте «NPK эквивалентно 20 т/га навоза» – в большей степени аммонийной.

По данным Окоркова В.В. (2021) на почвах с повышенной ёмкостью катионного обмена аммонийный азот прочно связан с почвенно-поглощающим комплексом и имеет низкую степень перехода в жидкую фазу (водную вытяжку 1:1). Автор говорит об определяющей роли в питании растений и продуктивности сельскохозяйственных культур на таких почвах нитратного азота, накапливающегося в ранний период вегетации культур. По результатам наших исследований вносимые минеральные удобрения перед посевом обеспечивали более высокие запасы нитратного азота в почве, что может быть одной из причин наиболее высокой эффективности влияния на урожайность культур минеральной и органоминеральной систем удобрений в опыте в сравнении с органической (табл. 22). Достоверные высокие корреляционные связи между продуктивностью яровой пшеницы и запасами нитратного азота в почве отмечены в фазу кущения (r=0,8) и перед уборкой (r=0,9). Между продуктивностью культуры и запасами аммонийного азота установлены очень слабые и слабые корреляционные связи во все фазы развития культуры (r=0,1-0,4), однако они были не достоверны.

Таблица 22 - Влияние длительного применения удобрений на динамику запасов нитратного и аммонийного азота по фазам развития растений яровой пшеницы (0-20 см), кг/га (VII ротация, 2019-2020 гг.) *(опыт 1)*

Вариант	$N\text{-}NO_3$	$N\text{-}NH_4$	$N\text{-}NO_3$	$N\text{-}NH_4$	$N\text{-}NO_3$	$N\text{-}NH_4$
	кущение		колошение		перед уборкой	
Без удобрений	6,0	43,0	5,5	27,5	13,0	56,0
Навоз 10 т/га	9,0	36,0	6,0	33,0	19,0	67,0
Навоз 20 т/га	9,0	35,5	5,0	46,5	20,0	70,0
NPK экв. 10 т навоза	10,0	39,5	4,8	35,0	20,0	45,0
NPK экв. 20 т навоза	24,0	54,5	6,5	43,5	25,5	58,5
Навоз 5 т+NPK экв.	10,5	40,0	6,3	32,0	27,5	53,5
Навоз 10 т + NPK экв.	18,0	40,0	6,3	42,5	30,0	74,5
Навоз 20 т + NPK экв.	29,5	51,0	10,5	30,5	26,0	64,0
$НСР_{05}$	3,5	4,5	1,0	8,0	4,0	Fф<Fт

Длительное применение азотных удобрений в *опыте 2*, как при одностороннем внесении (N_{90}), так и в сочетании с калием хлористым и суперфосфатом ($(NK)_{90}$, $(NP)_{90}$) привело к увеличению относительно контрольного варианта общего содержания азота в почве на 10-20 % и его минеральной фракции – в 1,7-2,7 раза (табл. 23, 24).

Таблица 23 - Влияние длительного применения минеральных удобрений на азотный режим дерново-подзолистой почвы (0-20 см) (V ротация, среднее по двум закладкам, 2016-2018 гг.) *(опыт 2)*

Вариант	Общий азот, мг/кг	Негидролизуемый азот	Трудногидролизуемый азот	Легкогидролизуемый азот	Минеральный азот	C:N
		мг/кг (%)				
Без удобрений	1148	757 / 66	225 / 20	139 / 12	27 / 2	10
N_{90}	1323	856 / 65	231 / 17	178 / 13	58 / 4	8
P_{90}	1255	808 / 64	259 / 21	162 / 13	26 / 2	10
K_{90}	1283	915 / 71	202 / 16	148 / 12	18 / 1	10
$(NP)_{90}$	1267	829 / 65	221 / 17	145 / 11	72 / 6	10
$(NK)_{90}$	1330	875 / 66	242 / 18	169 / 13	45 / 3	9
$(PK)_{90}$	1071	682 / 64	239 / 22	125 / 12	25 / 2	10
$(NPK)_{90}$	1432	969 / 68	237 / 17	158 / 11	68 / 5	8
$НСР_{05}$	119	113	Fф<Fт	Fф<Fт	18	-

Таблица 24 - Влияние длительного применения минеральных удобрений на запасы общего азота и его фракций в дерново-подзолистой почве (0-20 см), т/га (V ротация, среднее по двум закладкам, 2016-2018 гг.) *(опыт 2)*

Вариант	Общий азот	Негидролизуемый азот	Трудногидролизуемый азот	Легкогидролизуемый азот	Минеральный азот
Без удобрений	3,0	2,0	0,6	0,4	0,07
N_{90}	3,3	2,2	0,6	0,5	0,15
P_{90}	3,1	2,1	0,7	0,4	0,07
K_{90}	3,2	2,3	0,5	0,4	0,05
$(NP)_{90}$	3,2	2,2	0,6	0,4	0,19
$(NK)_{90}$	3,3	2,3	0,6	0,4	0,12
$(PK)_{90}$	2,7	1,8	0,6	0,3	0,07
$(NPK)_{90}$	3,6	2,5	0,6	0,4	0,18
$НСР_{05}$	0,3	0,2	Fф<Fт	Fф<Fт	0,05

Также содержание общего азота (за счёт негидролизуемой фракции) было достоверно выше контрольного варианта (на 12 %) при длительном внесении калийных удобрений в чистом виде ($К_{90}$). В состав негидролизуемой фракции азота входит необменный аммоний.

Фиксированный (необменный) аммоний поглощается глинистыми минералами с трёхслойной кристаллической решёткой, особенно вермикулитом. В почвах аммоний может быть естественно фиксированный и фиксированный при внесении удобрений, последний считается более доступным для растений, чем первый (Шилова, 1969; Могилевкина, 1970, 1973, Минеев, 2004). Особенности влияния калийного режима почвы на процессы накопления и закрепления необменного аммонийного азота в почве отражены в работах И.А. Могилевкиной (1973), Е.И. Шиловой (1982), В.Н. Якименко (2008; 2010; 2012). Высокое содержание калия в почве приводит к блокированию потребления фиксированного аммония.

Достоверное увеличение негидролизуемой фракции азота в опыте также отмечено при внесении азотно-калийных удобрений. Интересен тот факт, что в данном варианте содержание минерального азота в почве по сравнению с внесением азотно-фосфорных удобрений было достоверно ниже, что является ещё одним возможным доказательством закрепления аммония в необменной форме при внесении калийных удобрений.

Максимальное увеличение содержания общего азота в почве, в т.ч. его негидролизуемой фракции, отмечено при длительном внесении полного минерального удобрения $(NPK)_{90.}$ Поддержание содержания (запасов) общего азота на уровне целинной почвы наблюдали только при использовании полного минерального удобрения, хотя интенсивность баланса азота в вариантах N_{90}, $(NK)_{90}$, $(NP)_{90}$, $(NPK)_{90}$ была одинаковой - 95-97 %.

Изучение влияния возрастающих доз полного минерального удобрения показало, что их длительное внесение в дозе от 60 до 150 кг д.в. каждого элемента питания/га способствовало достоверному увеличению

(относительно контрольного варианта) в почве содержания общего азота и всех его фракций (табл. 25).

Таблица 25 - Влияние длительного применения минеральных удобрений на азотный режим дерново-подзолистой почвы (0-20 см) (V ротация, 2011-2012 гг.) *(опыт 2)*

Вариант	Общий азот, мг/кг	Негидролизуемый азот	Трудногидролизуемый азот	Легкогидролизуемый азот	Минеральный азот	C:N
		мг/кг (%)				
Без удобрений	1116	818 73	192 17	86 8	20 2	10
$(NPK)_{30}$	1212	908 75	171 14	95 8	38 3	9
$(NPK)_{60}$	1380	968 70	213 15	132 10	67 5	9
$(NPK)_{90}$	1487	1036 70	213 14	158 11	80 5	8
$(NPK)_{120}$	1610	1167 73	221 14	137 9	84 5	8
$(NPK)_{150}$	1760	1262 72	242 14	148 8	108 6	6
$НСР_{05}$	148	105	20	35	22	-

Количество общего азота увеличилось в 1,2-1,6, негидролизуемого в 1,2-1,5, трудногидролизуемого в 1,1-1,3, легкогидролизуемого в 1,5-1,8 и минерального в 3,3-5,3 раза. Абсолютное содержание фракций азота возрастало с увеличением дозы минерального удобрения. Максимальное накопление общего азота и всех его фракций отмечено в варианте $(NPK)_{150}$. Степень обогащенности азотом органического вещества повысилась и в вариантах $(NPK)_{90-150}$ перешла в разряд высокой (C:N -6-8). Запасы общего азота в пахотном слое почвы при внесении $(NPK)_{60-150}$ повысились с 2,8 т/га (контрольный вариант) до 3,4-4,4 т/га (табл. 26).

Внесение полного минерального удобрения $(NPK)_{90}$ способствовало поддержанию содержания (запасов) общего азота на уровне целинной почвы (слой 0-20 см), при повышении дозы $(NPK)_{120-150}$ наблюдали существенное превышение. Интенсивность баланса азота в вариантах $(NPK)_{90-150}$ составила 95-135 %, в вариантах $(NPK)_{30-60}$ – 51-73 %.

Таблица 26 - Влияние длительного применения возрастающих доз полного минерального удобрения на запасы общего азота и его фракций в дерново-подзолистой почве (0-20 см), т/га (V ротация, 2011-2012 гг.) *(опыт 2)*

Вариант	Общий азот	Негидро-лизуемый азот	Трудногидро-лизуемый азот	Легко-гидролизуемый азот	Минеральный азот
Без удобрений	2,8	2,1	0,5	0,2	0,05
$(NPK)_{30}$	3,0	2,4	0,4	0,2	0,10
$(NPK)_{60}$	3,4	2,5	0,6	0,3	0,17
$(NPK)_{90}$	3,7	2,7	0,6	0,4	0,21
$(NPK)_{120}$	4,0	3,0	0,6	0,4	0,22
$(NPK)_{150}$	4,4	3,3	0,6	0,4	0,28
$НСР_{05}$	0,4	0,3	0,1	0,1	0,06

Длительное применение азотных удобрений (N_{90}, $(NK)_{90}$, $(NP)_{90}$, $(NPK)_{90}$) способствовало существенному накоплению минерального азота в почве, отмечено увеличение доли минерального азота в составе общего в слое 0-20 см до 3-6 %. Различное сочетание N, P, K по-разному влияло на количественные изменения и глубину миграции минерального азота (табл. 27). Длительное внесение азотных удобрений (N_{90}) увеличило содержание нитратного азота в почве по всему метровому слою в 1,5-2,5 раза, аммонийного – в 1,5-14,6 раза, в сумме минерального – в 1,8-5,9 раза. Запасы минерального азота в почве в слое 0-20 см выросли в 2 раза, слое 0-100 см - почти в 3 раза.

Накопление минерального азота в почве в вариантах $(NP)_{90}$, $(NK)_{90}$ и $(NPK)_{90}$ проходило с меньшей интенсивностью. При внесении $(NP)_{90}$ отмечено достоверное увеличение в метровом слое почвы только нитратной формы азота. В варианте $(NK)_{90}$ накопление минерального азота за счёт обеих его форм отмечено в слое 0-40 см, $(NPK)_{90}$ – в слое 0-60 см. Запасы минерального азота в вариантах $(NP)_{90}$, $(NK)_{90}$ и $(NPK)_{90}$ в слое 0-20 см увеличились в 2-3 раза, в слое 0-100 см – в 2 раза. Максимальное накопление минерального азота в пахотном слое почвы наблюдали при внесении полного минерального удобрения $(NPK)_{90}$.

Таблица 27 - Изменение содержания минерального азота по профилю почвы при длительном применении минеральных удобрений (VI ротация, 2021 г.) *(опыт 2)*

Вариант	Содержание, мг/кг					Запасы, кг/га		
	0-20	20-40	40-60	60- 80	80-100	0-20	0-40	0-100
$N_{мин}$								
Без удобрений	10,3	7,7	5,1	4,5	3,9	27	47	89
N_{90}	20,3	13,5	11,2	26,6	11,9	53	89	242
P_{90}	10,0	10,1	5,4	10,9	4,3	26	53	117
K_{90}	7,8	8,3	5,0	4,6	5,4	20	43	89
$(NP)_{90}$	21,4	13,6	9,3	7,8	12,9	56	92	185
$(NK)_{90}$	18,6	24,4	7,6	6,5	6,5	48	114	177
$(PK)_{90}$	8,3	6,4	4,9	4,9	6,3	22	39	88
$(NPK)_{90}$	29,9	11,8	10,0	6,8	6,2	78	110	179
$(NPK)_{30}$	12,9	8,1	8,7	6,6	11,3	34	56	137
$(NPK)_{60}$	17,8	19,8	11,0	8,5	12,4	46	100	198
$(NPK)_{120}$	45,2	26,3	17,8	16,4	19,2	117	189	352
$(NPK)_{150}$	59,1	31,8	17,0	16,1	17,6	154	219	375
$НСР_{05}$	8,3	5,8	3,2	9,0	3,6	20	38	53
$N\text{-}NO_3$								
Без удобрений	5,0	5,3	4,0	3,0	2,6	13	27	57
N_{90}	12,3	8,1	6,4	5,4	5,2	32	54	106
P_{90}	4,0	3,8	2,7	2,3	2,1	10	21	42
K_{90}	3,9	3,0	1,4	1,3	1,6	10	18	31
$(NP)_{90}$	14,2	7,9	5,4	5,4	7,9	37	58	116
$(NK)_{90}$	10,7	6,8	4,0	3,8	3,8	28	46	82
$(PK)_{90}$	4,1	3,3	2,0	1,6	2,5	11	19	38
$(NPK)_{90}$	13,3	6,5	5,5	3,5	3,6	34	52	90
$(NPK)_{30}$	8,4	5,7	3,7	3,9	9,0	22	37	89
$(NPK)_{60}$	5,7	8,5	4,7	4,7	7,1	15	38	88
$(NPK)_{120}$	14,7	11,0	8,3	10,8	14,4	38	68	172
$(NPK)_{150}$	47,1	21,0	10,2	8,5	9,6	123	163	253
$НСР_{05}$	7,2	2,6	1,9	1,4	1,7	18	30	39
$N\text{-}NH_4$								
Без удобрений	5,3	2,4	1,1	1,5	1,3	14	20	32
N_{90}	8,0	5,4	4,8	21,2	6,7	21	35	136
P_{90}	6,0	6,3	2,8	8,6	2,2	16	33	74
K_{90}	3,8	5,3	3,6	3,3	3,8	10	24	57
$(NP)_{90}$	7,2	5,7	4,0	2,3	5,0	19	34	69
$(NK)_{90}$	7,9	17,7	3,6	2,7	2,7	21	68	96
$(PK)_{90}$	4,2	3,1	2,9	3,3	3,8	11	19	50
$(NPK)_{90}$	16,7	5,3	4,5	3,3	2,6	43	58	89
$(NPK)_{30}$	4,6	2,4	5,0	2,8	2,3	12	18	49
$(NPK)_{60}$	12,2	11,3	6,3	3,8	5,4	32	62	109
$(NPK)_{120}$	30,5	15,3	9,5	5,6	4,8	79	121	181
$(NPK)_{150}$	12,0	10,8	6,8	7,6	8,0	31	56	122
$НСР_{05}$	2,6	7,2	3,1	9,9	3,8	30	33	57

При длительном внесении $К_{90}$, $(РК)_{90}$ отмечено уменьшение содержания нитратного азота с глубины 40-60 см. Возможно, это связано с увеличением потребления нитратного азота растениями, что снизило его естественные потери в нижележащие слои почвы в сравнении с контрольным вариантом. По данным П.И. Анспок (1988) повышенные дозы калийных удобрений не сбалансированные с другими элементами питания способствовали накоплению в растениях нитратного азота. В работе (Якименко, 2012) отмечается, что оптимизация калийного состояния почвы приводила к усилению потребления растениями нитратов.

Длительное внесение NPK в возрастающих дозах от 30 до 150 кг каждого элемента питания/га повлияло на изменение содержания минерального азота в метровом слое почвы относительно контрольного варианта. Изменения зависели от дозы удобрения и интенсивности потребления азота растениями. При внесении $(NPK)_{30}$ наблюдали увеличение количества минерального азота в слоях 40-60 (в 1,7 раза) и 80-100 см (в 2,9 раза). В слое 40-60 см отмечено увеличение аммонийного азота, а в слое 80-100 см – нитратного. При внесении $(NPK)_{60}$ достоверное повышение минерального азота установлено в слоях 20-40 см, 40-60 и 80-100 см, в варианте $(NPK)_{90}$ - в слое 0-20 см и 40-60 см – в 1,5-3,0 раза. При этом наблюдали равномерное накопление, как нитратного, так и аммонийного азота. При внесении $(NPK)_{120}$ и $(NPK)_{150}$ увеличение количества минерального азота отмечено по всему метровому слою – в 3,3-5,7 раза. Следует отметить, что в данных вариантах по-разному протекали процессы аммонификации и нитрификации. При внесении $(NPK)_{120}$ наблюдали максимальное повышение в слое 0-40 аммонийной формы азота, а в варианте $(NPK)_{150}$ –нитратной формы азота. Запасы минерального азота в слое 0-40 см при внесении $(NPK)_{60\text{-}150}$ возросли в 2-5 раз (с 47 до 100-219 кг), в слое 0-100 в 2-4 раза (с 89 до 179-375 кг). При применении высоких доз $(NPK)_{120\text{-}150}$ происходит избыточное накопление нитратов и обменного аммония по профилю почвы, что может привести к загрязнению сопредельных сред.

В варианте без удобрений доля нитратного азота в составе минерального с глубиной возрастала, а аммонийного снижалась. Длительное применение удобрений привело к увеличению доли аммонийного азота с глубиной. Сохранение соотношения двух форм азота по профилю близкое к контрольному варианту отмечено только в варианте $(NPK)_{90}$.

В *опыте 3* провели исследования изменения общего содержания азота и его фракционного состава в метровом слое почвы. Результаты показали, что при длительном внесении ОСВ в течение пяти ротаций полевого севооборота содержание общего азота в пахотном слое почвы было на 20 % выше контрольного варианта, соответственно и его запасы увеличились на 0,5 т/га (табл. 28). Применение ОСВ достоверно повысило содержание в пахотном слое почвы негидролизуемых, трудногидролизуемых и минеральных соединений азота в 1,1-1,7 раза. Установлено, что длительное внесение ОСВ оказало существенное влияние только на пахотный слой почвы. Достоверных изменений изучаемых показателей в метровом слое почвы относительно контрольного варианта не выявлено.

При внесении навоза в дозе 40 т/га количество общего азота в пахотном слое почвы и его фракций сохранилось на уровне контрольного варианта. Отмечено только достоверное увеличение минеральной формы азота. В данном варианте наблюдали тенденции к снижению в почве содержания общего азота и его негидролизуемой формы в слоях 20-40 и 40-60 см, легкогидролизуемой формы – до глубины 80-100 см.

Известно, что использование навоза в невысоких дозах может способствовать ускоренной минерализации органического вещества в результате повышения микробиологической деятельности и привести к определённым потерям азота из 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.

Таблица 28 - Влияние длительного применения удобрений на изменение азотного режима почвы по профилю (V ротация, 2013 г.) *(опыт 3)*

Вариант	Содержание, мг/кг					Запасы, т/га		
	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100	0-20	0-40	0-100
Общий азот								
Без удобрений	1176	714	672	546	448	3,1	5,0	10,1
Навоз	1162	616	595	539	476	3,0	4,7	9,6
ОСВ	1372	812	693	672	567	3,6	5,8	11,7
NPK – фон	1281	882	707	609	567	3,3	5,7	11,5
Фон + навоз	1379	987	707	665	539	3,6	6,3	12,1
Фон + ОСВ	1435	968	728	588	507	3,7	6,3	11,9
$НСР_{05}$	92	137	64	Fф<Fт	Fф<Fт	0,2	0,5	0,8
Негидролизуемый азот								
Без удобрений	840	423	361	246	230	2,2	3,3	5,9
Навоз	823	328	259	245	277	2,1	3,0	5,4
ОСВ	928	501	309	367	367	2,4	3,8	7,0
NPK – фон	874	556	466	347	111	2,3	3,8	6,6
Фон + навоз	987	617	374	385	329	2,6	4,2	7,6
Фон + ОСВ	1005	626	424	252	193	2,6	4,3	6,9
$НСР_{05}$	87	84	Fф<Fт	Fф<Fт	Fф<Fт	0,3	0,4	1,0
Трудногидролизуемый азот								
Без удобрений	218	186	217	219	151	0,6	1,1	2,9
Навоз	214	188	252	218	134	0,6	1,1	2,9
ОСВ	308	209	288	222	127	0,8	1,4	3,3
NPK – фон	241	202	136	169	377	0,6	1,2	3,3
Фон + навоз	233	244	244	195	133	0,6	1,3	3,0
Фон + ОСВ	280	209	183	223	223	0,7	1,3	3,2
$НСР_{05}$	61	Fф<Fт	Fф<Fт	Fф<Fт	45	Fф<Fт	Fф<Fт	Fф<Fт
Легкогидролизуемый азот								
Без удобрений	96	85	74	65	58	0,25	0,48	1,08
Навоз	94	74	62	55	45	0,24	0,44	0,94
ОСВ	100	78	78	66	54	0,26	0,47	1,07
NPK – фон	135	99	80	73	60	0,35	0,62	1,27
Фон + навоз	119	98	62	57	53	0,31	0,57	1,10
Фон + ОСВ	126	110	95	89	63	0,33	0,62	1,38
$НСР_{05}$	10	11	6	8	Fф<Fт	0,03	0,04	0,11
Минеральный азот								
Без удобрений	21	21	20	16	9	0,05	0,11	0,25
Навоз	30	26	22	20	19	0,08	0,15	0,33
ОСВ	36	24	18	17	18	0,09	0,16	0,32
NPK – фон	32	26	25	21	20	0,08	0,15	0,36
Фон + навоз	39	28	27	28	24	0,10	0,18	0,42
Фон + ОСВ	31	23	26	24	28	0,08	0,14	0,38
$НСР_{05}$	8	Fф<Fт	Fф<Fт	Fф<Fт	11	0,02	0,04	0,10
C/N								
Без удобрений	10	7	6	6	6	-	-	-
Навоз	10	8	6	5	6	-	-	-
ОСВ	9	8	6	5	5	-	-	-
NPK – фон	9	8	6	5	6	-	-	-
Фон + навоз	9	8	5	5	5	-	-	-
Фон + ОСВ	9	11	7	6	6	-	-	-

Также ОСВ вносили в течение пяти ротаций, всего поступило в почву около 0,9 т азота, навоз в течение трёх ротаций – поступило 0,5 т азота.

Внесение минеральных удобрений (I ротация - $N_{120}P_{120}K_{120}$, II ротация - $N_{90}P_{90}K_{90}$, III-V ротации - $N_{60}P_{60}K_{60}$) повысило в почве содержание общего, негидролизуемого, легкогидролизуемого и минерального азота. Увеличение количества общего азота на 10-25 % относительно контрольного варианта отмечено в слое 0-40 см, негидролизуемой формы только в подпахотном слое на 32 %. Запасы общего азота в слое 0-40 возросли на 0,7 т/га. Повышение легкогидролизуемого азота наблюдали в слое 0-80 см, максимальное его увеличение (на 41%) отмечено в пахотном слое. Запасы легкогидролизуемого азота в слое почвы 0-20 см возросли на 40%, в слое 0-100 см – на 17%. Достоверное увеличение минеральной фракции азота установлено в слое почвы 0-20 см (в 1,5 раза) и 80-100 см (в 2,1 раза). Запасы минерального азота в пахотном и метровом слое почвы возросли на 40-50%.

При внесении минеральных удобрений по всему профилю наблюдали повышение $N\text{-}NO_3$ в 2-3 раза (на 0,1-0,3 мг/кг). Нитраты отличаются высокой подвижностью, в связи с чем, содержание их в почве подвержено большим колебаниям. Из пахотных горизонтов почв нитратный азот может вымываться атмосферными осадками в более глубокие слои (до грунтовых вод) (Сычёв и др., 2009). Так как в составе минерального азота преобладала аммонийная форма, поэтому в целом на содержание минерального азота внесение минеральных удобрений оказало менее существенное влияние. Отбор почвенных образцов проводили осенью, когда процессы нитрификации затухают, что повлияло на содержание нитратного азота. По данным А.С. Пискунова (1994) количество аммонийного азота в пахотном горизонте дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы Предуралья (отбор почвенных образцов проводили в апреле или сентябре) варьировало от 25,9 до 54,0, нитратного азота - от 0,1 до 16,6 мг/кг, в материнской породе – от 26,7 до 38,5 и от следовых количеств до 19,1 мг/кг, соответственно.

При внесении минеральных удобрений в слое 80-100 см наблюдали увеличение содержания трудногидролизуемой формы азота в 3 раза и снижение негидролизуемой в 4 раза. Произошло перераспределение между формами, возможно из-за повышения кислотности почвы от длительного внесения минеральных удобрений. Также это может быть обусловлено генетической неоднородностью почвенного покрова.

Внесение ОСВ, навоза в сочетании с минеральными удобрениями привело к повышению содержание общего азота относительно фона только в пахотном слое почвы в 1,1 раза, накопление азота произошло за счёт негидролизуемой фракции. При внесении ОСВ в сочетании с минеральными удобрениями отмечено достоверное увеличение в отдельных слоях почвы (относительно фона) легкогидролизуемого азота.

Наиболее близкое соотношение фракций азота к целинной почве наблюдали при использовании ОСВ в чистом виде и внесении навоза КРС по фону минеральных удобрений. Во всех вариантах с удобрениями возросла доля минерального азота по всему метровому слою. Применение минеральных удобрений повысило долю легкогидролизуемого азота в пахотном слое почвы (табл. 29).

Применение ОСВ в чистом виде и по фону минеральных удобрений обеспечило поддержание содержания и/или запасов общего азота в почве (слой 0-20 см) на уровне целинного аналога, интенсивность баланса азота в данных вариантах составила 71 и 95 %, соответственно.

В целинной почве по профилю установлены очень высокие (r=0,98-0,99) корреляционные зависимости между общим содержанием азота в почве и его негидролизуемой, трудногидролизуемой и легкогидролизуемой фракциями и средняя - для минеральной фракции (табл. 30).

В контрольном варианте опыта (*опыт 3*) по профилю между количеством общего азота и его фракциями выявлены более слабые корреляционные связи для трудногидролизуемой и легкогидролизуемой

формы, что также свидетельствует о повышении подвижность азотсодержащих соединений в пахотной почве.

Таблица 29 - Доля негидролизуемого, трудно-, легкогидролизуемого и минерального азота в почве относительного общего его содержания, % (V ротация, 2013 г.) *(опыт 3)*

Вариант	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100
Негидролизуемый азот					
Без удобрений	71	59	54	45	51
Навоз	71	53	44	45	58
ОСВ	68	62	45	55	65
NPK – фон	68	63	66	57	20
Фон + навоз	72	63	53	58	61
Фон + ОСВ	70	65	58	43	38
Трудногидролизуемый азот					
Без удобрений	19	26	32	40	34
Навоз	18	31	42	41	28
ОСВ	22	26	42	33	22
NPK – фон	19	23	19	28	66
Фон + навоз	17	25	34	29	25
Фон + ОСВ	19	22	25	38	44
Легкогидролизуемый азот					
Без удобрений	8	12	11	12	13
Навоз	8	12	10	10	10
ОСВ	7	10	11	10	10
NPK – фон	11	11	11	12	11
Фон + навоз	9	10	9	9	10
Фон + ОСВ	9	11	13	15	12
Минеральный азот					
Без удобрений	2	3	3	3	2
Навоз	3	4	4	4	4
ОСВ	3	3	3	3	3
NPK – фон	2	3	4	3	4
Фон + навоз	3	3	4	4	4
Фон + ОСВ	2	2	4	4	6

Таблица 30 - Корреляционные зависимости между содержанием в почве общего азота и его фракциями целинной и пахотной почвы (мг/кг)

Показатель	Злаково-разнотравный луг	Полевой севооборот (без удобрений)
$N_{нг}$	0,99*	0,99*
$N_{тг}$	0,98*	0,53
$N_{лг}$	0,98*	0,93*
$N_{мин}$	0,53	0,75

* - существенный ($p<0,05$).

Изучение корреляционных зависимостей между содержанием общего азота и его фракций в почве показало, что во всех опытах достоверная высокая корреляционная связь (r=0,96-0,99) сохраняется для негидролизуемой формы (табл. 31-33).

Таблица 31 - Корреляционные зависимости между содержанием в почве общего азота и его фракциями (мг/кг) *(опыт 1)*

Показатель	$N_{общ}$	$N_{нг}$	$N_{тг}$	$N_{лг}$
Клевер луговой 2 г.п.				
$N_{нг}$	1,0*	-	-	-
$N_{тг}$	0,3	0,2	-	-
$N_{лг}$	0,7	0,6	-0,2	-
$N_{мин}$	0,5	0,5	-0,2	0,9*
Ячмень				
$N_{нг}$	1,0*	-	-	-
$N_{тг}$	0,6	0,4	-	-
$N_{лг}$	0,4	0,4	-0,5	-
$N_{мин}$	0,2	0,1	0,3	0,0
Картофель				
$N_{нг}$	1,0*	-	-	-
$N_{тг}$	0,3	0,1	-	-
$N_{лг}$	0,8*	0,9*	-0,1	-
$N_{мин}$	0,6	0,5	0,2	0,2
Овёс				
$N_{нг}$	0,9*	-	-	-
$N_{тг}$	0,9*	0,7	-	-
$N_{лг}$	0,7*	0,6	0,5	-
$N_{мин}$	0,8*	0,7	0,6	0,8*

* - существенный ($p<0,05$).

Таблица 32 - Корреляционные зависимости между содержанием в почве общего азота и его фракциями (мг/кг) *(опыт 2)*

Показатель	$N_{общ}$	$N_{нг}$	$N_{тг}$	$N_{лг}$
$N_{нг}$	1,0*	-	-	-
$N_{тг}$	0,2	-0,1	-	-
$N_{лг}$	0,2	0,0	0,7*	-
$N_{мин}$	0,9*	0,8*	0,1	0,1

* - существенный ($p<0,05$).

Для остальных форм азота корреляционные связи варьируют от очень слабых (недостоверных) до высоких и зависят от вида культуры, погодных условий вегетационного периода. Например, в *опыте 1* достоверные средние и высокие корреляционные зависимости между содержанием общего азота и его трудно-, легкогидролизуемыми и минеральными соединениями получены

при изучении азотного режима в посевах овса. Под картофелем высокая корреляционная связь установлена для легкогидролизуемой формы. На клевере и ячмене достоверных корреляционных связей между содержанием общего азота и его трудно-, легкогидролизуемыми и минеральными формами не выявлено.

Таблица 33 - Корреляционные зависимости между содержанием в почве общего азота и его фракциями (мг/кг) *(опыт 3)*

Показатель	$N_{общ}$	$N_{нг}$	$N_{тг}$	$N_{лг}$
0-20				
$N_{нг}$	1,0*	-	-	-
$N_{тг}$	0,8	0,6	-	-
$N_{лг}$	0,6	0,5	0,2	-
$N_{мин}$	0,6	0,6	0,4	0,3
20-40				
$N_{нг}$	1,0*	-	-	-
$N_{тг}$	0,8	0,7	-	-
$N_{лг}$	0,9*	0,9*	0,5	-
$N_{мин}$	0,3	0,2	0,6	0,0
40-60				
$N_{нг}$	0,8*	-	-	-
$N_{тг}$	-0,4	-0,9*	-	-
$N_{лг}$	0,6	0,6	-0,5	-
$N_{мин}$	0,4	0,6	-0,6	0,1
60-80				
$N_{нг}$	0,9*	-	-	-
$N_{тг}$	-0,3	-0,5	-	-
$N_{лг}$	0,0	-0,2	0,0	-
$N_{мин}$	0,4	0,3	-0,3	0,1
80-100				
$N_{нг}$	0,1	-	-	-
$N_{тг}$	0,4	-0,9*	-	-
$N_{лг}$	0,2	-0,6	0,6	-
$N_{мин}$	0,4	-0,1	0,2	0,2

* - существенный ($p<0,05$).

В *опыте 3* установлено, что по профилю почвы высокая достоверная корреляционная связь также выявлена между содержанием общего азота и его негидролизуемой формой. В слое 80-100 отсутствуют достоверные корреляционные связи между содержанием общего азота и его фракциями. Полученные результаты показывают, что длительное сельскохозяйственное использование пашни, применение минеральных и органических удобрений

приводит к постепенному изменению азотного фонда, характерного для данного типа почв.

В последнее время некоторые ученые высказывают мнение, что главным процессом минерализации органического вещества является не аммонификация органических соединений до NH_4^+, а деполимеризация полимеров до мономеров. В отличие от традиционного представления, по которому органический азот сначала минерализуется до NH_4^+ и лишь, потом, поглощается микроорганизмами в почве, новая концепция допускает прямое поглощение микроорганизмами небольших органических молекул, например, аминокислот, без предварительной их минерализации (Geisseler et al., 2010; Семёнов, 2020). Это может быть одним из объяснений, почему в почве происходит в первую очередь снижение или увеличение фракции «негидролизуемых» соединений, которые должны быть самыми устойчивыми. Возможно деполимеризация и дальнейшая минерализация органических азотсодержащих веществ, входящих в состав «негидролизуемой» фракции, происходит гораздо быстрее и более интенсивно вовлекается в круговорот, чем считалось ранее.

Таким образом, длительное экстенсивное возделывание сельскохозяйственных культур в севообороте привело к уменьшению в верхнем слое почвы (0-20 см) содержания общего азота на 18-23 %, снижению степени обогащённости органического вещества азотом (целина: C:N – 8; пашня: C:N – 10). Общие запасы азота уменьшились в среднем на 0,4 т/га. В более глубоких слоях почвы содержание общего азота соответствовало целинной. Отмечено повышение подвижности азотного фонда почвы в метровом слое, выявлено 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).

Длительное применение минеральных и органических удобрений способствовало существенному изменению в почве содержания общего азота

и всех его фракций. Интенсивность и направленность изменений зависела от вида удобрений, их сочетания и дозы (насыщенности пашни).

Сравнение органической, минеральной и органоминеральной систем удобрений показало практически одинаковое их влияние на азотный режим почвы, различия в большей степени были связаны с насыщенностью пашни удобрениями. При умеренной насыщенности пашни удобрениями отмечено увеличение количества в пахотном слое почвы легкогидролизуемых и минеральных соединений азота. При высокой насыщенности пашни удобрениями наблюдали повышение в почве содержания общего азота и всех его форм. Наибольшее содержание общего азота и всех его фракций отмечено при максимальной насыщенности пашни удобрениями - навоз 20 т/га + NPK эквивалентно навозу. Запасы общего азота в пахотном слое почвы возросли с 3,1 до 4,3 т/га.

Длительное внесение азотных удобрений (N_{90}, $(NK)_{90}$, $(NP)_{90}$, $(NPK)_{90}$) способствовало увеличению общего содержания азота в пахотном слое на 10-25 % и его отдельных фракций – в 1,3-2,7 раза. Запасы минерального азота в слое 0-20 см и 0-100 см увеличились в 2-3 раза. Максимальное увеличение общего содержания азота в пахотном слое и минерального в метровом слое отмечено при применении полного минерального удобрения $(NPK)_{90}$. Азотные удобрения способствовали существенному повышению доли минерального азота в составе общего (с 1-2% до 3-6%). Длительное применение калия хлористого также повысило в почве количество общего азота на 12%, увеличение произошло за счёт негидролизуемых соединений азота. Одной из причин этого может быть высокое содержание калия в почве, которое приводит к блокированию потребления фиксированного аммония и накоплению его в почве. Длительное внесение суперфосфата не оказало существенного влияния на азотный режим почвы.

Достоверное увеличение в почве содержания общего азота и всех его фракций наблюдали при внесении NPK в дозе от 60 до 150 кг д.в. каждого элемента питания/ га. Запасы общего азота в пахотном слое почвы

повысились с 2,8 т/га до 3,4-4,4 т/га. Особенно следует отметить высокий рост минеральной фракции - в 3,3-5,3 раза. Максимальное накопление общего азота и всех его фракций отмечено в варианте $(NPK)_{150}$. При внесении $(NPK)_{30}$ отмечено сохранение количества общего азота и его фракций на уровне контрольного варианта.

Длительное внесение нетрадиционного органического удобрения ОСВ в течение пяти ротаций севооборота повысило содержание в пахотном слое почвы общего азота и его фракций в 1,2-1,7 раза. Эффективность влияния ОСВ на азотный режим почвы возрастала на фоне минеральных удобрений. При низкой насыщенности пашни навозом КРС (5,7 т/га) в почве наблюдали тенденции к снижению содержания общего азота и его отдельных фракций.

Изменения в содержании общего азота и его негидролизуемых соединений при длительном внесении удобрений отмечены в основном в верхнем слое 0-40 см, минеральных и легкогидролизуемых соединений азота - в метровом слое.

Поддержание содержания (запасов) общего азота в почве (0-20 см) на уровне целинного аналога или выше наблюдали:

при применении органической, минеральной и органоминеральной систем удобрений с высокой насыщенностью (навоз 20 т/га в год, NPK эквивалентно 20 т навоза, навоз 10 и 20 т/га + NPK эквивалентно навозу);

при внесении полного минерального удобрения в дозе 90-150 кг д.в./га;

использовании ОСВ (насыщенность 5,7 т/га в год) в чистом виде и по фону минеральных удобрений.

5 ФОСФАТНЫЙ РЕЖИМ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПАШНИ И ПРИМЕНЕНИИ УДОБРЕНИЙ

Фосфор в почве является одним из основных элементов питания растений. Хорошая обеспеченность фосфором при оптимальном соотношении с другими макро- и микроэлементами способствует получению высоких урожаев сельскохозяйственных культур и улучшению качества продукции (Андрианов, 2004; Титова и др., 2005; Сычев, Кирпичников, 2009).

5.1 Содержание общего фосфора, его органических, минеральных и подвижных соединений

Исследования показали, что в целинной дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве под злаково-разнотравным лугом в верхнем горизонте содержание общего фосфора составило 1350 (±36) мг/кг (рис. 24).

Рисунок 24 - Фосфатный фонд почвы под злаково-разнотравным лугом и бессменным чистым паром (0-20 см), мг/кг (% от общего содержания)

В составе общего фосфора в почве преобладали минеральные фосфаты. Доля минерального фосфора составила 54 %, органического –46 %. Содержание общего фосфора в пахотной почве при длительном экстенсивном сельскохозяйственном использовании в верхнем слое варьировало от 785

(±48) до 1110 (±56) мг/кг. Его количество относительно целинной почвы было меньше на 17-42 %, в основном эти потери происходили за счёт органической части фосфора. Общие запасы фосфора в почве в среднем уменьшились на 0,5 т/га (табл. 34).

Таблица 34 - Запасы фосфора целинной и пахотной дерново-подзолистой почвы, т/га

Вариант	Общий фосфор			Минеральные соединения фосфора			Органические соединения фосфора			Подвижные соединения фосфора		
	0-20	0-40	0-100	0-20	0-40	0-100	0-20	0-40	0-100	0-20	0-40	0-100
Злаково-разнотравный луг	3,1	5,4	11,1	1,7	3,3	8,9	1,4	2,0	2,2	0,7	1,4	3,9
Полевой севооборот (без удобрений)*	2,6	4,4	11,7	1,6	3,0	9,5	0,9	1,3	2,2	0,4	0,8	3,2
Бессменный чистый пар	3,1	-	-	2,3	-	-	0,8	-	-	0,9	-	-

(*– усреднённые данные контрольных вариантов опытов 1, 3)

Содержание органических соединений фосфора в пахотной почве варьировало от 300 до 415 мг/кг, минеральных – от 450 до 700 мг/кг. Количество органических соединений фосфора было в 1,3-1,5 раза ниже, чем в почве под лугом. Антропогенное воздействие на почву нарушило сложившееся равновесие между органическими и минеральными формами фосфора. Аналогичные результаты получены в работах А.А. Христенко (2003), М.И. Макарова (2004), Е.В. Курносовой, Г.Е. Гришина (2013), J. Jonczak с соавторами (2015). Доля органического фосфора при длительном экстенсивном использовании пашни составила 31-43 %, минерального 57-69% (среднее – 37 и 63 %, соответственно). Полученные результаты в первую очередь связаны с уменьшением в почве содержания органического вещества.

Исследования по содержанию общего фосфора и его соединений в опытах проводили в посадках картофеля, посевах ячменя и овса. Результаты показали, что в образцах отобранных после ячменя (по пласту клевера) содержание органофосфатов и общего фосфора было выше. Органические

соединения фосфора в почве содержатся в гумусе (от 0,8 до 2,5 % P_2O_5 к его массе в зависимости от типа почвы) и фитатах (Кидин, Торшин, 2015). Чем выше содержание ОВ в почве, тем богаче она органическими фосфатами. Фитаты составляют до половины органического фосфора в почвах. При этом кальциевые и магниевые соли фитина содержатся в нейтральных почвах, а фитаты алюминия и железа - в кислых.

В бессменном чистом пару наблюдали минимальную долю органических соединений фосфора – 25 %. При этом содержание органических соединений фосфора составило 300 мг/кг и было чуть ниже, чем в почве полевого севооборота. По-видимому, в почве сохранились наиболее устойчивые к минерализации органические соединения фосфора или интенсивная обработка почвы, отсутствие культурных растений способствовали образованию таких соединений. По данным А.В. Павлихиной (1971) ОВ в почве бессменного чистого пара и окультуренного участка было насыщено фосфором неодинаково. В почве бессменного пара наблюдали более высокое процентное содержание фосфора (1,54—1,58%) при меньшем содержании гумуса (1,19—1,24%) по сравнению с почвой, окультуренного участка (соответственно 1,15—1,02 и гумуса 1,67—1,70%).

В бессменном чистом пару отмечено высокое содержание минеральных фосфатов – 900 мг/кг, в 1,3-2,0 раза выше, чем в целинной почве или при экстенсивном возделывании сельскохозяйственных культур. Это связано с интенсивной минерализацией органических соединений фосфора и отсутствием выноса растениями.

Содержание подвижных соединений фосфора в почве под злаково-разнотравным лугом в слое 0-20 см составило 290 (±31) мг/кг, запасы – 0,7 т/га (табл. 35). В пахотной почве (без удобрений) количество подвижных соединений фосфора в слое 0-20 см варьировало от 126 до 192 мг/кг, в 1,3-1,6 раза ниже целинного аналога. Запасы подвижных соединений фосфора в почве в среднем были ниже на 0,3 т/га (табл. 34).

Таблица 35 – Фосфатный фонд дерново-подзолистой почвы под злаково-разнотравным лугом

Злаково-разнотравный луг	Содержание общего фосфора, мг/кг	Минеральные соединения фосфора, мг/кг (%)	Органические соединения фосфора, мг/кг (%)	Подвижные соединения фосфора, мг/кг	Степень подвижности фосфатов, мг/л	Емкость поглощения P_2O_5, мг/100 г
A_1 (0-22 см)	1350±36	725 54	625 46	290±31 22	1,7	28,8
A_2B (22-28 см)	1160±90	740 64	420 36	307±28 26	1,7	33,2
B_1 (28-76 см)	685±65	660 96	25 4	332±54 48	1,6	46,6
B_2 (76-105 см)	840±42	760 90	80 10	395±42 47	2,4	44,0
B_2C (105-127 см)	790±102	730 92	60 8	409±78 52	2,0	39,2
C (от 127 см)	810±64	750 93	60 7	335±45 41	0,9	40,5

В исследуемой целинной почве содержание общего фосфора снижалось с глубиной. Начиная с горизонта B_1 (28-76 см) наблюдали резкое уменьшение содержания органических соединений фосфора, их доля в составе общего не превышала 10 %, что связано с уменьшением ОВ в более глубоких слоях почвы.

Сравнение целинной и пахотной почвы по профилю показывает, что основные изменения в фосфатном режиме при экстенсивном возделывании сельскохозяйственных культур происходят в верхнем слое почвы 0-40 см. Общие запасы фосфора, его минеральных и органических соединений в слое 0-40 уменьшились на 10-35 %. Изменения в слое 20-40 см возможно связаны не только с выносом растениями, а также припахиванием нижележащего горизонта почвы. Отмечены тенденции уменьшения количества подвижных соединений фосфора в слое почвы 0-80 см, что может быть обусловлено изменением режима кислотности почвы и выносом сельскохозяйственными культурами. Запасы подвижных соединений фосфора относительно целинного аналога снизились в метровом слое почвы на 0,7 т/га (18 %). Выявлено уменьшение доли подвижного фосфора от его валового количества

в метровом слое почвы: слой 0-20 см с 22 до 16 %, слой 80-100 см с 47 до 35-40 %.

За время проведения длительных опытов (35-50 лет) количество подвижного фосфора в пахотном слое контрольных вариантов от исходного уровня уменьшилось незначительно (рис 25). Не прослеживается чёткой закономерности его уменьшения от ротации к ротации. При сложившемся высоком отрицательном балансе данного элемента за пять-шесть ротаций севооборотов (минус 600-970 кг/га) запасы подвижных соединений фосфора в почве уменьшились всего на 30-125 кг. Исследуемая почва обладает высокой буферной способностью в отношении фосфора и способна поддерживать определённый уровень подвижных соединений за счёт других форм, нижележащих горизонтов и материнской породы.

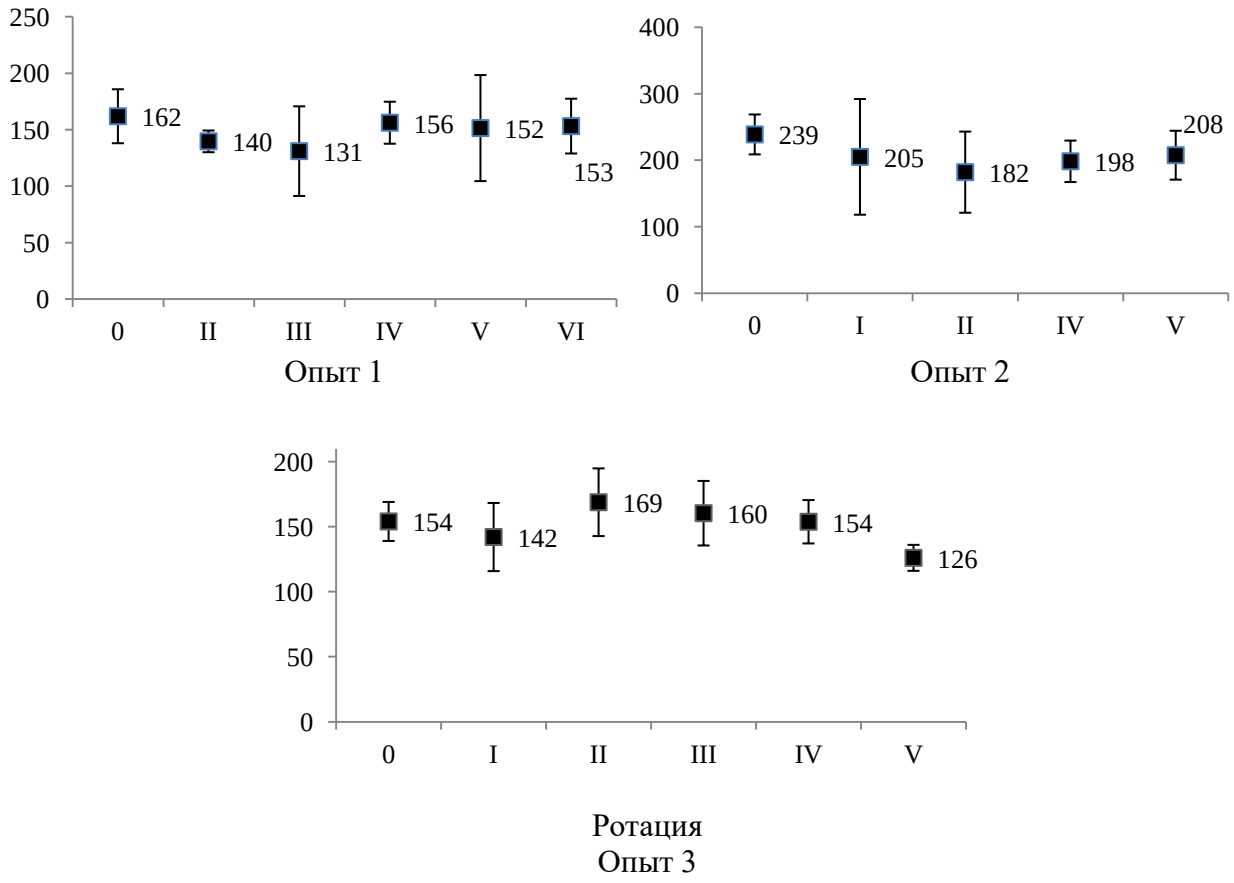


Рисунок 25 - Динамика содержания подвижных соединений фосфора в пахотном слое контрольного варианта *(опыты 1-3)*

Исследования, проведённые в *опыте 1,* показали, что общее содержание фосфора в пахотном слое почвы при длительном применении органической, минеральной и органоминеральной систем удобрения было выше контрольного варианта на 30-75% (табл. 36). Во всех вариантах отмечено достоверно более высокое количество минеральных соединений фосфора. Повышение органических соединений фосфора наблюдали только при более высокой насыщенности пашни удобрениями – в вариантах «навоз 20 т/га в год», «NPK эквивалентно 20 т навоза», «навоз 10 т/га + NPK эквивалентно навозу» и «навоз 20 т/га + NPK эквивалентно навозу». При использовании систем удобрения «навоз 10 и 20 т/га + NPK эквивалентно навозу» отмечено накопление органофосфатов и в подпахотном горизонте.

Общее содержание фосфора в почве при умеренной насыщенности пашни удобрениями было выше контрольного варианта в основном в слое 0-40 см, при более высокой насыщенности – в слое 0-60 см. Увеличение общего количества фосфора в слое 40-60 см происходило только за счёт его минеральной части. Общие запасы фосфора во всех вариантах в метровом слое почвы были выше контроля на 12-34 % (табл. 37). Максимальное закрепление фосфора из удобрений происходило в пахотном слое почвы.

Применение всех систем удобрений обеспечило в слое почвы 0-20 см как минимум поддержание общих 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 более высокой насыщенности пашни органическими и минеральными удобрениями наблюдали поддержание запасов органических соединений фосфора в слое 0-20 см на уровне целинного аналога. Абсолютное количество общего фосфора в почве при высокой насыщенности пашни удобрений было выше относительно целинной почвы в слое 0-60 см, соответственно наблюдали рост общих запасов фосфора в метровом слое почвы.

Таблица 36 - Влияние длительного применения органической, минеральной и органоминеральной систем удобрения на фосфатный режим дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы (VI ротация, среднее по двум закладкам, 2016-2017 гг.) *(опыт 1)*

Вариант	Общее содержание фосфора, мг/кг					Минеральные соединения фосфора, мг/кг (%)					Органические соединения фосфора, мг/кг (%)					Подвижные соединения фосфора, мг/кг (%)				
	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 69	625 74	700 88	850 89	775 91	300 31	225 26	100 13	100 11	75 9	153 16	180 21	203 25	267 28	300 35
Навоз 10 т/га	1240	1075	900	960	1000	890 72	775 72	740 82	740 77	850 85	350 28	300 28	160 18	220 23	150 15	220 18	221 21	229 25	254 26	343 34
Навоз 20 т/га	1350	960	1000	815	960	900 67	700 73	775 78	815 100	925 96	450 33	260 27	225 23	0 0	35 4	272 20	203 21	215 22	235 29	284 30
NPK экв. 10 т навоза	1250	1000	950	1075	700	850 68	700 70	850 89	850 79	700 100	400 32	300 30	100 11	225 21	0 0	216 17	230 23	229 24	229 21	242 35
NPK экв. 20 т навоза	1375	1000	1000	950	850	910 66	850 85	850 85	700 74	775 91	465 34	150 15	150 15	250 26	75 9	245 18	320 32	300 30	250 26	291 34
Навоз 5 т+ NPK экв.	1400	1150	1000	1000	900	1040 74	850 74	850 85	975 98	800 89	360 26	300 26	150 15	25 3	100 11	227 16	283 25	241 24	286 29	256 28
Навоз 10 т + NPK экв.	1340	1400	1000	925	900	925 69	925 66	810 81	775 84	850 94	415 31	475 34	190 19	150 16	50 6	269 20	261 19	213 21	258 28	232 26
Навоз 20 т + NPK экв.	1675	1360	1010	1000	950	1110 66	960 71	815 81	815 82	815 86	565 34	400 29	195 19	185 19	135 14	472 28	335 25	320 32	320 32	270 28
НСР $_{05}$	180	205	195	Fф<Fт	Fф<Fт	125	140	105	Fф<Fт	Fф<Fт	150	150	Fф<Fт	Fф<Fт	Fф<Fт	30	43	74	51	$F_ф<F_т$

Таблица 37 - Влияние длительного применения органической, минеральной и органоминеральной систем удобрения на общие запасы фосфора, его минеральных и органических соединений, т/га (VI ротация, среднее по двум закладкам, 2016-2017 гг.) *(опыт 1)*

Вариант	Общий фосфор			Минеральные соединения фосфора			Органические соединения фосфора			Подвижные соединения фосфора		
	0-20	0-40	0-100	0-20	0-40	0-100	0-20	0-40	0-100	0-20	0-40	0-100
Перед закладкой	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,4	-	-
Без удобрений	2,5	4,8	12,8	1,7	3,4	10,5	0,8	1,4	2,2	0,4	0,9	3,3
Навоз 10 т/га	3,2	6,1	14,9	2,3	4,4	11,6	0,9	1,7	3,3	0,6	1,2	3,7
Навоз 20 т/га	3,5	6,1	14,6	2,3	4,2	12,0	1,2	1,9	2,6	0,7	1,3	3,5
NPK экв. 10 т навоза	3,3	6,0	14,3	2,2	4,1	11,4	1,0	1,9	2,8	0,6	1,2	3,3
NPK экв. 20 т навоза	3,6	6,3	14,8	2,4	4,7	11,8	1,2	1,6	3,1	0,6	1,5	4,1
Навоз 5 т+NPK экв.	3,6	6,7	15,6	2,7	5,0	13,0	0,9	1,7	2,6	0,6	1,4	3,8
Навоз 10 т + NPK экв.	3,5	7,3	15,9	2,4	4,9	12,4	1,1	2,4	3,5	0,7	1,4	3,6
Навоз 20 т + NPK экв.	4,4	8,0	17,1	2,9	5,5	13,0	1,5	2,5	4,1	1,2	2,1	4,9
$НСР_{05}$	0,3	0,6	0,8	0,3	0,5	0,7	0,4	0,5	Fф<Fт	0,1	0,3	0,8

Изучение динамики подвижных соединений фосфора по ротациям показало, что в варианте «NPK эквивалентно 10 т навоза» наблюдали поддержание содержания подвижного фосфора в пахотном слое почвы близкое или чуть выше исходного уровня (рис. 26). Количество подвижных соединений фосфора увеличивалось в вариантах «навоз 10 т/га в год», «навоз 20 т/га в год», «NPK эквивалентно 20 т навоза», «навоз 5 и 10 т/га + NPK эквивалентно навозу» с IV ротации севооборота, в варианте «навоз 20 т/га + NPK эквивалентно навозу» - с III ротации.

Количество подвижных соединений фосфора в пахотном слое почвы к концу VI ротации (2016-2017 гг.) было выше относительно контрольного варианта при использовании всех систем удобрений в 1,4-3,1 раза, содержание повышалось пропорционально увеличению насыщенности пашни удобрениями (табл. 36). Запасы подвижного фосфора в пахотном слое почвы возросли на 0,2-0,8 т/га. Доля подвижного фосфора относительно его валового количества в вариантах с удобрениями составила 16-20 %, при максимальной насыщенности (навоз 20 т/га в год + NPK эквивалентно навозу) – 28 %.

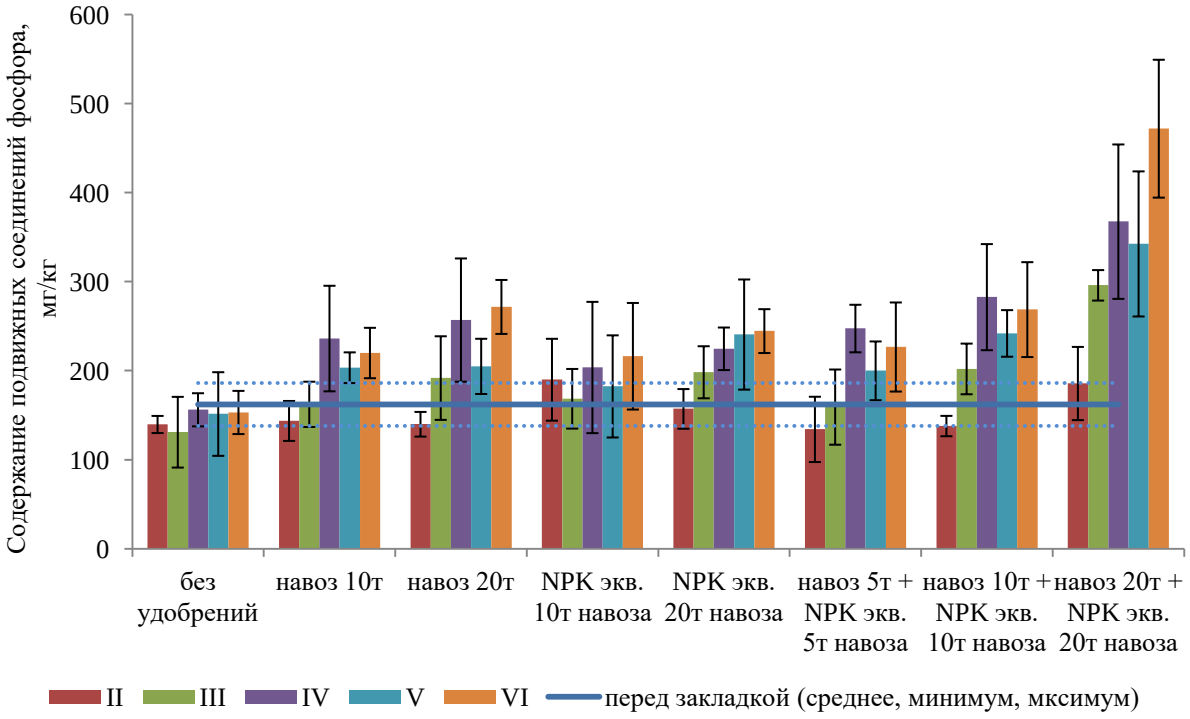


Рисунок 26 - Изменение содержания подвижных соединений фосфора в дерново-подзолистой почве (0-20 см) при длительном применении органической, минеральной и органоминеральной систем удобрений (среднее по двум закладкам, II-VI ротации, 1977-2017 гг.), мг/кг

Содержание подвижного фосфора в почве при длительном применении минеральной и органоминеральной системы удобрений было выше относительно контрольного варианта в слое 0-40, 0-60 или 0-80 см. Полученные результаты могут быть связаны с повышением уровня кислотности почвы в результате применения минеральных удобрений. Использование органической системы удобрения оказало достоверное влияние только на пахотный слой почвы.

В *опыте 2* увеличение в пахотном слое почвы общего содержания фосфора и его минеральной части (относительно контрольного варианта) наблюдали при длительном применении суперфосфата в дозе 90 кг д.в./га, его сочетании с азотными удобрениями и калием хлористым (P_{90}, $(PK)_{90}$, $(NP)_{90}$). В вариантах P_{90} и $(NP)_{90}$ количество общего фосфора в почве возросло в 1,5-1,6 раза, его минеральных соединений почти в 2 раза (табл. 38). При внесении фосфорно-калийных удобрений $(PK)_{90}$ наблюдали менее

существенное накопление содержания общего фосфора и его минеральной части – в 1,3-1,4 раза. Баланс фосфора во всех трёх вариантах был примерно одинаков и составил 32-34 кг/га в год. Возможно, калий хлористый способствовал миграции соединений фосфора по профилю, что подтверждается данными по изменению его подвижных соединений в метровом слое почвы, которые будут представлены ниже. Запасы общего фосфора в вариантах P_{90} и $(NP)_{90}$ увеличились с 2,9 (контроль) до 4,5-4,7 т/га, в варианте $(PK)_{90}$ до 3,7 т/га.

Накопление в почве, как минеральных соединений фосфора, так и органических, наблюдали при применении полного минерального удобрения $(NPK)_{90}$. В результате общее количество фосфора возросло на 60 %.

Тенденцию накопления органических соединений фосфора в почве наблюдали при длительном внесении азотных удобрений в чистом виде. При этом доля органофосфатов возросла до 49 %. Соотношение минеральных и органических соединений в почве стало близким к почве злаково-разнотравного луга. Максимальное накопление органических соединений фосфора наблюдали при внесении азотно-калийных удобрений – 720 мг/кг, на 70 % выше, чем в варианте без удобрений. При наличии в почве хлорид-ионов возможно их взаимодействие с органическим веществом почвы с образованием хлорорганических соединений (Водяницкий, Макаров, 2017). Возможно, происходит образование органического вещества, обогащенного фосфором. В варианте $(NK)_{90}$ запасы органического фосфора в слое 0-20 см составили 1,9 т/га (луг – 1,4 т/га).

В вариантах N_{90}, K_{90}, $(NK)_{90}$ не наблюдали уменьшения общего содержания фосфора в почве (слой 0-20 см) относительно контроля, отмечены лишь незначительные тенденции снижения его минеральной части. Хотя в исследованиях Л.В. Дербенёвой (1994), проведённых на дерново-подзолистой почве нашего региона, отмечается уменьшение содержания общего фосфора в пахотном слое почвы при внесении азотно-калийных удобрений.

Таблица 38 - Изменение показателей фосфатного режима дерново-подзолистой почвы при длительном применении минеральных удобрений, 0-20 см (V ротация, среднее по двум закладкам, 2016-2018 гг., ячмень) *(опыт 2)*

Вариант	Содержание, мг/кг / % от общего количества			Запасы, т/га		
	общий фосфор	минеральные соединения фосфора	органические соединения фосфора	общий фосфор	минеральные соединения фосфора	органические соединения фосфора
Без удобрений	1120	700 63	420 37	2,9	1,8	1,1
N_{90}	1200	615 51	585 49	3,1	1,6	1,5
P_{90}	1720	1240 72	480 28	4,5	3,2	1,2
K_{90}	1305	880 67	425 33	3,4	2,3	1,1
$(NP)_{90}$	1810	1245 69	565 31	4,7	3,2	1,5
$(NK)_{90}$	1330	610 46	720 54	3,5	1,6	1,9
$(PK)_{90}$	1430	960 67	470 33	3,7	2,5	1,2
$(NPK)_{90}$	1745	1120 64	625 36	4,5	2,9	1,6
$НСР_{05}$	305	210	200	0,8	0,5	0,5

Полученные результаты можно объяснить балансом фосфора. В данных вариантах, как и в контрольном варианте, баланс изучаемого элемента был примерно одинаковым (-23-25 кг/га в год). Кроме того, по данным А.И. Калинина (2004) почвы, сформированные на материнских породах богатых подвижными фосфатами, обладают высокой буферной способностью поддерживать определённый фосфатный уровень. В почве постоянно происходит процесс переноса фосфора корнями растений из нижних в верхние горизонты (Трофимов, Коваленко, 2017).

Исследования по влиянию видов удобрений и их соотношения на фосфатный режим почвы проводили в посевах ячменя, изучение доз полного минерального удобрения проводили в посадках картофеля, что повлияло на полученные результаты исследований. Частые междурядные обработки почвы, высокая урожайность картофеля привели к интенсивной минерализации органического вещества в почве и повлияли на содержание в почве органических соединений фосфора (табл. 39). Отмечено увеличение удельной доли минеральных и снижение доли органических соединений.

Общее содержание фосфора в пахотном слое почвы было выше контрольного варианта при внесении NPK в дозах 30-150 кг д.в. каждого элемента питания/га в 1,1-1,6 раза, его минеральных соединений – в 1,3-2,1 раза. Увеличение содержания общего фосфора и его минеральной части происходило прямо пропорционально повышению дозы удобрений. Максимальное содержание общего количества фосфора и его минеральных соединений отмечено при внесении $(NPK)_{150}$, общие запасы фосфора в почве возросли с 2,7 (контроль) до 4,2 т/га.

На рисунке 27 представлена динамика подвижных соединений фосфора с I по V ротации севооборота в пахотном слое почвы, в таблице 40 - изменение их содержания по профилю почвы в начале VI ротации.

Таблица 39 - Изменение показателей фосфатного режима дерново-подзолистой почвы при длительном применении возрастающих доз полного минерального удобрения, 0-20 см (V ротация, 2012 г., картофель) *(опыт 2)*

Вариант	Содержание, мг/кг / % от общего количества			Запасы, т/га		
	общий фосфор	минеральные соединения фосфора	органические соединения фосфора	общий фосфор	минеральные соединения фосфора	органические соединения фосфора
Без удобрений	1065	685 64	380 36	2,7	1,7	1,0
$(NPK)_{30}$	1170	860 74	310 26	2,9	2,1	0,8
$(NPK)_{60}$	1165	870 75	295 25	3,0	2,2	0,8
$(NPK)_{90}$	1310	1040 79	270 21	3,4	2,7	0,7
$(NPK)_{120}$	1480	1265 85	215 15	3,7	3,2	0,5
$(NPK)_{150}$	1670	1405 84	265 16	4,2	3,5	0,7
$НСР_{05}$	160	170	Fф<Fт	0,4	0,4	Fф<Fт

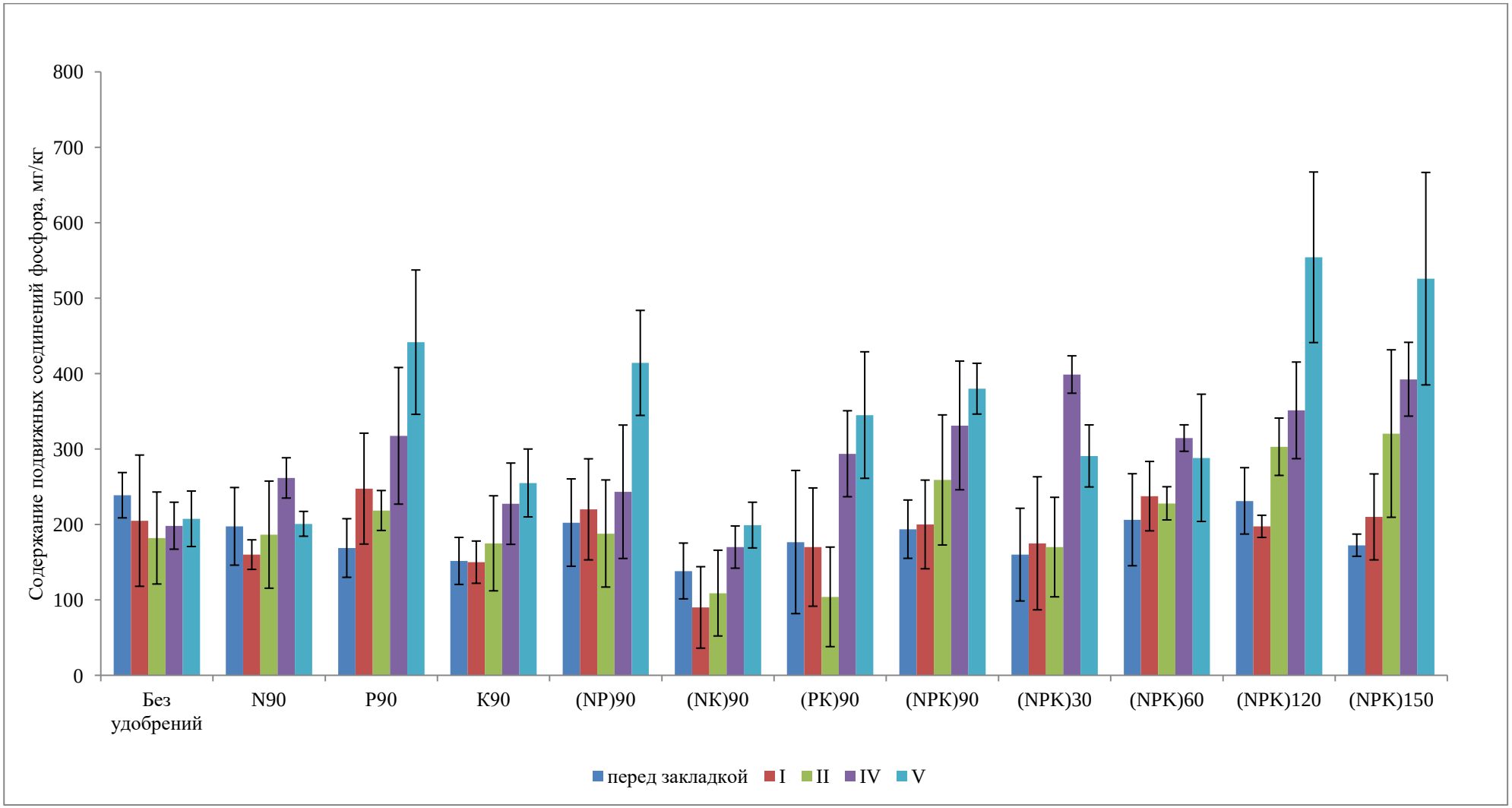


Рисунок 27 - Изменение содержания подвижных соединений фосфора в дерново-подзолистой почве (0-20 см) при длительном применении различных видов, доз и соотношений минеральных удобрений (I-V ротации, среднее по двум закладкам, 1978-2019 гг.), мг/кг *(опыт 2)*

Таблица 40 - Содержание подвижных соединений фосфора по профилю почвы при длительном применении минеральных удобрений (2021 г.) *(опыт 2)*

Вариант	Содержание, мг/кг						Запасы, т/га			
	перед закладкой, 0-20	VI ротация					перед закладкой, 0-20	VI ротация		
		0-20	20-40	40-60	60- 80	80-100		0-20	0-40	0-100
Без удобрений	239	192	167	139	236	376	0,6	0,5	0,9	3,3
N_{90}	198	188	110	175	283	337	0,5	0,5	0,8	3,2
P_{90}	169	461	225	243	300	419	0,4	1,2	1,8	4,8
K_{90}	152	235	194	166	207	361	0,8	0,6	1,1	3,4
$(NP)_{90}$	203	397	153	140	250	330	0,5	1,0	1,4	3,7
$(NK)_{90}$	138	185	122	119	246	410	0,4	0,5	0,8	3,2
$(PK)_{90}$	177	397	172	188	408	526	0,5	1,0	1,5	5,0
$(NPK)_{90}$	194	371	225	188	328	428	0,5	1,0	1,6	4,5
$(NPK)_{30}$	160	329	150	214	273	456	0,4	0,8	1,2	4,1
$(NPK)_{60}$	206	339	200	174	368	454	0,5	0,8	1,3	4,4
$(NPK)_{120}$	231	446	210	199	346	461	0,6	1,2	1,7	4,9
$(NPK)_{150}$	173	530	242	252	356	423	0,4	1,4	2,0	5,2
$НСР_{05}$	-	123	41	48	91	100	-	0,3	0,3	0,8

При внесении N_{90} и $(NK)_{90}$ в первые две ротации севооборота наблюдали тенденции к уменьшению содержания подвижных соединений фосфора в почве на 10-35 %. Сохранение их содержания в данных вариантах на исходном уровне или увеличение на 23-44 % отмечено в IV-VI ротациях. Подкисление почвы в результате длительного применения азотных удобрений могло увеличить растворимость некоторых минеральных соединений фосфора и повлиять на количество его подвижной формы. Также в вариантах N_{90} и $(NK)_{90}$ отмечено достоверное уменьшение подвижных соединений фосфора в подпахотном слое (20-40 см) на 27-34 %, по-видимому, дальнейшие потери фосфора приходились на слой 20-40 см.

При внесении K_{90} наблюдали в I и II ротациях сохранение содержания подвижных соединений фосфора на исходном уровне, в IV-VI ротациях отмечены тенденции к увеличению в 1,5-1,7 раза. Создание высокого калийного фона при длительном внесении калийных удобрений могло привести к замещению или вытеснению фосфора из его труднодоступных соединений. Влияние на фосфатный режим почвы мог оказать ион хлора. Некоторые исследователи отмечают, что хлористый калий повышал

концентрацию фосфора в почвенных растворах, анион CI вытеснял с поверхности коллоидов фосфат-ионы (Дзюин, 2020).

Длительное применение суперфосфата (P_{90}, $(PK)_{90}$, $(NP)_{90}$, $(NPK)_{90}$) привело к повышению содержания подвижных соединений фосфора 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 оказало влияние на динамику подвижного фосфора по ротациям. При внесении суперфосфата в чистом виде отмечено увеличение количества подвижных соединений фосфора с первой ротации севооборота, наблюдали закономерный рост от ротации к ротации. Именно в варианте P_{90} отмечено максимальное накопление подвижных соединений фосфора в пахотном слое почвы, его запасы на начало VI ротации увеличились в 3 раза (с 0,4 до 1,2 т/га). Баланс фосфора в вариантах P_{90}, $(PK)_{90}$, $(NP)_{90}$, $(NPK)_{90}$ был примерно одинаков и составил 29-34 кг/га в год.

При внесении $(PK)_{90}$ и $(NP)_{90}$ в первых двух ротациях наблюдали сохранение содержания подвижного фосфора близкое к исходному уровню, увеличение отмечено с IV ротации. При внесении полного минерального удобрения $(NPK)_{90}$ рост количества подвижных соединений фосфора в пахотном слое почвы наблюдали со II ротации севооборота.

Различное сочетание P с N и K оказало влияние на изменение содержания подвижного фосфора по профилю почвы (табл. 40). Количество подвижных соединений фосфора в почве относительно контрольного варианта было достоверно выше при длительном внесении P_{90} в слое 0-60 см, $(NPK)_{90}$ – в слое 0-80 см, $(PK)_{90}$ в слоях 0-20, 40-60, 60-80 и 80-100 см. Запасы в метровом слое почвы в данных вариантах были выше контроля в 1,4-1,5 раза. При этом максимальное закрепление фосфора из удобрений происходило в пахотном слое почвы.

Содержание подвижных соединений фосфора было выше контрольного варианта только в пахотном слое почвы при сочетании суперфосфата с азотными удобрениями $(NP)_{90}$. Полученные результаты говорят о том, что

калий хлористый в сочетании с суперфосфатом способствовал миграции фосфора из удобрений по профилю и/или замещению фосфора из его труднодоступных соединений.

Изучение влияния различных доз полного минерального удобрения на содержание подвижных соединений фосфора показало, что в первую ротацию севооборота даже при внесении высоких доз NPK в почве не наблюдали достоверного их повышения. При внесении фосфорных удобрений в почве происходит их быстрое закрепление. Среди всех факторов, наибольшее снижение эффективности фосфорных удобрений связано с химическим связыванием фосфатов катионами-антагонистами. Водорастворимые соли фосфорной кислоты, попадая в почвы с удобрениями, через некоторое время в слабокислых и слабощелочных условиях в результате химического связывания с Ca и Mg превращаются в двузамещенные фосфаты - дикальций фосфат ($CaHPO_4$-$2H_2O$) и димагний фосфат ($MgHPO_4$), а в кислой среде в результате взаимодействия с оксидами алюминия и железа - в малорастворимые фосфаты Al и Fe ($AlPO_4$, $Al(OH)_3PO_4$, $FePO_4$, $Fe_2(OH)_3PO_4$ и др.). Химическая фиксация фосфатов, поступивших из внесенных удобрений, удерживает эффективность применяемых фосфорных удобрений на относительно низком уровне и увеличивает издержки сельскохозяйственного производства. Эффективность использования фосфора из удобрений растениями в первый год применения оценивается в пределах 5 - 25% от внесенного количества (Андрианов, 2004; Титова и др., 2005).

В вариантах $(NPK)_{90\text{-}150}$ достоверное увеличение количества подвижных соединений фосфора в почве наблюдали только со II ротации. При внесении NPK в невысоких дозах 30 и 60 кг д.в. каждого элемента/га в первые две ротации наблюдали поддержание исходного уровня подвижных соединений фосфора в почве. Содержание подвижного фосфора стало выше относительно исходного уровня в 2-3 раза во всех вариантах $(NPK)_{30\text{-}150}$ на начало VI ротации (2020-2021 гг.).

Содержание подвижных соединений фосфора в почве было выше контрольного варианта в слое 0-80 см при применении $(NPK)_{90-150}$. Запасы в метровом слое почвы повысились с 3,3 до 4,5-5,2 т/га. При длительном применении фосфорных удобрений в опыте могло произойти постепенное максимально возможное насыщение данным элементом верхнего слоя почвы, что способствовало его миграции по профилю. Другой причиной повышения количества подвижного фосфора по профилю может быть увеличение кислотности почвы в результате длительного применения азотных удобрений. В вариантах с более низкими дозами $(NPK)_{30-60}$ содержание подвижного фосфора выше контроля отмечено в отдельных слоях почвы (40-60, 60-80 см), что может быть связано с применением удобрений, существующей неоднородностью почвенного профиля.

Количество подвижного фосфора в метровом слое почвы было выше относительно целинного аналога в вариантах P_{90}, $(PK)_{90}$, $(NPK)_{60-150}$ (в 1,2-1,3 раза) и на уровне целинного аналога – в варианте $(NP)_{90}$.

Длительное применение суперфосфата привело к увеличению доли подвижного фосфора в почве (слой 0-20 см) – с 17 (контроль) до 22-32 %, азотно-калийных удобрений – уменьшению до 14 %.

Поддержание в почве общих запасов фосфора и его подвижной части на уровне целинного аналога происходило при использовании суперфосфата минимум 60 кг д.в./га ($(NPK)_{60}$).

В *опыте 3* при длительном использовании ОСВ общее содержание фосфора в почве было выше контрольного варианта в 1,1-1,4 раза по всему метровому слою, в основном за счёт его минеральной части (табл. 41). Количество органических соединений фосфора при внесении ОСВ было выше контроля только в пахотном слое почвы (на 27 %). Увеличение содержания подвижного фосфора наблюдали до глубины 60 см – в 1,3-1,9 раза.

Таблица 41 - Влияние длительного применения ОСВ на содержание общего фосфора и его различных форм в дерново-подзолистой почве по профилю (2013 г., V ротация) *(опыт 3)*

Вариант	Общий фосфор, мг/кг					Минеральный фосфор, мг/кг/ % к общему					Органический фосфор, мг/кг/ % к общему					Подвижный фосфор, мг/кг/ % к общему				
	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	785	725	675	785	755	450 57	545 75	570 84	660 84	655 87	335 43	180 25	105 16	125 16	100 13	126 16	140 19	217 32	267 34	305 40
Навоз	840	770	750	750	790	530 63	620 81	640 85	650 87	670 85	310 37	150 19	110 15	100 13	120 15	158 19	180 23	233 31	275 37	318 40
ОСВ	1130	970	865	900	920	705 62	720 74	735 85	770 86	780 85	425 38	250 26	130 15	130 14	140 15	233 21	270 28	283 33	280 31	294 32
NPK – фон	1180	1005	925	920	915	850 72	775 77	780 84	780 85	860 94	330 28	230 23	145 16	140 15	55 6	331 28	302 30	334 36	341 37	340 37
Фон + навоз	1200	1065	955	995	995	910 76	845 79	840 88	870 87	880 88	290 24	220 21	115 12	125 13	115 12	345 29	311 29	352 37	324 33	373 37
Фон + ОСВ	1495	1200	950	965	965	1015 68	775 65	705 74	805 83	840 87	480 32	425 35	245 26	160 17	125 13	398 27	357 30	332 35	375 39	376 39
$НСР_{05}$	96	92	93	76	77	132	125	130	85	63	105	136	Fф<Fт	Fф<Fт	Fф<Fт	65	56	51	60	$F_ф<F_т$

Таблица 42 - Влияние длительного применения ОСВ на запасы общего фосфора и его различных форм в дерново-подзолистой почве по профилю, т/га (2013 г., V ротация) *(опыт 3)*

Вариант	Общий фосфор			Минеральные соединения фосфора			Органические соединения фосфора			Подвижные соединения фосфора		
	0-20	0-40	0-100	0-20	0-40	0-100	0-20	0-40	0-100	0-20	0-40	0-100
Без удобрений	2,0	3,9	10,7	1,1	2,6	8,4	0,8	1,3	2,3	0,3	0,7	3,1
Навоз	2,1	4,2	11,2	1,3	3,0	9,0	0,8	1,2	2,2	0,4	0,8	3,4
ОСВ	2,8	5,4	13,7	1,8	3,7	10,7	1,1	1,7	3,0	0,6	1,3	3,9
NPK – фон	3,0	5,7	14,1	2,1	4,2	11,6	0,8	1,4	2,5	0,8	1,6	4,8
Фон + навоз	3,0	5,9	14,9	2,3	4,6	12,5	0,7	1,3	2,4	0,9	1,6	4,9
Фон + ОСВ	3,7	7,0	15,8	2,5	4,6	11,9	1,2	2,3	4,0	1,0	1,9	5,3
$НСР_{05}$	0,4	0,8	1,1	0,4	0,7	0,9	0,2	0,2	0,5	0,2	0,4	0,8

Запасы общего фосфора и его минеральных соединений в результате применения ОСВ в пахотном слое почвы относительно контрольного варианта увеличились на 0,8, органических на 0,3 т/га, в метровом слое - на 3,0, 2,3 и 0,7 т/га, соответственно (табл. 42). Запасы подвижного фосфора в пахотном слое почвы возросли на 0,3, в метровом слое на 0,8 т/га.

Осадки сточных вод содержат значительное количество фосфора, и поэтому их можно рассматривать, как возможный альтернативный источник данного элемента (Пахненко, 2007; Ott, Rechberger, 2012; Gao et al., 2016; Kecskesova et al., 2020). При правильном выборе доз осадки длительное время могут обеспечивать бездефицитный баланс фосфорного питания (Стратегия использования осадков…, 2002; Пахненко, 2007; Vasbieva, Kosolapova, 2015). По исследованиям немецких ученых закрепление фосфатов в процессе переработке сточных вод иногда достигает существенных размеров, доступность их для растений по сравнению с эквивалентной дозой суперфосфата может снизиться до 25 раз, поэтому их можно рассматривать как медленно действующий источник фосфора (Цуркан и др., 1989). Доля биологически и химически связанного фосфора зависит от технологий, применяемых на очистных сооружениях и вида ОСВ. По некоторым данным во вторичном и сброженном иле фосфор был на 92 и 63 % представлен минеральной формой, в первичном иле - на 72 % органической. Содержание биодоступного фосфора было выше во вторичном и сброженном иле в 3-4 раза, чем в первичном (Zhang et al., 2019). С.Ф. Покровская, В.А. Касатиков (1987) отмечали, что в сырых ОСВ фосфор более доступен для растений, чем после его подсушивания на иловых картах.

Извлечение фосфорных соединений из ОСВ является предметом многочисленных научных исследований, разработано множество технологий (окисление озоном, химическое осаждение, нанофильтрация, термическая обработка, ультразвуковое растворение и другое). В статье X.D. Meng et al. (2018) представлен способ низкотемпературной обработки ОСВ при различном насыщении кислорода (20%, 60%, 100%), который обеспечивает

увеличение общего содержания фосфора в зольном остатке на 45,6%, повышение биодоступности фосфора в 3 раза. Исследования Z.W. Thong et al. (2016) показали, что при извлечении фосфора из ОСВ эффективно применение нанофильтрации. После кислотного растворения ОСВ и фильтрации на специально разработанной мембране извлекалось до 90 % от исходного фосфора. Однако, учитывая сложность и высокую стоимость, большинство технологий были протестированы только в лабораторных условиях или существуют в качестве пилотных проектов (Gao et al., 2016; Kecskesova et al., 2020).

При внесении навоза КРС (насыщенность 5,7 т/га в год) отмечены тенденции к увеличению относительно контрольного варианта общего фосфора и его минеральной части на 7-18 % (в слоях почвы 0-20, 20-40 и 40-60 см) и уменьшению органического на 7-17 % (в слоях почвы 0-20 и 20-40 см). По литературным данным действие навоза на содержание органического фосфора в почве не однозначно. Навоз - существенный источник фосфора, в основном в органической форме. В тех случаях, когда накопление фосфорорганических соединений преобладает над минерализацией (идущих в почве одновременно), особенно при применении высоких доз навоза, имеет место обогащение почвы органическим фосфором. Но внесение навоза в невысоких дозах может способствовать более ускоренной минерализации органического фосфора почвы вследствие усиления микробиологической деятельности (Адрианов, 2004; Титова и др., 2005). Существенного увеличения подвижных соединений фосфора в почве при внесении навоза не наблюдали.

Общее содержание фосфора было выше в сравнении с контрольным вариантом в 1,2-1,5 раз в метровом слое при внесении минеральных удобрений (всего в почву за ведение опыта поступило около 1800 кг фосфора). Запасы общего фосфора и его минеральных соединений в пахотном слое почвы увеличились на 1,0 т/га, в метровом слое - на 3,4 и 3,2 т/га, соответственно. Накопление подвижного фосфора наблюдали в слое 0-80 см.

Важный показатель оценки обеспеченности сельскохозяйственных культур фосфором - степень подвижности фосфатов (концентрация фосфат-ионов, находящихся в почвенном растворе) (Карпинский, Замятина, 1958). Наиболее существенные процессы трансформации и поглощения фосфатов происходят с участием почвенного раствора, в который переходят наиболее подвижные, растворимые формы фосфатов.

Степень подвижности фосфатов в пахотном слое дерново-подзолистой почвы контрольного варианта составила 0,03 мг/л – соответствует низкому уровню содержания легкодоступного фосфора для растений (< 0,04 мг/л).

По данным В.М. Клечковского (1945) минимальная концентрация фосфора, при которой растения могут его усваивать составляет 0,01-0,03 мг/л P_2O_5. Степень подвижности фосфатов уменьшалась с глубиной и составила в слое 80-100 см – 0,01 мг/л (табл. 43). Применение ОСВ увеличило степень подвижности фосфатов с 0,03 до 0,09 мг/л в пахотном слое и с 0,02 до 0,04 мг/л в подпахотном. При внесении навоза КРС степень подвижности фосфатов возросла в слое 0-20 см до 0,06 мг/л. В результате почва перешла в разряд средней обеспеченности доступным фосфором для растений.

Таблица 43 - Влияние длительного применения ОСВ на степень подвижности фосфатов, мг/л (2013 г., V ротация)

Вариант	Слой почвы, см				
	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100
Без удобрений	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01
Навоз	0,06	0,03	0,03	0,02	0,01
ОСВ	0,09	0,04	0,02	0,02	0,02
NPK – фон	0,45	0,04	0,05	0,04	0,03
Фон + навоз	0,78	0,15	0,05	0,03	0,04
Фон + ОСВ	1,28	0,17	0,11	0,09	0,10
$НСР_{05}$	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02

Степень подвижности фосфатов в пахотном слое почвы при длительном внесении минеральных удобрений возросла до 0,45 мг/л, что соответствует высокому уровню обеспеченности растений легкодоступным фосфором.

Влияние ОСВ на фосфатный режим почвы возросло на фоне минеральных удобрений. Отмечено повышение содержания общего фосфора,

его минеральных и органических соединений в слое почвы 0-40 см (относительно фона), подвижного фосфора – в слое 0-20 см. Степень подвижности фосфатов возросла в метровом слое.

Внесение ОСВ по фону минеральных удобрений обеспечило поддержание общих запасов фосфора и его органических соединений в почве на уровне целинного аналога.

Полученные результаты в *опыте 3* свидетельствуют об изменении общего количества фосфора в результате применения минеральных удобрений и ОСВ относительно контрольного варианта до глубины 1 метр. Однако если сравнить с целинной почвой, то скорее следует говорить о сдерживании в результате применения удобрений процессов деградации происходящих в почве. В слое почвы 60-100 см разница между содержанием соединений фосфора по вариантам опыта и целинной почвой не большая, возможно имеет место генетическая неоднородность. Более достоверные изменения показателей фосфатного режима почвы в результате применения удобрений отмечены в слое 0-60 см.

В соответствии со сложившимся представлением, фосфор обладает низкой способностью к миграции вследствие быстрой абиотической фиксации фосфора в труднорастворимых минеральных соединениях (Адрианов, 2004; Сычёв, Кирпичников, 2009), фосфор слабо передвигается из пахотного слоя в нижележащие горизонты (Афанасьев, Мёрзлая, 2013; Brogowski, Chojnicki, 2020). Однако есть исследования, которые показывают, что фосфор способен к перемещению вниз по профилю и в первую очередь это связывают с интенсивным и систематическим применением удобрений (Кириллова, Жукова, 2004; Минеев, Гомонова, 2009; Шустикова, Шаповалова, 2014; Бойко и др., 2015; Ciapparelli et al., 2016). Миграция фосфора может быть как пассивной (в составе частиц ила, физической глины), так и активной в растворе почвенной влаги (Титова и др., 2005). Перемещение фосфора вниз по профилю может быть связано с миграцией органических соединений, с механическим воздействием (обработка почвы,

рост корневой системы) (Носко, Христенко, 1996; Шустикова, Шаповалова, 2014). В работах В.А. Аргуновой (1974), А.Ю. Кудеяровой (2012, 2016) отмечено, что в кислых почвах при повышенной фосфатной нагрузке образуются соединения фосфора, связанные с железом и алюминием, обладающие повышенной миграционной способностью. По данным Н.П. Чижиковой с соавторами (2008) анионы фосфорных удобрений (суперфосфата) оказывают разрушающее воздействие на находящиеся с ним в контакте глинистые минералы, происходит деструктирование слоистых силикатов и образование более мобильных металлоорганических соединений фосфора.

Изучение корреляционных связей между показателями фосфатного режима показало, что для целинной почвы характерна очень высокая связь между общим содержанием в почве фосфора и его органическими соединениями (табл. 44). Экстенсивное возделывание сельскохозяйственных культур (без применения удобрений) изменило данную зависимость - установлена прямая корреляционная зависимость средней силы для общего фосфора и его минеральной части. При внесении удобрений установлена прямая высокая корреляционная связь общего фосфора, как с минеральными, так и органическими его соединениями.

Таблица 44 - Корреляционные зависимости между содержанием в почве общего фосфора, его формами (мг/кг) и степенью подвижности фосфатами (мг/л) целинной и пахотной почвы по профилю

Показатель	Злаково-разнотравный луг	Полевой севооборот (без удобрений)	Полевой севооборот (удобрения)
$P_{мин}$	0,3	0,6*	0,8*
$P_{орг}$	1,0*	0,2	0,7*
$P_{подв}$	-0,7*	0,0	0,5*
Степень подвижности фосфатов	0,0	0,2	0,8*

* - существенный ($p<0,05$) .

Таким образом, сравнение целинной и пахотной почвы (без применения удобрений) по профилю показало, что при экстенсивном возделывании сельскохозяйственных культур произошло уменьшение в слое

0-40 см на 10-35 % общих запасов фосфора, его минеральных и органических соединений, в метровом слое почвы - на 18 % запасов подвижных соединений фосфора. Отмечено в метровом слое почвы уменьшение доли подвижного фосфора от его общего количества.

Закономерности изменения в почве общего содержания фосфора, его органических и минеральных соединений не зависели от вида применяемых систем удобрения, выровненных по элементам питания (органической, минеральной, органоминеральной). Влияние оказывала насыщенность пашни удобрениями. Накопление минеральных соединений фосфора (относительно контрольного варианта) наблюдали в пахотном слое почвы, как при умеренной насыщенности пашни навозом (10 т/га в год), так и высокой (20 т/га в год) или внесении соответствующего эквивалентного количества NPK. Увеличение количества органических соединений фосфора происходило только при более высокой насыщенности пашни удобрениями. Вид системы удобрения оказал влияние на содержание подвижного фосфора в почве. Увеличение количества подвижного фосфора в почве наблюдали в слое 0-40, 0-60 или 0-80 см при длительном применении минеральной и органоминеральной систем удобрений, что может быть связано с повышением уровня кислотности почвы в результате применения физиологически кислых азотных удобрений. Использование органической системы удобрения привело к увеличению содержания подвижного фосфора в почве только в пахотном слое (0-20 см).

Влияние на изменение показателей фосфатного режима почвы оказало различное сочетание азотных, фосфорных и калийных удобрений. Длительное применение суперфосфата (P_{90}, $(PK)_{90}$, $(NP)_{90}$, $(NPK)_{90}$) привело к достоверному увеличению в пахотном слое почвы (относительно контрольного варианта/исходного уровня) общего содержания фосфора, его минеральной части в 1,3-1,8 раза, подвижной части в 1,9-2,7 раза. Влияние на обогащение почвы органическими соединениями фосфора оказывало применение азотно-калийных удобрений (N_{90}, $(NK)_{90}$). Содержание

минеральных и органических соединений фосфора в пахотном слое почвы возрастало при применении полного минерального удобрения $(NPK)_{90}$. Различное сочетание P с N и K влияло на интенсивность накопления подвижных соединений фосфора в почве по ротациям и изменению его количества по профилю. Отмечено, что калий хлористый способствовал миграции фосфора из удобрений по профилю и/или замещению фосфора из его труднодоступных соединений.

Длительное применение азотных и калийных удобрений (N_{90}, K_{90}, $(NK)_{90}$) с течением времени привело к увеличению в пахотном слое почвы подвижных соединений фосфора. При внесении азотных удобрений это происходит в результате подкисления почвы. При использовании 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. Применение азотных удобрений и их сочетание с калием хлористым привело к обеднению подвижными соединениями фосфора подпахотного слоя.

Общее содержания фосфора в почве и его различных соединений (минеральных, органических, подвижных) возрастало при использовании нетрадиционного органического удобрения ОСВ. Максимальное положительное влияние отмечено при использовании ОСВ по фону минеральных удобрений.

Установлено что в первую ротацию севооборота даже при внесении высоких доз минеральных (NPK) или органических удобрений в почве не наблюдали достоверного повышения подвижных соединений фосфора, т.к. в почве происходило их быстрое закрепление. Далее в почве наблюдали либо поддержание подвижных соединений фосфора на исходном уровне, либо увеличение со II, III или IV ротаций севооборота, скорость и интенсивность накопления зависели от насыщенности пашни удобрениями. Рост количества подвижных соединений фосфора с первой ротации севооборота, наблюдали

только при внесении суперфосфата в чистом виде. Длительное применение удобрений привело к увеличению доли подвижного фосфора 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 общих 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 длительном применении навоза 20 т/га в год, навоза 10 и 20 т/га в год + NPK эквивалентно навозу, ОСВ в сочетании с NPK наблюдали поддержание запасов органических соединений фосфора на уровне целинной почвы.

Накопление общего фосфора 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

Охарактеризовать фосфатный режим почвы в полной степени позволяет определение фракционного состава минеральных фосфатов, который отражает генетические особенности почвы и влияние длительного внесения удобрений на закрепление остаточных фосфатов минеральной частью почвы.

Фракционный состав минеральных фосфатов определяли методом Гинзбург–Лебедевой, который позволяет выделить пять фракций: фосфаты железа (Fe–P), фосфаты алюминия (Al–P), и три фракции фосфатов кальция ($Ca–P_I$, $Ca–P_{II}$, $Ca–P_{III}$), различающихся по основности, степени окристаллизованности и, следовательно, по растворимости и доступности растениям: $Ca–P_I$ – фосфаты щелочных и щелочноземельных металлов,

аммония, Ca–P_{II} – разноосновные фосфаты кальция (магния), Ca–P_{III} – труднорастворимые высокоосновные фосфаты кальция типа апатита (Гинзбург, 1981).

Исследования фракционного состава минеральных соединений фосфора целинной дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы показали, что наибольшую долю в их составе в верхнем горизонте почвы занимали фосфаты железа (типа стренгита, диффренита и др.) – 53% (рис. 28). Следующей шла фракция фосфатов кальция (Ca–P) – 38%. Высокое содержание фосфатов железа объясняется повышенным содержанием железа в данных почвах (Адрианов, 2004; Титова и др., 2005). Характерной особенностью почвы, сформированной на богатых в минералогическом отношении пермских глинах, является высокое содержание обменных форм кальция и магния, что объясняет высокое содержание Ca–P в почве. Фосфаты алюминия (типа варисцита, ваввелита и др.) составили 9% от общего содержания минеральных фосфатов. Фосфаты кальция первой группы (Ca-P_I) самой доступной для растений занимали 5 %.

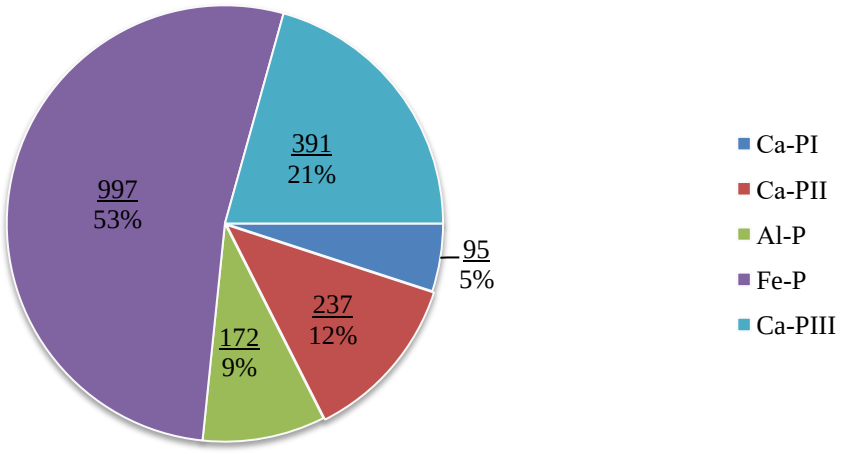


Рисунок 28 - Фракционно-групповой состав минеральных фосфатов дерново-подзолистой почвы под злаково-разнотравным лугом (0-20 см), мг/кг (%)

Количество Fe–P и Ca–P_{III} в почве в верхнем слое (0-20 см) было ниже по сравнению с целинным аналогом при экстенсивном возделывании сельскохозяйственных культур (в 1,2-1,5 и 1,4 раза, соответственно) (табл. 45-47). Содержание Al–P либо сохранилось на уровне целинной почвы, либо

наблюдали тенденции к уменьшению. Количество наиболее доступных для растений фракций – рыхлосвязанных и разноосновных фосфатов кальция в пахотной почве варьировало. Наблюдали как более низкое содержание относительно целинной почвы (в 1,3-1,7 раза) – такие результаты получены в *опытах 1 и 3*, где исследования фосфатного режима проводили в посевах зерновых культур; так и более высокое (в 1,3-1,4 раза) – результаты получены в *опыте 2*, где изучение фосфатного режима проводили в посадках картофеля. В последнем случае более высокое содержание $Ca–P_{I}$ и $Ca–P_{II}$ может быть связано с интенсивной обработкой почвы и соответственно более высокой минерализацией органических соединений фосфора. Доля фосфатов железа при экстенсивном возделывании сельскохозяйственных культур в пахотном слое почвы составила 40-60%, фосфатов кальция - 31-48 % и фосфатов алюминия – 9-13 % (в среднем – 48, 41, 11 % соответственно).

Сумма всех фракций минеральных фосфатов дает представление об общих запасах минерального фосфора в почве. Однако эта сумма близка к содержанию валового фосфора исследуемой почвы. Авторы метода считают, что во всех фракциях присутствует и часть органических соединений фосфора, так как четкого разграничения между органическими и минеральными фосфатами в почвенных вытяжках невозможно. Другие исследователи полагают, что практически все органические соединения фосфора входят в группу алюмофосфатов (Кудеярова, 1995). Сумма минеральных фосфатов в пахотной почве (без удобрений) была на 26-36 % ниже целинного аналога.

Известно, что для растений наиболее предпочтительной формой существования фосфора в почвах являются его соединения с кальцием. Несмотря на слабую степень подвижности фосфат-иона из Ca-содержащих соединений, они используются растениями даже при значительно меньшем насыщении почвы фосфором (Адрианов, 2004; Титова и др., 2005; Сычёв, Кирпичников, 2009). Считается, что соотношение суммы фосфатов кальция $Ca–P_{I}$ + $Ca-P_{II}$ и суммы фосфатов полуторных оксидов (Al-P + Fe-P) отражает

особенности фосфатного режима почвы, чем выше эта величина, тем доступнее фосфор растениям (Убугунов и др., 2015). В почве злаково-разнотравного луга соотношение варьировало в пределах 0,26-0,30. При возделывании сельскохозяйственных культур без применения удобрений величина соотношения изменялась от 0,20 до 0,60, т.е. была близкой к целинному аналогу или выше.

В *опыте 1* количество самой подвижной фракции фосфатов кальция $Ca–P_I$ в пахотном слое (0-20 см) почвы при использовании органической, минеральной, органоминеральной систем удобрения было выше контрольного варианта в 1,3-2,3 раза (табл. 45). Наибольшее содержание фракции $Ca–P_I$ отмечено в варианте «навоз 20 т/га в год + NPK эквивалентно навозу».

Таблица 45 - Влияние различных систем удобрений на содержание фракций минеральных фосфатов дерново-подзолистой почвы (V ротация) *(опыт 1)*

Вариант	$Ca-P_I$	$Ca-P_{II}$	Al-P	Fe-P	$Ca-P_{III}$	Сумма минеральных фосфатов	$\frac{Ca–P_I + Ca-P_{II}}{Al-P + Fe-P}$
	мг/кг						
Контроль	97[1] 8	166 14	155 13	542 45	251 21	1210	0,38
Навоз 10 т/га	173 12	218 15	133 9	664 46	241 17	1429	0,49
Навоз 20 т/га	167 12	177 13	117 9	653 48	235 17	1348	0,45
NPK экв. 10 т навоза	129 10	154 12	96 7	645 49	293 22	1317	0,38
NPK экв. 20 т навоза	137 10	173 12	148 11	715 52	212 15	1385	0,36
Навоз 5 т+NPK экв.	147 13	151 13	81 7	538 47	237 21	1154	0,48
Навоз 10 т + NPK экв.	143 12	171 14	144 12	536 44	238 19	1232	0,46
Навоз 20 т + NPK экв.	222 14	178 11	167 11	741 47	281 18	1588	0,44
$НСР_{05}$	32	27	20	115	40	129	-

1 – над чертой – содержание фракций фосфора в почве, мг/кг; под чертой - % к общему содержанию фосфора.

Содержание фракции $Ca-P_{II}$ в пахотном слое почвы при внесении удобрений существенно не изменялось, находилось на уровне контрольного

варианта. Исключение составил вариант «навоз 10 т/га в год», здесь количество Ca-P_{II} было выше в 1,3 раза, что, возможно, связано с особенностями сложившихся почвенных условий, повлиявших на структуру фосфорных соединений. При использовании удобрений отмечена тенденция уменьшения фракции Al-P. Исключение составил вариант «NPK эквивалентно навозу 20 т/га в год». Количество Al–P сохранилось на уровне контроля. Устойчивость различных минеральных соединений фосфора, в том числе Al-P, в значительной степени зависит от почвенных условий, в частности, от кислотности. В варианте с NPK в дозе эквивалентной 20 т/га навоза в год наблюдали существенное подкисление почвы.

Содержание железофосфатов в почве выше контрольного варианта отмечено при внесении навоза 10 и 20 т/га в год, NPK эквивалентно навозу 10 и 20 т/га в год и навоза 20 т/га в год + NPK эквивалентно навозу. Здесь количество Fe–P возросло в 1,2-1,4 раза. Между фосфатами железа и алюминия часто наблюдается перегруппировка, поэтому при незначительном изменении в содержании алюмофосфатов, наблюдается увеличение количества железофосфатов (Титова и др., 2005). Это может быть связано с разрушением железогуматного комплекса почвы под влиянием больших доз удобрений (Кудеярова, 1995), высокой химической активностью оксидов железа (Титова и др., 2005). Увеличение количества железофосфатов также может быть связано с поступлением в почву железа с удобрениями.

Содержание фракции Ca-P_{III} было достоверно выше контроля в 1,1-1,2 раза в вариантах NPK эквивалентно 10 т/га навоза и навоз 20 т/га в год + NPK эквивалентно навозу.

Применение органической и органоминеральной систем удобрения способствовало увеличению в пахотном слое почвы доли подвижных фракций фосфатов (сумма Ca–P_I и Ca-P_{II}) с 22 (контрольный вариант) до 25-27 %. Полученные результаты подтверждаются исследованиями других авторов (Гинзбург, 1981; Титова и др., 2005; Li et al., 2020).

Применение всех систем удобрений оказало влияние на трансформацию соединений фосфора в почве, переход их из одной группы в другую. Сумма минеральных фосфатов была достоверно выше контрольного варианта при использовании органической системы удобрения, применении NPK эквивалентно навозу 20 т/га в год и навоза 20 т/га в год + NPK в эквивалентном количестве (на 11-31 %). Максимальное содержание в опыте суммы минеральных фосфатов отмечено при внесении навоза 20 т/га в год + NPK в эквивалентном количестве. Сумма минеральных фосфатов в данном варианте приблизилась к уровню целинного аналога. Остаточный фосфор удобрения (расчёты проведены разностным методом, по сравнению с контролем) распределился в основном между фракциями Fe-P и Ca-P_I. В работах М.И. Макарова (1996, 2004) отмечается, что в кислых почвах преобладает взаимодействие фосфатной группы органической молекулы с Fe и AI. Также показано преимущественное участие Fe в хемосорбции минерального ортофосфата.

Исследования фракционно-группового состава минеральных фосфатов проводили в образцах почвы, отобранных в V ротации, а общее содержание фосфора, его минеральных и органических соединений в конце VI ротации, поэтому результаты отличаются. В VI ротации влияние удобрений более ярко выражены.

Применение органической и органоминеральной систем удобрения повысило соотношение фосфатов кальция к фосфатам полуторных оксидов в пахотном слое почвы до 0,44-0,49. При внесении только минеральных удобрений величина соотношения в пахотном слое почвы не изменилась.

В *опыте 2* под воздействием возрастающих доз полного минерального удобрения наблюдали количественные и качественные изменения минерального состава фосфатов (табл. 46). При внесении $(NPK)_{60-150}$ достоверно увеличилось количество наиболее доступных для растений фосфатов кальция I и II группы (Ca-P_I и Ca-P_{II}) в 1,7-2,2 и 1,1-1,4 раза, соответственно. Содержание фракции железофосфатов во всех вариантах с

удобрениями было выше контрольного в 1,2-1,3 раза. Менее всего претерпели изменение группа алюмофосфатов и фосфаты кальция III группы ($Ca\text{-}P_{III}$), в которую входят высокоосновные фосфаты кальция типа апатита. Увеличение содержания данных групп отмечено только при внесении высоких доз $(NPK)_{120\text{-}150}$. В этих вариантах наблюдали увеличение всех фракций фосфора в 1,2-2,2 раза.

Таблица 46 - Фракционный состав минеральных фосфатов дерново-подзолистой почвы при длительном применении возрастающих доз полного минерального удобрения, 0-20 см (V ротация, 2012 г.)

Вариант	$Ca\text{-}P_I$	$Ca\text{-}P_{II}$	Al-P	Fe-P	$Ca\text{-}P_{III}$	Сумма минеральных фосфатов	$\frac{Ca\text{–}P_I + Ca\text{-}P_{II}}{Al\text{-}P + Fe\text{-}P}$
Без удобрений	137[1] 10	300 21	168 12	560 40	235 17	1399	0,60
$(NPK)_{30}$	193 12	332 20	184 11	689 42	255 15	1653	0,60
$(NPK)_{60}$	227 13	337 20	179 10	728 42	250 15	1720	0,62
$(NPK)_{90}$	233 14	360 22	165 10	682 41	233 14	1672	0,70
$(NPK)_{120}$	294 15	405 21	211 11	700 37	308 16	1917	0,77
$(NPK)_{150}$	307 15	414 20	315 15	697 34	312 15	2044	0,71
$НСР_{05}$	72	36	28	80	54	144	-

1 – над чертой – содержание фракций фосфора в почве, мг/кг; под чертой - % к общему содержанию фосфора.

Фосфор удобрений на 35-60% закрепился в виде $Ca\text{-}P_I$ и $Ca\text{-}P_{II}$ и на 20-50% в виде фракции Fe-P. При минимальной дозе $(NPK)_{30}$ остаточный фосфор закрепился в большей степени во фракции Fe-P, при максимальной дозе $(NPK)_{150}$ - в составе фракций $Ca\text{-}P_I$ и $Ca\text{-}P_{II}$.

Максимальные значения соотношения суммы фосфатов кальция ($Ca\text{–}P_I$ + $Ca\text{-}P_{II}$) и суммы фосфатов полуторных оксидов (Al-P + Fe-P) (0,71-0,77) получены при внесении более высоких доз $(NPK)_{90\text{-}150}$. В *опыте 2* отмечена максимальная величина соотношения суммы фосфатов кальция и суммы фосфатов полуторных оксидов по сравнению с другими опытами. Возможно,

это связано с тем, что исследования проводили в посадках картофеля. Интенсивная обработка почвы могла повлиять на подвижность фосфатов.

Применение $(NPK)_{60-150}$ привело к увеличению в почве доли подвижных фракций фосфатов (сумма Ca–P_I и Ca-P_{II}) с 31 (контрольный вариант) до 33-36 %.

В *опыте 3* при внесении ОСВ содержание всех фракций минеральных фосфатов было достоверно выше относительно контрольного варианта в 1,2-1,6 раза, при внесении КРС наблюдали более высокое содержание Ca-$P_{I,}$ Ca-P_{II} и Al-P в 1,2-1,7 раза (табл. 47). Полученные результаты связаны с разным химическим и качественным составом применяемых органических удобрений. Минеральная часть осадков представлена в основном соединениями кальция, алюминия, железа и кремния. При внесении ОСВ в течение пяти ротаций в почву поступило около 2 т фосфора, с навозом в почву было внесено всего около 0,8 т фосфора.

Таблица 47 - Влияние длительного применения ОСВ на содержание фракций минеральных фосфатов дерново-подзолистой почвы, 0-20 см (V ротация, 2013 г.)

Вариант	Ca-P_I	Ca-P_{II}	Al-P	Fe-P	Ca-P_{III}	Сумма минеральных фосфатов	$\frac{Ca–P_I + Ca\text{-}P_{II}}{Al\text{-}P + Fe\text{-}P}$
Контроль	$\frac{26^1}{2}$	$\frac{152}{12}$	$\frac{116}{9}$	$\frac{771}{60}$	$\frac{224}{17}$	1289	0,20
Навоз	$\frac{43}{3}$	$\frac{216}{15}$	$\frac{138}{9}$	$\frac{857}{59}$	$\frac{206}{14}$	1459	0,26
ОСВ	$\frac{42}{3}$	$\frac{185}{11}$	$\frac{179}{11}$	$\frac{991}{59}$	$\frac{283}{17}$	1680	0,19
NPK -фон	$\frac{95}{5}$	$\frac{241}{12}$	$\frac{167}{9}$	$\frac{1106}{57}$	$\frac{334}{17}$	1943	0,26
Фон +навоз	$\frac{184}{12}$	$\frac{186}{12}$	$\frac{145}{9}$	$\frac{774}{49}$	$\frac{292}{18}$	1580	0,40
Фон + ОСВ	$\frac{228}{12}$	$\frac{323}{17}$	$\frac{185}{10}$	$\frac{880}{46}$	$\frac{286}{15}$	1902	0,52
$НСР_{05}$	12	8	14	90	22	108	-

1 – над чертой – содержание фракций фосфора в почве, мг/кг; под чертой - % к общему содержанию фосфора.

При внесении NPK в течение пяти ротаций полевого семипольного севооборота (I ротация – $N_{120}P_{120}K_{120}$, II ротация – $N_{90}P_{90}K_{90}$, III–V ротации –

$N_{60}P_{60}K_{60}$) содержание всех фракций минеральных фосфатов в почве было достоверно выше контрольного варианта в 1,4-3,7 раза. Доля Ca-P_I в составе минеральных фосфатов возросла с 2 до 5 %. Остаточные фосфаты закрепились в большей степени в виде Fe-P и Ca-P_{III}.

Применение навоза КРС по фону минеральных удобрений оказало существенное влияние на изменение Ca-P_I. Отмечено увеличение самой доступной для растений фракции фосфора, связанной с щелочными и щелочноземельными металлами, в слое почвы 0-20 см в 1,9 раза (к фону). Внесение ОСВ по фону минеральных удобрений достоверно повысило содержание в почве Ca-P_I (в 2,4 раза) и Ca-P_{II} (в 1,3 раза).

Применение ОСВ и навоза в сочетании с минеральными удобрениями по-разному сказалось на закреплении остаточных фосфатов. При совместном внесении навоза и NPK остаточные фосфаты закрепились в виде групп Ca-P. Сочетание ОСВ и минеральных удобрений привело в большей степени к закреплению фосфатов в группах Ca-P_I, Ca-P_{II} и Al-P.

Длительное применение ОСВ, навоза и минеральных удобрений привело к существенному увеличению в дерново-подзолистой почве доли подвижных фракций фосфатов (сумма Ca–P_I и Ca-P_{II}) с 14 (контрольный вариант) до 17-29 %.

Длительное внесение навоза, минеральных удобрений повысило соотношение в пахотном горизонте почвы суммы фосфатов кальция Ca–P_I + Ca-P_{II} и суммы фосфатов полуторных оксидов (Al-P + Fe-P) с 0,20 (контроль) до 0,26, применение органоминеральной системы удобрения (навоз+NPK, ОСВ+NPK) обеспечило увеличение величины соотношения до 0,40-0,52. В варианте с ОСВ соотношение суммы фосфатов кальция Ca–P_I + Ca-P_{II} и суммы фосфатов Al-P + Fe-P сохранилось на уровне контроля.

В *опыте 3* наблюдали более высокое содержание Fe-P и более низкое Ca–P_I по сравнению с *опытами 1* и *2*. Полученные результаты могут быть связаны с известкованием почвы. В опытах 1 и 2 перед закладкой опыта проводили известкование почвы по 1,0 Нг, в опыте 3 известкование не

проводили. В опытах 1 и 2 доля фосфатов железа контрольных вариантов составила 40-45 %, в опыте 3 – 60 %.

Проведен корреляционный анализ между показателями фосфатного режима почвы и другими её агрохимическими свойствами (прил. 10-12). Содержание общего, органического фосфора, фракции Ca–P_I в почве и степень подвижности фосфатов достоверно коррелировало с содержанием в ней органического углерода. Прямые высокие и очень высокие связи между данными показателями отмечены в пахотном слое и/или метровом слое (r = 0,7-0,9). Чётких закономерностей по влиянию показателей кислотности почвы на содержание в ней различных соединений фосфора не выявлено.

Наблюдали прямые высокие корреляционные зависимости между содержанием по профилю почвы органических соединений фосфора и $C_{орг}$ (r=0,9), высокие и очень высокие (r=0,8-0,9) – с количеством общего азота, его легкогидролизуемой фракцией и средние (r=0,6) – с минеральной фракцией азота.

Таким образом, длительное возделывание сельскохозяйственных культур без применения удобрений в большей степени повлияло на содержание в почве фракции Fe–P и Ca–P_{III}, наблюдается их уменьшение по сравнению с целинным аналогом в 1,2-1,5 раза. Содержание Al–P и наиболее доступных для растений фракций – рыхлосвязанных и разноосновных фосфатов кальция в пахотной почве варьирует, может быть на уровне, выше или ниже содержания в целинной почве и зависит 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. Применение удобрений оказало влияние на трансформацию соединений фосфора в почве, переход их из одной группы в другую. В почве в результате применения удобрений наблюдали увеличение доли подвижных фракций фосфатов кальция (сумма Ca–P_I и Ca-P_{II}). Отмечены тенденции уменьшения доли фракции Fe–P и Ca–P_{III} (относительно контрольного варианта).

Длительное возделывание сельскохозяйственных культур без применения удобрений приводит к снижению в почве общего содержания фосфора, его минеральных, органических и подвижных соединений. Существенно снижается доля органических соединений в почве. Полученные результаты связаны, как с выносом растениями фосфора, так и изменениями, происходящими в профиле почвы в результате сельскохозяйственного использования (обработка почвы, известкование). Применение минеральных (NPK) и органических удобрений обеспечило поддержание общих запасов фосфора в почве на уровне целинного аналога или наблюдали их существенный рост. Увеличение общих запасов в почве происходило в большей степени за счёт его минеральной части. Только высокая насыщенность пашни органическими и минеральными удобрениями обеспечивала поддержание запасов органических соединений фосфора на уровне целинной почвы. Фосфорные удобрения увеличивали количество минеральных и подвижных соединений фосфора в почве. Азотные и калийные удобрения отвечали за накопление органических соединений фосфора. Применение удобрений повысило степень подвижности фосфатов в почве, увеличило долю подвижных фракций фосфатов кальция. Глубина миграции фосфорных соединений по профилю почвы зависела от насыщенности пашни удобрениями, вида удобрений, системы удобрений.

6 КАЛИЙНЫЙ РЕЖИМ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПАШНИ И ПРИМЕНЕНИИ УДОБРЕНИЙ

К числу приоритетных и требующих пристального внимания направлений исследований в аграрной науке относится изучение калийного режима почв (Никитина, 2018; Шафран, Кирпичников, 2019; Якименко, 2019). Исследования показали, что в целинной дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве под злаково-разнотравным лугом в верхнем слое (0-20 см) валовое содержание калия варьировало от 19125 до 20525 мг/кг и в среднем составило 19825 мг/кг (табл. 48).

Таблица 48 - Валовое содержание калия, его легкообменные, подвижные и необменные соединения в почве злаково-разнотравного луга

Слой почвы	Валовое содержание калия	Необменные соединения калия	Подвижные соединения калия	Легкообменные соединения калия	Отношение содержания необменных соединений калия к содержанию подвижных соединений
Содержание, мг/кг (% от валового)					
0-20	19825±700	830±76 4,2	289±45 1,5	24,1±4,0 0,12	2,9
20-40	18600±400	690±23 3,7	210±15 1,0	15,5±0,9 0,08	3,3
40-60	21500±900	630±51 2,9	191±21 0,9	11,9±1,4 0,06	3,3
60-80	21800±850	715±38 3,3	189±15 0,9	11,9±1,2 0,05	3,8
80-100	21600±850	630±41 2,9	186±22 0,9	12,6±0,6 0,06	3,4
Запасы[1]					
0-20	46	1,9	0,7	55	-
0-40	88	3,5	1,1	90	-
0-100	245	8,3	2,5	180	-

[1]- запасы легкообменных соединений калия представлены в кг/га, запасы валового калия, его подвижных, необменных соединений – т/га.

В слое 20-40 наблюдали небольшое уменьшение его содержания – до 18600 мг/кг. Это связано с тем, что при отборе проб по слоям сюда вошёл горизонт A_2B (22-28 см) – здесь отмечено наименьшее количество валового калия (17600 мг/кг) по сравнению с другими генетическими горизонтами.

Далее с глубиной количество валового калия в почве злаково-разнотравного луга возрастало и в слое 40-100 см составило 21500-21800 мг/кг.

Валовое содержание калия отражает потенциальный почвенный запас данного элемента. Доступность калия растениям определяется прочностью его связи с минеральной основой почвы. Калийный фонд почвы подразделяют на различные формы: легкообменную, подвижную, необменную и калий почвенного скелета (Якименко, 2003; Лукин, 2012). Первые три формы калия взаимосвязаны, они подвижны и могут изменяться под действием природных и антропогенных факторов, поэтому их изучение наиболее целесообразно.

В составе калийного фонда верхнего слоя почвы (0-20 см) под злаково-разнотравным лугом легкообменные формы составили 0,1 % от валового содержания калия, подвижные - 1,5 %, необменные – 4,2 %. Остальные 94,2 % составил калий почвенного скелета. Считается, что такой калий прочно связан с минеральной частью почвы и не принимает активного участия в питании растений. Количество необменных, подвижных и легкообменных соединений калия в более глубоких слоях почвы относительно верхнего горизонта было ниже на 14-24, 27-36, 36-51 %, соответственно.

Характер распределения валового калия и его различных форм по профилю при бессменном паровании почвы отличался от целинной, что связано с постоянной обработкой почвы и отсутствием растительного покрова (табл. 49). Валовое содержание калия было ниже целинного аналога почти на 10 % в слое почвы 0-20 см, выше на 7 % - в слое 20-40 см. Также наблюдали снижение его количества в слое 80-100 см. Полученные результаты можно объяснить припахиванием к верхнему слою подзолистого горизонта, который характеризуется более низким валовым содержанием калия (Коротаев, 1962; Середина, 2007), а также разрушением калий содержащих минералов и переносом калийных соединений по профилю (Беляев, 2005; Воробьёв, 2016; Шаповалова и др., 2018).

Таблица 49 - Валовое содержание калия, его легкообменные, подвижные и необменные соединения в почве бессменного чистого пара

Слой почвы	Валовое содержание калия	Необменные соединения калия	Подвижные соединения калия	Легкообменные соединения калия	Отношение содержания необменных соединений калия к содержанию подвижных соединений
Содержание, мг/кг (% от валового)					
0-20	18200±700	850±61 4,7	221±22 1,2	15,6±0,5 0,09	3,9
20-40	19900±650	860±31 4,3	193±18 1,0	12,3±0,1 0,06	4,4
40-60	20700±1030	810±42 3,9	144±15 0,7	4,2±0,2 0,02	5,6
60-80	22600±800	850±22 3,8	142±12 0,6	5,1±0,3 0,02	6,0
80-100	18200±950	865±19 4,3	135±21 0,7	4,6±0,3 0,02	6,4
Запасы[1]					
0-20	46	2,1	0,6	39	-
0-40	98	4,4	1,1	71	-
0-100	282	12,0	2,3	113	-

[1]- запасы легкообменных соединений калия представлены в кг/га, запасы валового калия, его подвижных, необменных соединений – т/га.

Количество подвижных и легкообменных соединений калия в почве бессменного чистого пара по всему метровому слою было ниже, чем в почве злаково-разнотравного луга в 1,1-1,4 и 1,3-2,8 раза, соответственно. Содержание необменных соединений наоборот увеличилось в 1,2-1,4 раза (с глубины 20-40 см). Полученные данные могут быть связаны с миграцией подвижных соединений калий за пределы метрового слоя и переходом подвижной формы калия в необменную. Увеличение количества необменной формы калия также могло происходить в результате разрушения калийных соединений минерального скелета почвы.

Уменьшение валового содержания калия в пахотном слое, как и в почве бессменного чистого пара, отмечено при длительном возделывании сельскохозяйственных культур без применения удобрений (табл. 50, 55, 60). Интенсивность процесса была выше, что связано с выносом элемента растениями. Уменьшение валового содержания калия в слое 0-20 см относительно целинного аналога составило 13-20 %, запасы снизились на 3-5

т/га. Также как и в почве бессменного чистого пара, отмечено более низкое количество легкообменных и подвижных соединений калия по всему метровому слою - в 1,6-9,7 и 1,1-2,4 раза, соответственно. Запасы легкообменной формы калия уменьшились в слое 0-20 см с 71 (злаково-разнотравный луг) до 50-59 кг/га, в метровом слое с 180 до 68-114 кг/га (в среднем на 39 и 49 %, соответственно). Основные потери подвижной формы калия пришлись на слой 0-20 см, её запасы уменьшились с 0,7 до 0,3-0,4 т/га.

Не установлено чётких закономерностей в изменении необменной формы калия в пахотном слое почвы. Здесь наблюдали отсутствие изменений в содержании необменных соединений, увеличение (в 1,3 раза) или уменьшение (в 1,8 раза) относительно почвы злаково-разнотравного луга. Полученные результаты могут быть связаны с режимом влажности почвы. В научной литературе отмечается, что процессы увлажнения-высыхания влияют на фиксацию калия почвенными минералами (Пчёлкин, 1966; Лямцева, 2008). Также влияние мог оказать фактор известкования. Низкое содержание необменных соединений калия отмечено в почве, где известкование перед закладкой опыта не проводили. По некоторым данным проведение известкования повышает в почве количество необменных соединений калия (Прокошев В.В., 1962; Минеев и др., 2013; Кожокина, Мязин, 2019). Далее по профилю отмечали увеличение необменной формы калия относительно целинного аналога в 1,1-2,3 раза.

Бессменное парование почвы и экстенсивное возделывание сельскохозяйственных культур привело к увеличению в почве доли необменных соединений калия и уменьшению доли подвижных и легкообменных соединений по всему метровому слою.

Соотношение содержания необменных соединений калия к подвижным - отражает степень истощенности почвы, ее текущее калийное состояние и специфику трансформации форм этого элемента (Якименко, 2003). Чем выше эта величина, тем сильнее почва истощена в отношении подвижных (доступных для растений) соединений калия. Соотношение необменной

формы к подвижной в пахотном слое в почве постоянного чистого пара и при возделывании культур без применения удобрений расширилось с 2,9 (луг) до 3,8-8,1. Увеличение соотношения наблюдали в метровом слое.

Содержание подвижных соединений калия в почве на сегодняшний день остается важнейшим диагностическим показателем, определяющим уровень калийного питания растений. Изучение динамики содержания подвижных соединений калия (по Кирсанову) в пахотном слое при возделывании сельскохозяйственных культур без применения удобрений по ротациям, показало уменьшение их количества от исходного уровня через 35-50 лет на 18-42% (рис. 29).

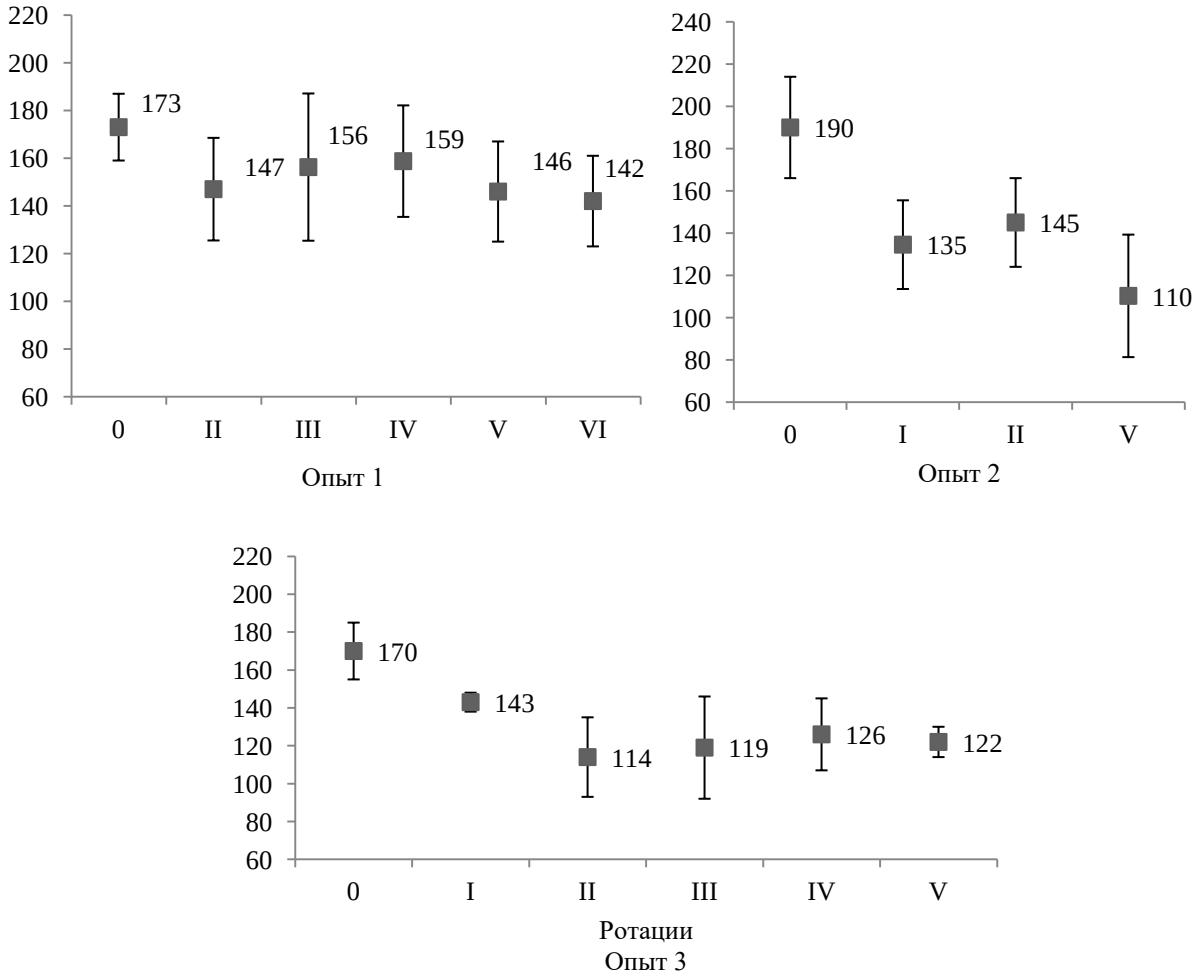


Рисунок 29 - Динамика содержания подвижных соединений калия в пахотном слое почвы контрольных вариантов длительных стационарных опытов по ротациям севооборотов, мг/кг

По содержанию подвижных соединений калия почва перешла из 5 группы «высокая обеспеченность» в 4 группу «повышенная обеспеченность» или 3 группу «средняя обеспеченность». Расчёты балансов показали, что из почвы за время проведения опытов растения вынесли от 2000 до 3000 кг калия. При этом запасы подвижного калия в пахотном слое почвы снизились всего на 80-150 кг. Это свидетельствует о том, что в почве происходила мобилизация калия из необменных форм – было потреблено около 1850-2750 кг (50-70 кг/га в год) или растения потребляли калий из нижележащих слоёв почвы.

Основные потери подвижных соединений калия в пахотном слое почвы наблюдали в первые 7-8 лет, далее происходило поддержание их количества примерно на одном уровне. Похожие результаты представлены в работах Л.В. Никитиной (2012), С.М. Лукина (2012). Считается, что значительная часть обменного (подвижного) калия не поглощается растениями, т.к. он удерживается почвенными коллоидами с большей силой, чем та, с которой корневая система растений воздействует на почву. В отсутствие растений уровень содержания обменного (подвижного) калия в почве восстанавливался за счет перехода его из необменно-поглощенного состояния (Петербургский, 1979; Минеев и др., 2013). Также, поддержание обменной (подвижной) формы калия происходит за счёт перераспределения калия из нижележащих слоёв в верхние в связи с аккумуляцией его в корнях, площадь которых больше в нижних горизонтах, а масса в верхних (Савич и др., 2006).

В *опыте 1* валовое содержание калия в пахотном слое почвы было достоверно выше контрольного варианта только при высокой интенсивности баланса калия (210 %) в варианте с максимальной насыщенностью пашни удобрениями «навоз 20 т/га в год + NPK эквивалентно навозу» (в 1,1 раза) (табл. 50), 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 в пахотном слое

почвы валовое содержание калия находилось на уровне контрольного варианта или отмечены лишь тенденции к его увеличению. Возможно, на изменение данного показателя, оказывала влияние механическая обработка почвы. Внесение навоза 20 т/га в год + NPK эквивалентно навозу обеспечило поддержание валового содержания калия в верхнем слое почвы (0-20 см) на уровне целинного аналога. Валовые запасы калия в данном варианте увеличились до 49 т/га. Валовые запасы калия сохранились на уровне целинного аналога при применении навоза 10 т/га в год + NPK экв. навозу.

Таблица 50 - Изменение валового содержания калия по профилю почвы при длительном применении удобрений (VI ротация, 2016-2017 гг.) *(опыт 1)*

Вариант	Содержание, мг/кг					Запасы, т/га		
	0-20	20-40	40-60	60- 80	80-100	0-20	0-40	0-100
Без удобрений	17250	19100	19400	20800	21650	43	94	284
Навоз 10 т/га	17000	20424	20529	20996	19907	43	98	287
Навоз 20 т/га	17500	21064	21251	21147	21112	44	100	295
NPK экв. 10 т навоза	17600	20556	20990	21122	19680	44	99	289
NPK экв. 20 т навоза	17000	21650	21300	21050	20150	43	102	293
Навоз 5 т+NPK экв.	17400	20300	20800	20050	20350	44	99	287
Навоз 10 т + NPK экв.	18500	19600	20750	19650	19350	46	99	282
Навоз 20 т + NPK экв.	19400	19150	19200	20450	19850	49	101	284
$НСР_{05}$	1600	$F_ф<F_т$	$F_ф<F_т$	$F_ф<F_т$	$F_ф<F_т$	4	$F_ф<F_т$	$F_ф<F_т$

Применение всех систем удобрения привело к увеличению в пахотном слое почвы к концу шестой ротации (относительно контрольного варианта) содержания легкообменных и подвижных соединений калия в 1,4-3,2 раза (табл. 51, 52). Их количество в почве возрастало при складывающемся положительном хозяйственном балансе не всегда пропорционально интенсивности баланса. Прямо пропорциональное увеличение доступных форм калия при повышении насыщенности пашни удобрениями наблюдали при минеральной и органоминеральной системе. При органической системе удобрений накопление легкообменных и подвижных соединений калия в почве в вариантах «навоз 10 т/га» и «навоз 20 т/га» было примерно одинаковым.

Достоверное увеличение количества подвижных соединений калия в почве наблюдали только спустя 2 ротации с момента наложения данной схемы удобрений (рис. 30). Их содержание в вариантах «навоз 10 и 20 т/га в

год» в IV-VI ротациях стабилизировалось примерно на одном уровне 210-260 мг/кг.

Таблица 51 - Изменение содержания легкообменных соединений калия по профилю почвы при длительном применении различных систем удобрения (VI ротация, среднее по двум закладкам, 2016-2017 гг.) *(опыт 1)*

Варианты	Содержание, мг/кг					Запасы, кг/га		
	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100	0-20	0-40	0-100
Без удобрений	14,7[1] / 0,09	8,5 / 0,04	7,6 / 0,04	5,6 / 0,03	5,5 / 0,03	37	59	114
Навоз 10 т/га	20,0 / 0,12	10,2 / 0,05	5,1 / 0,02	4,3 / 0,02	3,6 / 0,02	50	77	115
Навоз 20 т/га	21,7 / 0,12	9,2 / 0,04	6,7 / 0,03	4,5 / 0,02	3,6 / 0,02	54	78	122
NPK экв. 10 т навоза	22,4 / 0,13	12,6 / 0,06	8,3 / 0,04	4,1 / 0,02	2,8 / 0,01	56	89	133
NPK экв. 20 т навоза	30,5 / 0,18	13,7 / 0,06	5,9 / 0,03	4,4 / 0,02	3,1 / 0,02	76	112	151
Навоз 5 т+NPK экв.	22,9 / 0,13	10,2 / 0,05	5,9 / 0,03	4,4 / 0,02	3,6 / 0,02	57	84	125
Навоз 10 т + NPK экв.	25,9 / 0,14	15,3 / 0,08	7,4 / 0,04	4,3 / 0,02	3,6 / 0,02	65	105	149
Навоз 20 т + NPK экв.	45,9 / 0,24	20,5 / 0,11	8,9 / 0,05	6,3 / 0,03	4,6 / 0,02	115	168	226
$НСР_{05}$	4,1	3,4	1,5	$F_ф<F_т$	1,2	11	46	47

1 - над чертой – содержание, под чертой - % к валовому содержанию калия.

Таблица 52 - Изменение содержания подвижных соединений калия по профилю почвы при длительном применении различных систем удобрения (VI ротация, среднее по двум закладкам, 2016-2017 гг.) *(опыт 1)*

Вариант	Содержание, мг/кг					Запасы, т/га		
	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100	0-20	0-40	0-100
Без удобрений	142[1] / 0,8	191 / 0,9	192 / 0,9	162 / 0,8	163 / 0,8	0,4	0,9	2,5
Навоз 10 т/га	212 / 1,2	190 / 0,9	150 / 0,7	150 / 0,7	128 / 0,6	0,6	1,1	2,4
Навоз 20 т/га	228 / 1,3	189 / 0,9	164 / 0,8	148 / 0,7	139 / 0,7	0,6	1,1	2,5
NPK экв. 10 т навоза	225 / 1,3	201 / 1,0	173 / 0,8	144 / 0,7	131 / 0,7	0,6	1,1	2,5
NPK экв. 20 т навоза	320 / 1,9	214 / 1,0	157 / 0,7	144 / 0,7	130 / 0,6	0,8	1,4	2,7
Навоз 5 т+NPK экв.	233 / 1,3	177 / 0,9	139 / 0,7	124 / 0,6	118 / 0,6	0,6	1,1	2,2
Навоз 10 т + NPK экв.	277 / 1,5	245 / 1,3	180 / 0,9	138 / 0,7	136 / 0,7	0,7	1,4	2,8
Навоз 20 т + NPK экв.	387 / 2,0	271 / 1,4	181 / 0,9	170 / 0,8	144 / 0,7	1,0	1,7	3,2
$НСР_{05}$	35	23	24	13	$F_ф<F_т$	0,1	0,4	0,3

1 - над чертой – содержание, под чертой - % к валовому содержанию калия.

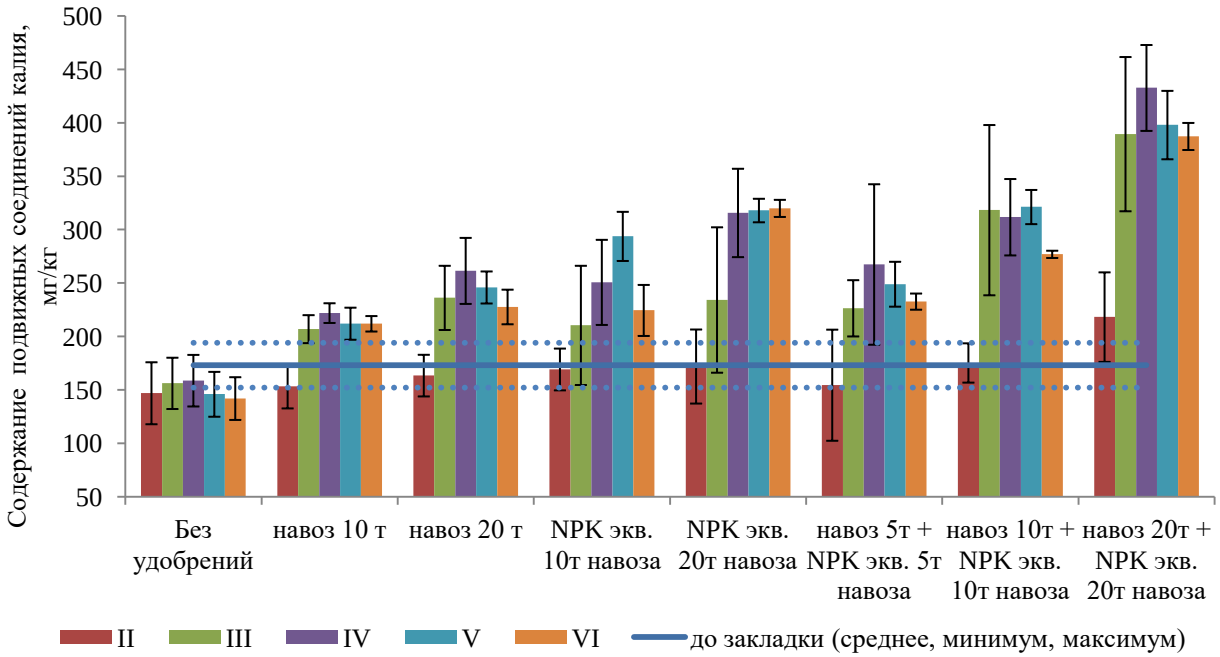


Рисунок 30 – Изменение содержания подвижных соединений калия в пахотном слое почвы (0-20 см) по ротациям севооборота (среднее по двум закладкам, II-VI ротации), мг/кг *(опыт 1)*

Применение минеральной и органоминеральной систем удобрения обеспечило поддержание подвижных соединений калия в пахотном слое почвы на уровне 230-290 мг/кг при умеренной насыщенностью пашни удобрениями (NPK эквивалентно 10 т/га навоза, навоз 5 т/га + NPK эквивалентно навозу) и на уровне 280-320 мг/кг при более высокой насыщенности (NPK эквивалентно навозу 20 т/га, навоза 10 т/га в год + NPK эквивалентно навозу). В варианте с максимальной насыщенностью пашни удобрениями «навоз 20 т/га + NPK эквивалентно навозу» количество подвижных соединений калия возросло до 390-430 мг/кг.

Доля легкообменных и подвижных соединений калия относительно его валового количества в пахотном слое почвы в результате применения минеральных и органических удобрений повысилась с 0,09 до 0,12-0,24 % и с 0,8 до 1,2-2,0 %, соответственно.

Достоверное повышение в подпахотном слое содержания легкообменных и подвижных соединений калия отмечено в вариантах «NPK эквивалентно навозу 20 т/га», «навоз 10 т/га + NPK эквивалентно навозу» и

«навоз 20 т/га + NPK эквивалентно навозу» в 1,6-2,4 и 1,1-1,4 раза, соответственно. Накопление легкообменной формы калия в слое 20-40 см наблюдали также при внесении NPK эквивалентно 10 т/га навоза. Некоторые авторы отмечают накопление калия в профиле почв агроценозов при применении калийных удобрений на различных типах почв до глубины 40 см, 60 см, 100 см и передвижение части калийного фонда даже за пределы метрового и полутораметрового почвенного слоя (Липкина, 1986; Мартынович, Мартынович, 1992; Носов, 2002; Прокошев, Дерюгин, 2000; Беляев, 2005; Никитина, 2018). Хотя в ряде других работ отмечается, что весь внесенный с удобрениями калий концентрировался в пахотном слое почвы (Минеев и др., 1988; Убугунов, Убугунова, 1999; Филон, Шеларь, 1999; Тютюнов, Карабутов и др., 2017; Якименко В.Н., 2019; Sui, Yu et al., 2017).

Увеличение содержания необменных соединений калия относительно контрольного варианта наблюдали только при более высокой насыщенности пашни удобрениями - в 1,1-1,2 раза (табл. 53).

Таблица 53 - Изменение содержания необменных соединений калия по профилю почвы при длительном применении различных систем удобрения (VI ротация, среднее по двум закладкам, 2016-2017 гг.) *(опыт 1)*

Вариант	Содержание, мг/кг					Запасы, т/га		
	0-20	20-40	40-60	60- 80	80-100	0-20	0-40	0-100
Без удобрений	775[1] / 4,5	735 / 3,5	805 / 3,8	770 / 3,6	705 / 3,3	2,0	4,0	11,0
Навоз 10 т/га	815 / 4,8	770 / 3,8	645 / 3,1	635 / 3,0	560 / 2,8	2,1	4,2	9,8
Навоз 20 т/га	845 / 4,8	770 / 3,7	625 / 2,9	645 / 3,1	615 / 2,9	2,2	4,3	10,1
NPK экв. 10 т навоза	770 / 4,4	720 / 3,5	680 / 3,2	645 / 3,1	645 / 3,3	2,0	3,9	10,0
NPK экв. 20 т навоза	945 / 5,6	755 / 3,5	610 / 2,9	625 / 3,0	565 / 2,8	2,5	4,5	10,0
Навоз 5 т+NPK экв.	735 / 4,2	750 / 3,7	615 / 3,0	570 / 2,8	510 / 2,5	1,9	3,9	9,1
Навоз 10 т + NPK экв.	935 / 5,1	790 / 4,0	730 / 3,5	650 / 3,3	575 / 3,0	2,4	4,6	10,5
Навоз 20 т + NPK экв.	940 / 4,8	795 / 4,2	655 / 3,4	725 / 3,5	650 / 3,3	2,4	4,6	10,8
$НСР_{05}$	45	$F_ф<F_т$	$F_ф<F_т$	85	$F_ф<F_т$	0,1	0,3	$F_ф<F_т$

1 - над чертой – содержание, под чертой - % к валовому содержанию калия.

В данных вариантах закрепление внесённого калия происходило, как в подвижной, так и необменной форме примерно в равных количествах. Существенных изменений в подпахотном слое при внесении удобрений не отмечено.

Следует отметить, что если в верхнем слое почвы (0-40 см) в результате длительного применения удобрений происходило накопление различных форм калия, то в более глубоких горизонтах (40-60, 60-80, 80-100 см) прослеживали тенденцию снижения легкообменных, подвижных и необменных соединений относительно контрольного варианта. Полученные данные могут быть связаны с генетической неоднородностью почвы по профилю, либо потреблением растениями соединений калия из более глубоких слоёв почвы. Наиболее яркое уменьшение подвижных и необменных соединений калия с глубины 40 см наблюдали в варианте «навоз 5 т/га в год + NPK эквивалентно навозу». При максимальной насыщенности пашни удобрениями («навоз 20 т/га в год + NPK эквивалентно навозу») в более глубоких слоях почвы отмечено содержание легкообменных, подвижных и необменных соединений близкое к контрольному варианту.

Распределение калия удобрений в пахотном слое по формам составило:

органическая система удобрений (навоз 10 и 20 т/га) – 55-65 % калия закрепилось в виде подвижной формы и 35-45 % - в виде необменной;

минеральная система удобрений – при умеренной дозе (NPK эквивалентно 10 т навоза) - 100 % закрепилось в виде подвижной формы, при высокой дозе (NPK эквивалентно 20 т навоза) распределение составило 1:1;

органоминеральная система удобрений (навоз 10 т/га + NPK эквивалентно навозу и навоз 20 т/га + NPK эквивалентно навозу) – 45-60 % закрепилось в виде подвижной формы и 40-55 % - в виде необменной.

Соотношение содержания необменных соединений калия к подвижным в результате применения удобрения в слое 0-20 см сузилось с 4,8 в контрольном варианте до 3,2-1,9 (табл. 54). В вариантах с более высокой насыщенностью пашни удобрениями наблюдали сужение данного

соотношения в слое почвы 0-80 см. Применение минеральной и органоминеральной систем удобрения в сравнении с целинным аналогом способствовало уменьшению соотношения необменных соединений калия к подвижным в верхнем слое почвы.

Таблица 54 - Отношение содержания необменных соединений калия к содержанию подвижных соединений *(опыт 1)*

Вариант	0-20	20-40	40-60	60- 80	80-100
Без удобрений	4,8	3,8	4,2	4,8	4,3
Навоз 10 т/га	2,9	4,1	4,3	4,2	4,4
Навоз 20 т/га	3,2	4,1	3,8	4,4	4,4
NPK экв. 10 т навоза	2,8	3,6	3,9	4,5	4,9
NPK экв. 20 т навоза	2,6	3,5	3,9	4,3	4,3
Навоз 5 т+NPK экв.	2,4	4,2	4,4	4,6	4,3
Навоз 10 т + NPK экв.	1,9	3,2	4,1	4,7	4,2
Навоз 20 т + NPK экв.	1,9	2,9	3,6	4,3	4,5

Результаты *опыта 2*, показали, что длительное внесение калия хлористого, как в чистом виде, так и в смеси с суперфосфатом и азотными удобрениями ($К_{90}$, $(РК)_{90}$, $(NК)_{90}$ и $(NPК)_{90}$) обеспечило более высокое валовое содержание калия в пахотном слое почвы относительно контрольного варианта – выше на 12-21% (табл. 55).

Таблица 55 - Изменение валового содержания калия по профилю почвы при длительном применении минеральных удобрений (VI ротация, 2021 г.) *(опыт 2)*

Вариант	Содержание, мг/кг					Запасы, т/га		
	0-20	20-40	40-60	60- 80	80-100	0-20	0-40	0-100
Без удобрений	15900	17800	21600	21250	21200	41	89	286
N_{90}	17000	22200	22000	22500	21850	44	104	308
P_{90}	16550	17350	21350	20750	19900	43	90	280
$К_{90}$	19000	21200	21700	21000	20250	49	107	299
$(NP)_{90}$	15500	19000	22500	22650	20700	40	92	293
$(NК)_{90}$	18250	19700	24200	24050	21650	47	101	315
$(РК)_{90}$	19200	22600	23800	22250	22550	50	111	321
$(NPК)_{90}$	17800	18800	21250	20800	21100	46	97	291
$(NPК)_{30}$	14850	19150	19950	19550	19850	39	90	272
$(NPК)_{60}$	15450	17250	20100	19800	18750	40	87	266
$(NPК)_{120}$	17800	18500	20750	20800	20400	46	96	286
$(NPК)_{150}$	17500	19900	20700	19700	18650	46	99	280
$НСР_{05}$	1600	1800	2100	2300	$F_ф<F_т$	4	4	6

Увеличение наблюдали и в более глубоких слоях почвы. Валовое содержание калия было достоверно выше в подпахотном слое почвы при одностороннем внесении калийных удобрений, запасы в слое 0-40 см возросли в 1,2 раза. Более высокое валовое содержание калия в слое 0-60 см наблюдали в варианте $(РК)_{90}$, в слое 0-80 см - в варианте $(NК)_{90}$. Запасы валового калия в метровом слое почвы были выше относительно контрольного варианта в 1,1 раза. Это может быть связано с различной интенсивностью выноса калия растениями по вариантам и различиями в минеральном составе почвенных горизонтов. Применение полного минерального удобрения $(NPК)_{90}$ повысило валовое содержание калия только в пахотном слое.

Увеличение валового количества калия наблюдали при внесении азотных удобрений N_{90}, достоверное повышение на 25 % отмечено в подпахотном слое почвы. Полученные результаты, возможно, связаны с разрушением и трансформацией калийсодержащих минералов почвы в результате длительного применения физиологически кислых удобрений и перемещением тонкодисперсных минералов в составе илистой фракции, из пахотного в подпахотный слой.

В работах А.Д. Хлыстовского (1992), Р.Ф. Байбекова (2003), И.Н. Батуры (2006), Л.В. Никитиной (2012), Н.П. Чижиковой (2012) и Н.Н. Шаповаловой (2018) отмечается, что происходит изменение (нарушение) минералогического и гранулометрического состава почвы (дерново-подзолистая почва, чернозём) в результате применения высоких доз (свыше 90 кг д.в./га) минеральных удобрений (особенно физиологически кислых), а также при интенсивной механической обработке почвы. В исследованиях Н.Н. Шаповаловой (2018) наиболее существенные изменения отмечены при внесении высоких доз азотного, калийного и полного минерального удобрения. В результате кислотного гидролиза минералов произошли механическое дробление почвенной массы и обеднение илом пахотного слоя, что вызвало заметное сокращение ближнего резерва калия и ослабление способности почвы к восполнению подвижной формы. Систематическое

применение $N_{120}P_{150}K_{120}$ привело также к существенным изменениям в соотношении минеральных фаз и структуре слоистых силикатов, направленным в сторону необратимой трансформации и разрушения минеральной части почвы.

В.А. Воробьёв (2016) отмечал, что в результате длительного применения удобрений имело место уменьшение содержания слюд (мусковит, биотит), одних из основных калийсодержащих минералов, от 9 до 27% (максимально - в варианте с моноазотной системой удобрения).

Также причиной полученных результатов, может быть тот факт, что когда количество аммония в почве многократно возрастает по сравнению с естественным почвенным соотношением между катионами аммония и калия, аммоний может вытеснить заметную часть ионов калия со специфических позиций (Якименко, 2011). Это может привести к перемещению соединений калия в нижележащие горизонты.

При внесении калия хлористого (K_{90}, $(PK)_{90}$, $(NK)_{90}$, $(NPK)_{90}$) отмечено увеличение легкообменных соединений калия в пахотном слое почвы (относительно контрольного варианта) в 1,8-2,8 раза (табл. 56). Запасы повысились с 28 (контроль) до 52-80 кг/га. Количество легкообменного калия в пахотном слое почвы в вариантах $(NK)_{90}$ и $(NPK)_{90}$ достоверно выше, чем при одностороннем внесении калия хлористого K_{90} и/или $(PK)_{90}$. Увеличение содержания легкообменных соединений калия при внесении азотно-калийных удобрений также наблюдали в подпахотном слое почвы. Длительное внесение азотных и фосфорных удобрений (N_{90}, P_{90}, $(NP)_{90}$) не оказало существенного влияния на изменение количества легкообменных соединений в пахотном слое почвы относительно контрольного варианта, что свидетельствует о восполнении их из других форм. Достоверное уменьшение содержания легкообменных соединений калия наблюдали в результате применения азотных удобрений в подпахотном слое почвы.

Таблица 56 - Изменение содержания легкообменных соединений калия по профилю почвы при длительном применении минеральных удобрений (VI ротация, 2021 г.) *(опыт 2)*

Вариант	Содержание, мг/кг					Запасы, кг/га		
	0-20	20-40	40-60	60- 80	80-100	0-20	0-40	0-100
Без удобрений	10,9[1] / 0,07	8,0 / 0,04	3,2 / 0,01	1,5 / 0,01	1,3 / 0,01	28	50	68
N_{90}	9,7 / 0,06	5,1 / 0,02	3,9 / 0,02	2,3 / 0,01	1,4 / 0,01	25	39	62
P_{90}	9,4 / 0,06	6,4 / 0,04	4,1 / 0,02	2,5 / 0,01	1,2 / 0,01	24	42	65
K_{90}	24,0 / 0,13	7,0 / 0,03	6,7 / 0,03	1,9 / 0,01	1,3 / 0,01	62	81	111
$(NP)_{90}$	14,3 / 0,09	7,0 / 0,04	4,5 / 0,02	2,0 / 0,01	1,3 / 0,01	37	56	80
$(NK)_{90}$	30,7 / 0,17	13,2 / 0,07	6,5 / 0,03	3,5 / 0,01	1,6 / 0,01	80	116	150
$(PK)_{90}$	20,1 / 0,10	5,8 / 0,03	3,5 / 0,01	1,7 / 0,01	2,3 / 0,01	52	68	91
$(NPK)_{90}$	29,4 / 0,17	10,4 / 0,06	6,8 / 0,03	3,7 / 0,02	1,7 / 0,01	77	105	141
$(NPK)_{30}$	10,2 / 0,07	3,9 / 0,02	2,2 / 0,01	3,3 / 0,02	1,5 / 0,01	27	37	58
$(NPK)_{60}$	19,9 / 0,13	10,5 / 0,06	4,9 / 0,02	5,4 / 0,03	1,5 / 0,01	52	80	115
$(NPK)_{120}$	19,3 / 0,11	8,1 / 0,04	5,0 / 0,02	2,1 / 0,01	1,6 / 0,01	50	72	99
$(NPK)_{150}$	35,3 / 0,20	15,0 / 0,08	6,7 / 0,03	4,6 / 0,02	3,6 / 0,02	92	132	178
$НСР_{05}$	5,9	2,7	Fф<Fт	Fф<Fт	1,5	15	20	32

1 - над чертой – содержание, под чертой - % к валовому содержанию калия.

Внесение азотных и фосфорных удобрений (N_{90}, P_{90}, $(NP)_{90}$) в течение пяти ротаций полевого восьмипольного севооборота способствовало снижению количества подвижных соединений калия в пахотном слое почвы относительно исходного уровня на 29-36% (табл. 57).

Почва по обеспеченности подвижными соединениями калия перешла из групп «высокое» и «повышенное содержание» в группу «среднее содержание». Количество подвижных соединений калия уменьшилось в данных вариантах и в подпахотном слое почвы, что возможно связано с более высокой урожайностью культур и соответственно более интенсивным выносом калия по сравнению с контролем. В результате запасы подвижных

соединений калия в слое 0-40 см уменьшились с 1,0 т/га в контрольном варианте до 0,8 т/га (на 20%).

Таблица 57 - Изменение содержания подвижных соединений калия по профилю почвы при длительном применении минеральных удобрений (VI ротация, 2021 г.) *(опыт 2)*

Вариант	Содержание, мг/кг						Запасы, т/га			
	перед закладкой, 0-20	VI ротация					перед закладкой, 0-20	VI ротация		
		0-20	20-40	40-60	60- 80	80-100		0-20	0-40	0-100
Без удобрений	190	129[1] / 0,8	116 / 0,7	98 / 0,5	91 / 0,4	82 / 0,4	0,49	0,34	1,0	2,6
N_{90}	157	112 / 0,7	101 / 0,5	100 / 0,5	90 / 0,4	79 / 0,4	0,41	0,29	0,8	2,5
P_{90}	159	108 / 0,7	95 / 0,5	102 / 0,5	103 / 0,5	82 / 0,4	0,41	0,28	0,8	2,5
K_{90}	156	217 / 1,1	129 / 0,6	107 / 0,5	94 / 0,4	85 / 0,4	0,41	0,56	1,3	3,0
$(NP)_{90}$	169	109 / 0,7	100 / 0,5	112 / 0,5	104 / 0,5	85 / 0,4	0,44	0,28	0,8	2,5
$(NK)_{90}$	158	218 / 1,2	135 / 0,7	124 / 0,5	108 / 0,4	91 / 0,4	0,41	0,57	1,3	3,3
$(PK)_{90}$	162	195 / 1,0	110 / 0,5	107 / 0,4	88 / 0,4	72 / 0,3	0,42	0,51	1,1	2,7
$(NPK)_{90}$	185	230 / 1,3	140 / 0,7	122 / 0,6	102 / 0,5	98 / 0,5	0,48	0,60	1,4	3,3
$(NPK)_{30}$	140	133 / 0,9	115 / 0,6	108 / 0,5	89 / 0,5	66 / 0,3	0,36	0,35	1,0	2,6
$(NPK)_{60}$	182	178 / 1,2	116 / 0,7	93 / 0,5	86 / 0,4	84 / 0,4	0,47	0,46	1,1	2,7
$(NPK)_{120}$	168	195 / 1,1	135 / 0,7	116 / 0,6	96 / 0,5	77 / 0,4	0,44	0,51	1,0	2,8
$(NPK)_{150}$	166	234 / 1,3	161 / 0,8	125 / 0,6	111 / 0,6	91 / 0,5	0,43	0,61	1,5	3,5
$НСР_{05}$	-	17	13	18	$F_ф<F_т$	$F_ф<F_т$	-	0,05	0,1	0,2

1 - над чертой – содержание, под чертой - % к валовому содержанию калия.

Длительное применение калийных удобрений в чистом виде и в сочетании с азотными и фосфорными (K_{90}, $(PK)_{90}$, $(NK)_{90}$ и $(NPK)_{90}$), обеспечило повышение количества подвижных соединений калия в пахотном слое почвы относительно исходного уровня на 20-39%. Применение калия хлористого в чистом виде увеличило содержание подвижной формы калия в пахотном и подпахотном слоях почвы, внесение $(NK)_{90}$ и $(NPK)_{90}$ – до глубины 60 см. В результате запасы подвижных соединений калия в

метровом слое почвы повысились в 1,2-1,3 раза. Внесение фосфорно-калийных удобрений оказало влияние только на пахотный слой почвы.

Внесение калия хлористого ($К_{90}$, $(РК)_{90}$, $(NК)_{90}$, $(NPК)_{90}$) привело к увеличению в пахотном слое почвы доли легкообменных и подвижных соединений калия относительно его валового количества с 0,07 до 0,10-0,17 % и с 0,8 до 1,0-1,3 %, соответственно.

Изучение динамики содержания подвижных соединений калия в пахотном слое почвы по ротациям показало, что максимальное уменьшение данных соединений в вариантах, где калийные удобрения не применяли, происходило к концу первой ротации (рис. 31). Небольшие тенденции к уменьшению наблюдали в следующих ротациях.

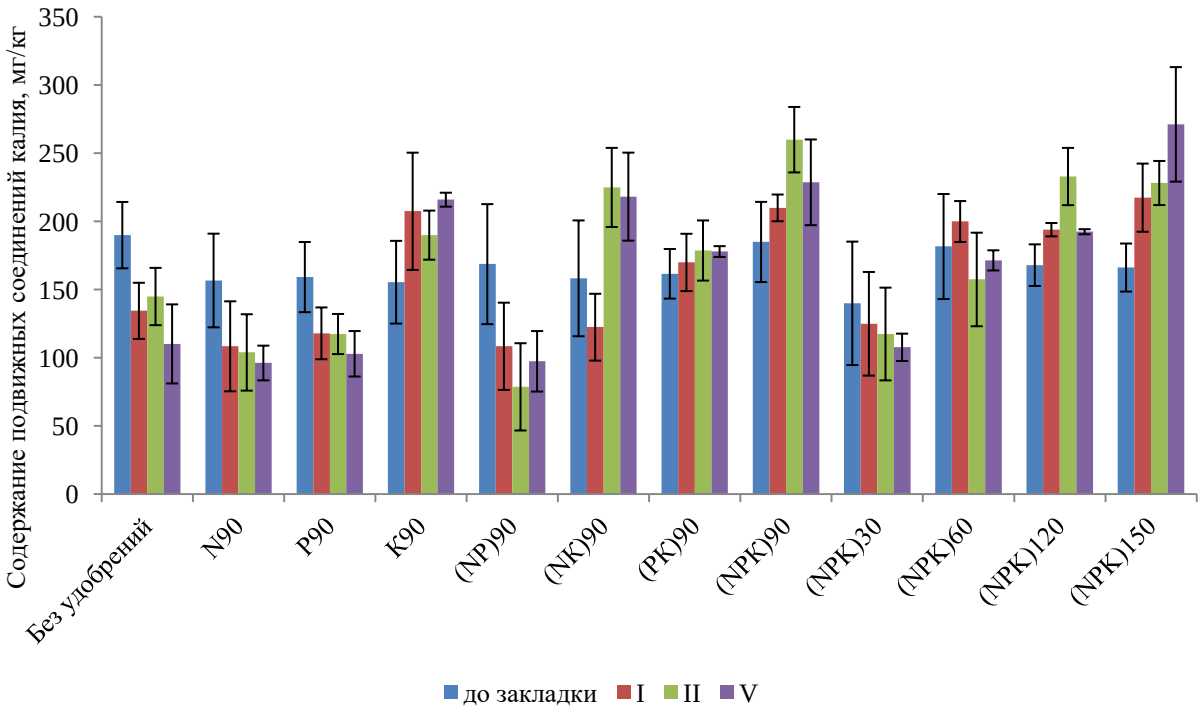


Рисунок 31 – Изменение содержания подвижных соединений калия в пахотном слое почвы по ротациям севооборота, мг/кг *(опыт 2)*

При внесении азотных и азотно-фосфорных удобрений отмечено минимальное количество подвижных соединений калия в пахотном слое почвы. Их содержание варьировало во второй – шестой ротациях в пределах 80-110 мг/кг. Полученные результаты соответствуют представленному в

работе Л.В. Никитиной и И.В. Володарской (2002) минимальному уровню количества обменных соединений калия в дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве. Данный уровень определялся по установившемуся содержанию обменных соединений калия до устойчивого стабильного состояния после истощения почвы на фоне NP и пополняемого из необменной формы.

Применение калия хлористого в чистом виде привело к повышению содержания подвижных соединений калия в почве к концу первой ротации севооборота со 156 до 208 мг/кг (на 35%). Поддержание количества подвижных соединений калия на данном уровне отмечено в следующих ротациях. Достоверное увеличение (на 25-40%) содержания подвижных соединений калия в пахотном слое почвы наблюдали с конца второй ротации севооборота в вариантах, где изучали сочетание калия хлористого с азотными удобрениями ($(NK)_{90}$, $(NPK)_{90}$). Фосфорные удобрения по-видимому способствовали закреплению калия в почве в необменной форме, поэтому в течение пяти ротаций увеличение подвижной формы калия в пахотном слое относительно исходного уровня при внесении $(PK)_{90}$ составляло всего 5-10 % и только на начало шестой ротации было зафиксировано увеличение на 20 %.

Содержание необменных соединений калия в почве было выше контрольного варианта в 1,1-1,3 раза в пахотном и подпахотном слоях при длительном внесении калия хлористого в чистом виде и его сочетании с суперфосфатом (K_{90}, $(PK)_{90}$) (табл. 58). Также здесь отмечена тенденция к снижению необменных соединений калия в более глубоких слоях почвы. Содержание необменных соединений калий в метровом слое сохранилось на уровне контрольного варианта или было чуть выше в варианте $(NK)_{90}$, что свидетельствует о миграции калийных соединений по профилю почвы под воздействием азотных удобрений или их повышении за счёт других форм калия – более труднодоступных.

Таблица 58 - Изменение содержания необменных соединений калия по профилю почвы при длительном применении минеральных удобрений (VI ротация, 2021 г.) *(опыт 2)*

Вариант	Содержание, мг/кг					Запасы, кг/га		
	0-20	20-40	40-60	60- 80	80-100	0-20	0-40	0-100
Без удобрений	1040[1] / 6,5	1065 / 6,0	1435 / 6,6	1400 / 6,6	1230 / 5,8	2,7	5,6	18,0
N_{90}	1030 / 6,1	1260 / 5,7	1295 / 5,9	1245 / 5,5	1050 / 4,8	2,7	6,1	17,1
P_{90}	1115 / 6,7	1100 / 6,3	1330 / 6,2	1240 / 6,0	1130 / 5,7	2,9	5,9	17,2
K_{90}	1285 / 6,8	1395 / 6,6	1335 / 6,2	1235 / 5,9	1050 / 5,2	3,3	7,1	18,2
$(NP)_{90}$	890 / 5,7	1110 / 5,8	1430 / 6,4	1335 / 5,9	1230 / 5,9	2,3	5,3	17,5
$(NK)_{90}$	1080 / 5,9	1055 / 5,4	1505 / 6,2	1535 / 6,4	1345 / 6,2	2,8	5,7	19,1
$(PK)_{90}$	1125 / 5,9	1380 / 6,1	1440 / 6,1	1270 / 5,7	1030 / 4,6	2,9	6,7	18,1
$(NPK)_{90}$	1070 / 6,0	1155 / 6,1	1115 / 5,2	1040 / 5,0	1065 / 5,0	2,8	5,9	15,8
$(NPK)_{30}$	1015 / 6,8	1160 / 6,1	1270 / 6,4	1100 / 5,6	1050 / 5,3	2,6	5,8	16,2
$(NPK)_{60}$	980 / 6,3	1000 / 5,8	1200 / 6,0	1050 / 5,3	1025 / 5,5	2,5	5,2	15,3
$(NPK)_{120}$	990 / 5,6	1025 / 5,5	1250 / 6,0	1230 / 5,9	1065 / 5,2	2,6	5,3	16,2
$(NPK)_{150}$	1165 / 5,7	1250 / 6,3	1230 / 5,9	1140 / 5,8	985 / 5,3	3,0	6,4	16,6
$НСР_{05}$	70	125	200	235	135	0,2	0,4	1,6

1 - над чертой – содержание, под чертой - % к валовому содержанию калия.

По расчетным данным калий удобрений, не использованный растениями, распределялся в почве следующим образом между подвижной и необменной формами элемента:

K_{90} - 25 % закрепилось в виде подвижной формы и 75 % - в виде необменной;

$(PK)_{90}$ – 45 % закрепилось в виде подвижной формы и 55 % - в виде необменной;

$(NK)_{90}$ - 70 % закрепилось в виде подвижной формы и 30 % - в виде необменной.

$(NPK)_{90}$ – почти 100 %закрепилось в виде подвижной формы.

Содержание необменных соединений калия достоверно выше контрольного варианта отмечено в пахотном слое (в 1,1 раза) при внесении фосфорных удобрений (P_{90}) и в подпахотном слое (в 1,2 раза) – при внесении азотных удобрений (N_{90}). Это может являться причиной того, что в данных вариантах наблюдали более низкое содержание подвижной формы калия. Мог произойти переход калийных соединений из одной формы в другую.

Достоверное уменьшение содержания в пахотном слое не только подвижных, а также необменных соединений калия, наблюдали в варианте $(NP)_{90}$. Запасы уменьшились с 2,7 (контрольный вариант) до 2,3 т/га.

Внесение азотных и азотно-фосфорных удобрений снизило долю подвижных и необменных соединений от его валового количества, в основном изменения затронули верхний слой почвы 0-40 см.

Соотношение содержания необменных к подвижным соединениям калия в вариантах $N_{90,}$ P_{90} и $(NP)_{90}$ расширилось в сравнении с контрольным вариантом в слое 0-40 см, с глубины 40 см наблюдали сужение данного соотношения (табл. 59). Уменьшение соотношения наблюдали в метровом слое почвы при внесении калия хлористого в чистом виде и в сочетании с азотными и фосфорными удобрениями ($К_{90}$, $(РК)_{90}$, $(NК)_{90}$ и $(NРК)_{90}$).

Таблица 59 - Отношение содержания необменных к содержанию подвижных соединений калия (VI ротация, 2021 г.) *(опыт 2)*

Вариант	0-20	20-40	40-60	60- 80	80-100
Без удобрений	8,1	9,2	14,6	15,4	15,0
N_{90}	9,2	12,5	12,9	13,8	13,3
P_{90}	10,3	11,6	13,0	12,0	13,8
$К_{90}$	5,9	10,8	12,4	13,1	12,4
$(NP)_{90}$	8,2	11,1	12,8	12,8	14,5
$(NК)_{90}$	5,0	7,8	12,1	14,2	14,8
$(РК)_{90}$	5,8	12,5	13,5	14,4	14,3
$(NРК)_{90}$	4,7	8,3	9,1	10,2	10,9
$(NPK)_{30}$	7,6	10,1	11,8	12,4	15,9
$(NPK)_{60}$	5,5	8,6	12,9	12,2	12,2
$(NPK)_{120}$	5,1	9,7	10,8	12,8	13,8
$(NPK)_{150}$	5,0	7,8	9,8	10,3	10,8

Изучение возрастающих доз полного минерального удобрения показало, что валовое содержание калия было выше варианта без удобрений

на 10-12 % в пахотном слое почвы при внесении NPK 90-150 кг д.в. каждого элемента/га, в слое 20-40 см в варианте с максимальной интенсивностью баланса (121 %) $(NPK)_{150}$. В варианте $(NPK)_{30}$ отмечено наименьшее в почве валовое содержание калия в опыте.

Увеличение количества легкообменных соединений калия относительно контрольного варианта в слое 0-20 см отмечено при внесении NPK 60 кг д.в. каждого элемента/га и выше – в 1,8-3,2 раза. Статистически значимое уменьшение легкообменных соединений калия в слое 20-40 см наблюдали при внесении минимальной дозы $(NPK)_{30}$ (в два раза ниже варианта без удобрений) и, связано, прежде всего, с некомпенсированным выносом калия возделываемыми культурами. Увеличение легкообменной формы калия при максимальной дозе минерального удобрения установлено также в подпахотном слое с 8,0 до 15,0 мг/кг и в слое 80-100 см с 1,3 до 3,6 мг/кг, что связано с избыточным внесением калия с удобрениями и его накоплением в почвенном растворе (Якименко, 2007). В других вариантах опыта изменения по содержанию этой формы калия наблюдали только в пахотном слое почвы.

Внесение NPK по 90-150 кг д.в. каждого элемента/га привело к увеличению подвижной формы калия в пахотном слое относительно исходного уровня в 1,2-1,4 раза. В варианте $(NPK)_{60}$ наблюдали поддержание содержания подвижных соединений калия на исходном уровне, в варианте $(NPK)_{30}$ прослеживаются тенденции уменьшения.

Также содержание подвижных соединений калия было значимо выше относительно контрольного варианта при внесении $(NPK)_{90\text{-}150}$ на глубине 20-40 и 40-60 см. Запасы подвижных соединений калия в метровом слое почвы возросли с 2,6 т/га (без удобрений) до 2,8-3,5 т/га.

Достоверно более высокое содержание необменных соединений калия относительно контрольного варианта определено только в варианте $(NPK)_{150}$ (в слоях 0-20 и 20-40 см) и объясняется бездефицитным калийным балансом при длительном внесении высоких доз калийного удобрения в составе NPK.

Наибольшее содержание необменной формы калия определено в глубинных слоях не удобренной почвы, в вариантах с удобрениями этот показатель значимо ниже.

Возможно такая ситуация связана с неоднородностью почвенного покрова или использованием необменной формы калия на пополнение его подвижной формы в связи с большим выносом этого элемента культурами севооборота. Если придерживаться последнего предположения, то следует сделать вывод, что в питании растений участвует калий не только пахотного и подпахотного горизонтов, но и калий из необменной формы более глубоких слоев почвы. В научной литературе ведутся дискуссии о степени участия подпахотных горизонтов почвы в снабжении калием выращиваемых культур: одни авторы отводят этим горизонтам существенную роль, другие считают их вклад незначительным.

Соотношение содержания необменных соединений калия к подвижным варьировало в слое 0-20 см в интервале 4,7-8,1, имело тенденцию к снижению с возрастанием дозы NPK. Изменение соотношения $К_{необм.}$:$К_{подв}$. в сторону уменьшения наблюдали по всему метровому слою при внесении NPK в дозах от 60 до 150 кг д.в. каждого элемента/га.

Распределение калия удобрений в пахотном слое по формам составило:

$(NPK)_{30-120}$ – почти 100 % закрепилось в виде подвижной формы;

$(NPK)_{150}$ - 45 % закрепилось в виде подвижной формы и 55 % - в виде необменной.

Поддержание валового содержания калия в почве на уровне целинного аналога наблюдали при внесении калия в чистом виде и его сочетании с суперфосфатом. Рассчитанный баланс калия в данных вариантах составил минус 12-15 кг в год. Нулевой и положительный баланс калия складывался в вариантах $(NPK)_{120-150}$. Однако здесь содержание валового калия в верхнем слое было ниже относительно целинного аналога (на 10 %), что может свидетельствовать о ежегодных непроизводительных потерях калия из почвы при внесении высоких доз полного минерального удобрения. Наибольшее

влияние на перемещение калийных соединений по профилю почвы оказывают азотные удобрения. Запасы валового калия в вариантах $(NPK)_{120-150}$ соответствовали уровню целинного аналога.

По результатам *опыта 3* валовое содержание калия при длительном внесении ОСВ в пахотном слое почвы было достоверно выше контрольного варианта в 1,1 раза (табл. 60, 61).

Таблица 60 – Валовое содержание калия и его различных соединений в пахотном слое почвы при длительном применении ОСВ, мг/кг (%) (V ротация, 2013 г.) *(опыт 3)*

Вариант	Валовое содержание	Легко обменные соединения	Подвижные соединения	Необменные соединения	Отношение содержания необменных к содержанию подвижных соединений
Без удобрений	16550	14,3 0,09	122 0,7	464 2,8	3,8
Навоз	17125	15,9 0,09	148 0,9	500 2,9	3,4
ОСВ	17350	14,8 0,09	131 0,8	553 3,2	4,2
NPK – фон	18375	22,7 0,12	183 1,0	639 3,5	3,5
Фон + навоз	18200	27,3 0,15	165 0,9	655 3,6	4,0
Фон + ОСВ	17950	22,7 0,13	175 1,0	632 3,6	3,6
$НСР_{05}$	800	3,1	20	54	-

* - над чертой – содержание в мг/кг, под чертой - % к валовому содержанию калия.

Таблица 61 – Запасы валового калия и его различных соединений в пахотном слое почвы при длительном применении ОСВ (V ротация) *(опыт 3)*

Вариант	Валовое содержание	Необменные соединения	Подвижные соединения	Легкообменные соединения
	т/га			кг/га
Без удобрений	43	1,2	0,3	37
Навоз	45	1,3	0,4	41
ОСВ	45	1,4	0,3	38
NPK – фон	48	1,7	0,5	59
Фон + навоз	47	1,7	0,4	71
Фон + ОСВ	47	1,6	0,5	59
$НСР_{05}$	2	0,1	0,1	8

Также здесь отмечено более высокое содержание необменных соединений калия – выше на 20 %. При этом содержание легкообменных и подвижных соединений калия было на уровне контрольного варианта.

Внесение навоза КРС обеспечило более высокое содержание подвижной формы калия - на 21 % выше варианта без удобрений. Изменение валового калия и его легкообменных и необменных соединений находилось в пределах ошибки опыта.

За время проведения опыта с ОСВ и навозом потупило примерно одинаковое количество калия (около 0,3 т). Возможно, полученные результаты связаны с особенностями химического состава ОСВ.

Наибольшее положительное влияние на калийный режим в опыте получено при длительном внесении минеральных удобрений (I ротация - $N_{120}P_{120}K_{120}$, II ротация - $N_{90}P_{90}K_{90}$, III-V ротации - $N_{60}P_{60}K_{60}$). Содержание валового калия было достоверно выше варианта без удобрений в 1,1 раза, его легкообменных соединений в 1,9 раз, подвижных и необменных в 1,4-1,5 раза.

По фону минеральных удобрений внесение ОСВ и навоза не оказало существенного влияния на изменение калийного режима почвы в пахотном слое почвы, только при внесении навоза отмечено более высокое содержание легкообменных соединений – на 20 % выше фона.

Представленные системы удобрения в *опыте 3* не способствовали сохранению валового содержания калия в почве относительно целинного аналога.

Для целинной почвы установлена высокая и очень высокая корреляционная связь (r= 0,9-1,0) между содержанием в почве необменных, подвижных и легкообменных соединений калия (табл. 62). Постоянная обработка почвы и отсутствие растительности изменило данную зависимость. Очень высокая прямая корреляционна связь сохранилась только между подвижной и легкообменной формой. Обратная высокая корреляционная зависимость между необменными и подвижными

соединениями установлена при экстенсивном возделывании сельскохозяйственных культур (без применения удобрений), что свидетельствует о переходе соединений калия из одной формы в другую для восполнения выноса растениями калия. Обратная корреляционная связь для данных форм калия также установлена при внесении удобрений, но только слабой силы.

Таблица 62 - Корреляционные зависимости между содержанием в почве валового содержания калия и его различными соединениями (мг/кг) целинной и пахотной почвы по профилю

Показатель	Содержание валового калия	Необменные соединения	Подвижные соединения
Злаково-разнотравный луг			
Необменные соединения	-0,4	-	-
Подвижные соединения	-0,5*	0,9*	-
Легкообменные соединения	-0,6*	0,9*	1,0*
Бессменный чистый пар			
Необменные соединения	-0,4	-	-
Подвижные соединения	-0,4	0,2	-
Легкообменные соединения	-0,5	0,3	1,0*
Полевой севооборот (без удобрений)			
Необменные соединения	0,3	-	
Подвижные соединения	-0,2	-0,9*	-
Легкообменные соединения	-0,9*	-0,6	0,5
Полевой севооборот (удобрения)			
Необменные соединения	0,3*	-	-
Подвижные соединения	-0,3*	-0,4*	-
Легкообменные соединения	-0,6*	-0,2	0,8*

* - существенный ($p<0,05$).

Без применения удобрений - корреляционная зависимость между легкообменной и подвижной формами калия – прямая, слабая (r=0,5); при внесении удобрений – прямая, высокая (r=0,8).

При экстенсивном возделывании культур между валовым количеством калия и его легкообменной формой установлена достоверная обратная высокая корреляционная связь, что говорит о снижении в почве наиболее доступной для растений формы калия.

Прямые средние и высокие корреляционные зависимости наблюдали между содержанием по профилю почвы подвижных, легкообменных соединений калия и $C_{орг}$ (r=0,6-0,9), обратные средние и высокие (r=-0,5-0,9) –

с суммой обменных оснований, степенью насыщенности почвы основаниями, содержанием обменного кальция и магния (прил. 13). Данные результаты связаны с существующей конкуренцией между ионами калия и ионами кальция и магния.

Таким образом, сравнение целинной и пахотной почвы показало, что экстенсивное возделывание сельскохозяйственных культур (без применения удобрений) привело к уменьшению в почве валового содержания калия, его подвижных и легкообменных (наиболее доступных для растений) соединений. Снижение валового содержания калия произошло в верхнем слое почвы (0-20 см), его запасы уменьшились на 3-5 т/га. Снижение содержания легкообменных и подвижных соединений калия наблюдали в метровом слое - в 1,1-9,7 и 1,1-2,4 раза. Отмечено повышение доли необменных соединений калия и уменьшение доли подвижных и легкообменных соединений в метровом слое почвы. Полученные результаты связаны с выносом элемента питания сельскохозяйственными культурами, припахиванием нижележащего горизонта, разрушением калийсодержащих минералов и переносом калийных соединений по профилю.

За 35-50 лет возделывания сельскохозяйственных культур без применения удобрений по содержанию подвижных соединений калия почва перешла из 5 группы «высокая обеспеченность» в 4 группу «повышенная обеспеченность» или 3 группу «средняя обеспеченность». Уменьшение количества подвижных соединений калия в пахотном слое от исходного уровня составило 18-42%. Основные потери калия наблюдали в первые 7-8 лет.

Изменение в калийном режиме почвы в результате длительного применения органической, минеральной и органоминеральной систем удобрения (выровненных по элементам питания) зависело от насыщенности пашни удобрениями. Умеренная насыщенность пашни удобрениями (навоз 10 т/га в год; NPK эквивалентно 10 т навоза; навоз 5 т/га + NPK эквивалентно навозу) способствовала увеличению (относительно контрольного варианта) в

пахотном слое почвы только содержания подвижных и легкообменных соединений калия в 1,4-1,6 раза. Запасы в пахотном слое подвижной формы калия повысились на 0,2 т/га, легкообменной - на 13-20 кг/га. Высокая насыщенность пашни удобрениями (навоз 20 т/га в год; NPK эквивалентно 20 т/га навоза; навоз 10 т/га в год + NPK эквивалентно навозу) увеличила в пахотном слое почвы содержание необменных - в 1,1-1,2 раза, подвижных - в 1,5-2,1 раза и легкообменных соединений калия в 1,6-2,3 раза. Минеральная и органоминеральная система удобрений при более высокой насыщенности способствовала накоплению подвижных и легкообменных форм калия в подпахотном слое, в результате их запасы в слое 0-40 см повысились на 0,5 т/га и 46-53 кг/га, соответственно. Наибольшее положительное влияние на калийный режим почвы наблюдали при максимальной насыщенности пашни удобрениями «навоз 20 т/га в год + NPK эквивалентно навозу». Здесь отмечено повышение в пахотном слое валового содержания калия и всех его изучаемых форм, в подпахотном – подвижных и легкообменных форм.

Длительное применение физиологически кислых азотных удобрений N_{90} привело к разрушению калийсодержащих минералов, трансформации и переносу калийных соединений. В результате наблюдали увеличение в подпахотном слое почвы валового содержания калия и его необменной формы на 20-25 %.

Внесение только азотных и фосфорных удобрений (N_{90}, P_{90}, $(NP)_{90}$) без компенсации выноса калия в течение пяти ротаций восьмипольного полевого севооборота привело к уменьшению содержания подвижных соединений калия в верхнем слое почвы 0-40 см, запасы снизились с 1,0 до 0,8 т/га (на 20%). Применение азотно-фосфорных удобрений также привело к уменьшению в пахотном слое содержания необменных соединений калия, запасы снизились с 2,7 до 2,3 т/га (на 15%). Внесение азотных и азотно-фосфорных удобрений снизило долю подвижных и необменных соединений от его валового содержания, в основном изменения затронули верхний слой почвы 0-40 см.

Длительное внесение калия хлористого в чистом виде и в сочетании с суперфосфатом и азотными удобрениями ($К_{90}$, $(РК)_{90}$, $(NК)_{90}$, $(NPК)_{90}$) обеспечило увеличение в пахотном слое почвы валового содержания калия в 1,1-1,2 раза и его различных соединений в 1,1-2,8 раза (относительно контрольного варианта). Отмечено сужение соотношения необменных форм калия к подвижным. Изменения в метровом слое почвы зависели от сочетания удобрений, изучаемой формы калийных соединений в почве. Накопление легкообменной формы калия при одностороннем внесении калия хлористого и в сочетании с суперфосфатом и азотными удобрениями было отмечено в основном в пахотном слое почвы. Увеличение валового содержания калия, его подвижной и необменных форм отмечали в слое почвы 0-40 см в результате применения калия хлористого в чистом виде. Повышение их содержания могли наблюдать до глубины 40-60 см при внесении калия хлористого совместно с суперфосфатом, до глубины 60-80 см - при внесении калия хлористого совместно с азотными удобрениями. Применение азотных удобрений способствовало миграции калийных соединений по профилю почвы, накоплению в большей степени легкообменных и подвижных соединений калия.

Внесение нетрадиционного органического удобрения ОСВ по 40 т/га 1 раз в ротацию семипольного полевого севооборота обеспечило относительно контрольного варианта более высокое в пахотном слое почвы валовое содержания калия и его необменных соединений. Количество подвижных и легкообменных соединений калия существенно не изменялось. Полученные результаты связаны с особенностями химического состава ОСВ.

Длительное применение минеральных удобрений (NPK), органических и их сочетание в большей степени оказывало положительное влияние на калийный режим верхнего слоя почвы (0-40 см), в более глубоких слоях (40-100 см) прослеживали тенденции снижения легкообменных, подвижных и чаще всего - необменных соединений. 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 почвы по профилю.

Поддержание валового содержания калия в верхнем слое почвы 0-20 см на уровне целинной и существенный рост валовых запасов калия наблюдали:

при внесении калия в чистом виде и его сочетании с суперфосфатом;

при внесении навоза 20 т/га + NPK эквивалентно навозу, где с удобрениями было внесено в почву около 8,5 т калия, а соотношение N:P:K составило 1,5:1:2.

Добавление азотных удобрений к фосфорно-калийным (соотношение N:P:K – 1:1:1), даже при условии складывающихся нулевого и положительного баланса калия, не способствовало поддержанию валового содержания калия в почве на уровне целинного аналога. Азотные удобрения оказывали влияние на перемещение калийных соединений по профилю почвы. При этом запасы валового калия при внесении $(NPK)_{120\text{-}150}$ 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

Определение кислотности почвы, суммы обменных оснований и степени насыщенности почвы основаниями имеет важное диагностическое значение, данные показатели во многом определяют эффективное плодородие почвы. Результаты исследований показали, что для почвы злаково-разнотравного луга характерны высокая обеспеченность обменными основаниями и высокое содержание обменных форм кальция и магния (табл. 63). Сумма обменных оснований почвы, степень насыщенности почвы основаниями увеличивались с глубиной. Полученную характеристику почвы определяла материнская порода - особенностью почвы, сформированной на богатых в минералогическом отношении пермских глинах, является высокое содержание обменных форм кальция и магния. Гидролитическая кислотность в верхнем горизонте почвы средняя и с глубиной снижалась. Показатель pH_{KCl} по всему профилю варьировал в пределах 3,9-4,8 – градации от очень сильнокислой до слабокислой почвы.

Таблица 63 – Физико-химические свойства дерново-подзолистой почвы злаково-разнотравного луга

Злаково-разнотравный луг	pH_{KCl}	S	Нг	V,%	CaO	MgO
		смоль(экв)/кг			смоль(экв)/кг	
A_1 (0-22 см)	4,5±0,3	21,1±1,1	3,4±0,2	86	18,0±1,8	3,5±0,7
A_2B (22-28 см)	4,4±0,1	21,7±1,2	3,3±0,2	87	18,8±1,9	4,1±0,9
B_1 (28-76 см)	4,1±0,2	27,6±2,5	3,2±0,1	90	27,4±2,5	6,0±1,1
B_2 (76-105 см)	4,3±0,1	31,6±2,2	2,5±0,2	93	32,5±3,8	5,8±1,8
B_2C (105-127 см)	4,4±0,1	30,6±3,8	2,3±0,1	93	31,0±2,5	4,8±1,0
C (от 127 см)	4,4±0,2	32,2±2,4	2,4±0,2	93	35,1±1,8	4,5±1,1

Закономерности изменения физико-химических свойств по профилю сохраняются и в пахотной почве. Однако в результате длительного возделывания сельскохозяйственных культур (без применения удобрений) в течение 35-50 лет в верхнем слое почвы отмечены тенденции снижения суммы поглощённых оснований, содержания обменных соединений кальция и магния.

В опытах 1 и 2, где было проведено известкование в дозе 1,0 Нг, наблюдали улучшение показателей кислотности почвы относительно целинного аналога, достоверно это можно сказать о верхнем слое (0-20 см). Положительное влияние известкования наблюдали в течение 16 лет. Далее почва возвращалась к своему исходному состоянию. В *опыте 3* известкование не проводили. Здесь наблюдали более существенное подкисление почвы. Показатель pH_{KCl} снизился от первой ротации к пятой с 4,8 до 4,4, гидролитическая кислотность возросла с 3,7 до 4,5 смоль(экв)/кг.

Подкисление почвы и снижение суммы обменных оснований связано с выносом урожаем сельскохозяйственных культур кальция, магния, калия. Подкисление почвы также может быть обусловлено загрязнением окружающей среды, выпадением кислотных дождей.

Оценить изменение физико-химических свойств пахотной почвы по профилю относительно целинного аналога затруднительно и требует дополнительных исследований, что связано с высоким варьированием показателей, генетической неоднородностью почвы и разным временем отбора глубинных образцов по годам.

Проблема почвенной кислотности имеет огромное значение, поскольку от реакции среды непосредственно зависят практически все происходящие в почвах химические и биологические процессы (Бакина, 2015). Основной способ снижения почвенной кислотности – известкование. В *опыте 1* в пару первой ротации севооборота было проведено известкование (в дозе 1,0 Нг), было установлено существенное улучшение показателей кислотности почвы. Положительное влияние наблюдали в течение двух ротаций, с третьей ротации отмечено увеличение гидролитической кислотности и снижение показателя pH_{KCl}. В III-VI ротациях севооборота в контрольном варианте гидролитическая кислотность варьировала в пределах 2,8-3,1 смоль(экв)/кг почвы и стала близка к исходной величине (Нг при закладке опыта до известкования – 3,1, после известкования – 2,4 смоль(экв)/кг). Показатель pH_{KCl} снизился до 4,9 (pH_{KCl} при закладке опыта до известкования – 5,5, после известкования – 6,0) (рис. 32, 33).

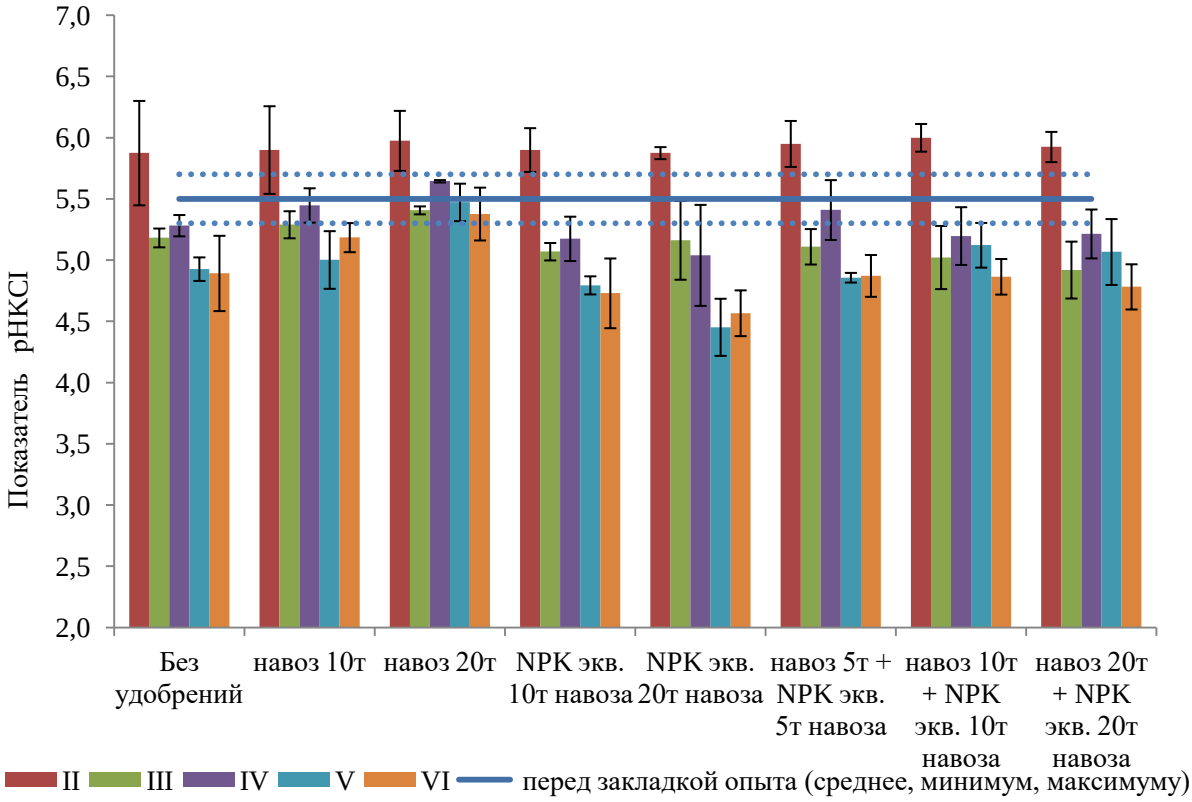


Рисунок 32 – Изменение актуальной кислотности (pH_{KCL}) в пахотном слое дерново-подзолистой почвы по ротациям севооборота при длительном применении различных систем удобрений (1977-2017 гг.) *(опыт 1)*

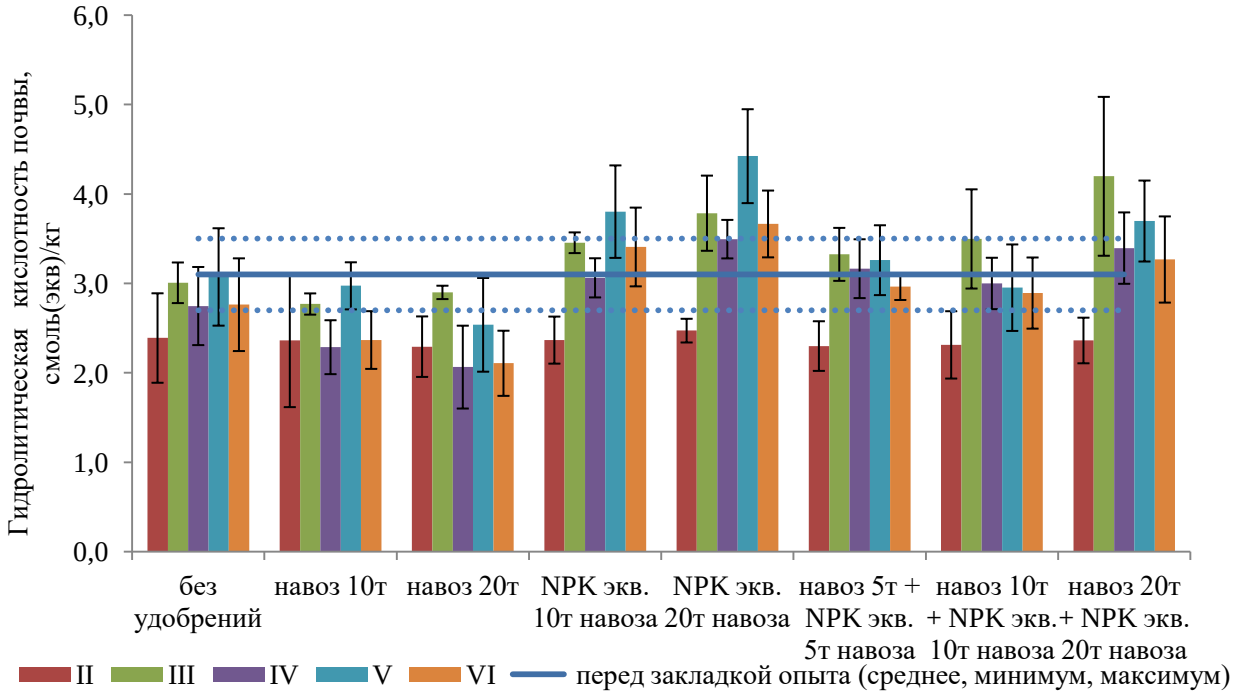


Рисунок 33 – Изменение гидролитической кислотности в пахотном слое дерново-подзолистой почвы по ротациям севооборота при длительном применении различных систем удобрений (1977-2017 гг.) *(опыт 1)*

По данным Е.М. Митрофановой (2011), изучавшей вопросы известкования на наших почвах, темпы подкисления произвесткованных почв зависят от дозы внесенной извести. Интенсивное подкисление почвы происходило в первой ротации севооборота - терялось от 16 до 100 % (в зависимости от доз извести 2,5 – 0,25 Нг) достигнутого сдвига в щелочную сторону. В дальнейшем скорость подкисления снижалась. За 4 ротации севооборота в варианте с дозой извести 1,0 Нг терялся 71 % максимально достигнутого сдвига.

Известкование способствовало существенному повышению суммы обменных оснований и степени насыщенности почвы основаниями. После известкования в контрольном варианте опыта сумма обменных оснований в течение шести ротаций севооборота варьировала в пределах 18,4-19,6 смоль(экв)/кг), снижения не наблюдали (S при закладке опыта до известкования – 16,4 смоль(экв)/кг) (рис. 34). Степень насыщенности почв основаниями после известкования возросла с 84 (до закладки) до 89 %, в течение II-VI ротации варьировала в пределах 86-87 % (рис. 35).

Применение минеральной системы удобрений привело к существенному подкислению почвы, в отдельные ротации отмечено увеличение гидролитической кислотности до 4,0-4,5 смоль(экв)/кг почвы, показатель pH_{KCl} снижался до 4,5. Наблюдали уменьшение в пахотном слое почвы суммы обменных оснований, в варианте «NPK эквивалентно 20 т/га навоза» в конце IV ротации данный показатель снизился до исходного значения. Отмечено уменьшение степени насыщенности почв основаниями. Показатель к концу III ротации снизился с 90 % до исходного уровня 84 %. Степень насыщенности почвы основаниями уменьшилась в течение IV-VI ротаций в варианте «NPK эквивалентно 20 т/га навоза» до 80-82 %.

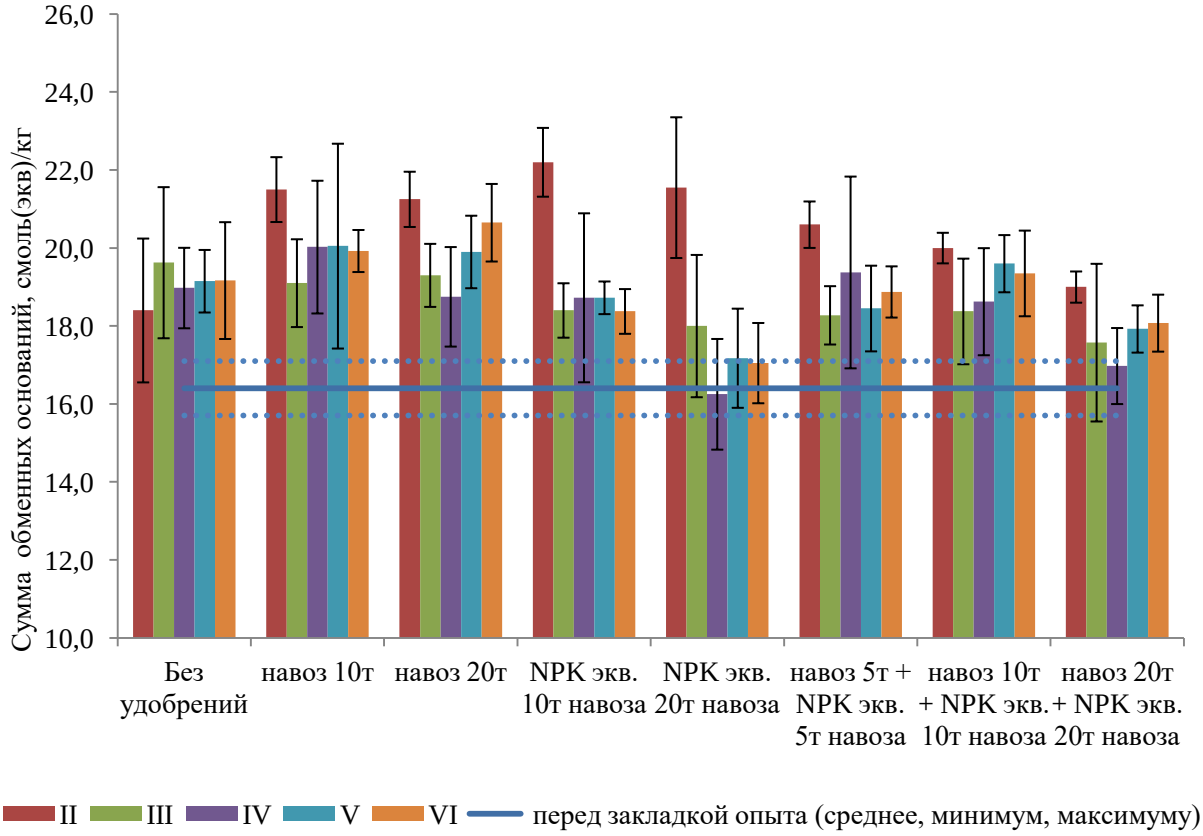


Рисунок 34 – Изменение суммы обменных оснований в пахотном слое дерново-подзолистой почвы по ротациям севооборота при длительном применении различных систем удобрений (1977-2017 гг.) *(опыт 1)*

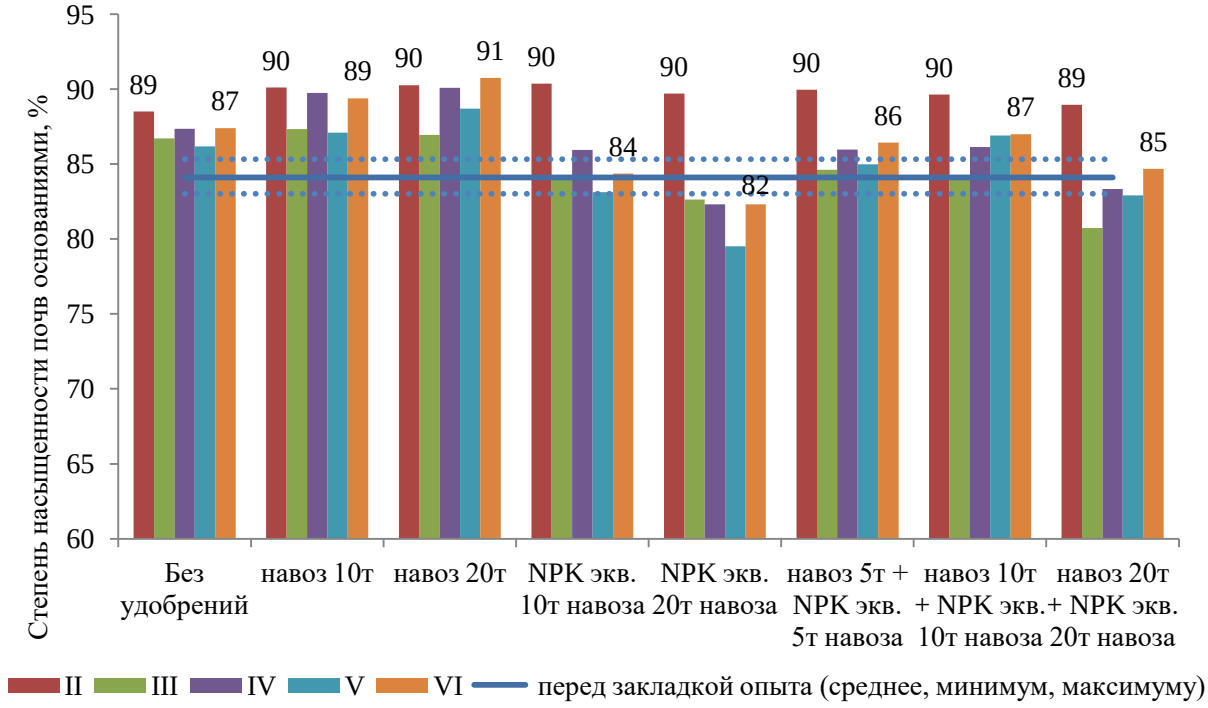


Рисунок 35 – Изменение степени насыщенности основаниями в пахотном слое дерново-подзолистой почвы по ротациям севооборота при длительном применении различных систем удобрений (1977-2017 гг.) *(опыт 1)*

Применение органической системы удобрений способствовало поддержанию эффективности известкования в течение всех шести ротаций севооборота. Отмечено положительное влияние на гидролитическую кислотность почвы, сумму обменных оснований. Степень насыщенности почв основаниями по ротациям севооборота варьировала в пределах 87-91 %.

Органоминеральная система удобрений по влиянию на кислотность почвы и сумму обменных оснований занимала промежуточное положение. Здесь также наблюдали снижение показателя pH_{KCl}, суммы обменных оснований и увеличение гидролитической кислотности, как и при внесении минеральных удобрений в эквивалентных количествах, но менее интенсивно.

Исследования, проведённые в конце VI ротации, по профилю почвы показали, что отрицательное влияние длительного применения минеральных удобрений на показатели кислотности и степень насыщенности почвы основаниями может наблюдаться в метровом слое (табл. 64). В варианте с более высокой насыщенностью пашни минеральными удобрениями (NPK эквивалентно 20 т/га навоза) отмечено снижение показателя pH_{KCl} и увеличение гидролитической кислотности относительно контроля в слое 0-100 см. Также в метровом слое почвы наблюдали снижение степени насыщенности почвы основаниями. В варианте «NPK эквивалентно 10 т/га навоза» отрицательное влияние на показатели кислотности, сумму обменных оснований и степень насыщенности почвы основаниями наблюдали только в пахотном слое.

Положительное влияние органических удобрений на показатели кислотности почвы и степень насыщенности почвы основаниями относительно контрольного варианта наблюдали в слое 0-40 см.

Существенных изменений в содержании обменной формы кальция и магния в результате длительного внесения удобрений относительно контрольного варианта в опыте не выявлено (табл. 65).

Таблица 64 - Изменение показателей кислотности, суммы обменных оснований и степени насыщенности основаниями по профилю почвы при длительном применении различных систем удобрений (VI ротация, 2016-2017 гг.) *(опыт 1)*

Вариант	Показатель / глубина (см)				
	0-20	20-40	40-60	60- 80	80-100
pH_{KCl}					
Без удобрений	4,9	4,8	4,8	4,8	4,8
Навоз 10 т/га	5,2	5,1	5,0	5,0	4,9
Навоз 20 т/га	5,4	5,2	5,1	5,0	4,8
NPK экв. 10 т навоза	4,7	4,9	4,8	4,7	4,9
NPK экв. 20 т навоза	4,6	4,7	4,6	4,3	4,3
Навоз 5 т+NPK экв.	4,9	5,0	4,9	4,8	4,5
Навоз 10 т + NPK экв.	4,9	4,9	4,8	4,8	4,8
Навоз 20 т + NPK экв.	4,8	5,0	5,0	4,9	4,7
$НСР_{05}$	0,1	0,3	0,3	0,3	0,4
Нг, смоль(экв)/кг					
Без удобрений	2,8	2,2	2,0	1,9	1,9
Навоз 10 т/га	2,4	1,9	1,8	1,8	1,8
Навоз 20 т/га	2,1	1,8	1,8	1,8	1,9
NPK экв. 10 т навоза	3,4	2,4	2,0	1,9	1,9
NPK экв. 20 т навоза	3,7	2,5	2,2	2,8	2,6
Навоз 5 т+NPK экв.	3,0	2,3	2,1	2,0	2,2
Навоз 10 т + NPK экв.	2,9	2,2	2,2	2,1	2,0
Навоз 20 т + NPK экв.	3,3	2,5	2,2	2,4	2,4
$НСР_{05}$	0,3	0,3	0,2	0,4	0,4
S, смоль(экв)/кг					
Без удобрений	19,6	22,6	24,8	25,9	25,8
Навоз 10 т/га	19,9	23,7	20,2	26,7	26,5
Навоз 20 т/га	20,7	23,3	26,4	26,8	27,3
NPK экв. 10 т навоза	18,4	23,1	25,7	27,5	27,9
NPK экв. 20 т навоза	17,1	22,3	25,6	26,3	26,3
Навоз 5 т+NPK экв.	18,9	21,6	27,0	26,3	27,1
Навоз 10 т + NPK экв.	19,4	24,0	28,1	27,3	28,0
Навоз 20 т + NPK экв.	18,1	20,7	24,6	26,7	26,5
$НСР_{05}$	1,5	$F_ф<F_т$	$F_ф<F_т$	$F_ф<F_т$	$F_ф<F_т$
V, %					
Без удобрений	90	91	93	93	93
Навоз 10 т/га	91	93	92	94	94
Навоз 20 т/га	92	93	94	94	93
NPK экв. 10 т навоза	88	90	93	94	94
NPK экв. 20 т навоза	85	90	92	90	91
Навоз 5 т+NPK экв.	88	91	93	93	92
Навоз 10 т + NPK экв.	88	92	93	93	93
Навоз 20 т + NPK экв.	85	89	92	92	92
$НСР_{05}$	2	2	$F_ф<F_т$	2	2

Большие запасы валового содержания кальция и магния в исследуемой дерново-подзолистой почве могут являться основной причиной устойчивого содержания их обменных форм (Митрофанова, 2011а; Попова и др., 2013). Только в вариантах «NPK эквивалентно 20 т/га навоза» и «навоз 20 т/га + NPK эквивалентно навозу» наблюдали достоверное снижение в пахотном слое почвы содержания обменных соединений кальция (на 13-15 %).

Таблица 65 - Изменение содержания обменного кальция и обменного магния по профилю почвы при длительном применении различных систем удобрений (VI ротация, 2016-2017 гг.) *(опыт 1)*

Вариант	Содержание, смоль(экв)/кг					Запасы, т/га (кг/га)[1]		
	0-20	20-40	40-60	60- 80	80-100	0-20	0-40	0-100
Обменный Ca^{2+}								
Без удобрений	16,8	20,9	22,8	24,4	23,9	0,44	1,0	3,2
Навоз 10 т/га	16,6	21,0	25,3	26,0	25,8	0,43	1,0	3,4
Навоз 20 т/га	16,4	21,6	24,6	26,1	25,3	0,43	1,0	3,3
NPK экв. 10 т навоза	16,2	21,9	24,5	26,6	27,0	0,42	1,0	3,4
NPK экв. 20 т навоза	14,6	22,3	25,5	27,0	26,4	0,38	1,0	3,4
Навоз 5 т+NPK экв.	16,8	24,9	25,0	24,8	25,5	0,44	1,1	3,4
Навоз 10 т + NPK экв.	15,9	26,5	25,5	26,0	24,4	0,41	1,1	3,1
Навоз 20 т + NPK экв.	14,3	20,4	23,5	27,7	28,3	0,37	0,9	3,4
$НСР_{05}$	1,2	$F_ф<F_т$	$F_ф<F_т$	$F_ф<F_т$	$F_ф<F_т$	0,06	$F_ф<F_т$	$F_ф<F_т$
Обменный Mg^{2+}								
Без удобрений	2,9	4,7	5,4	6,2	6,2	75	198	660
Навоз 10 т/га	2,3	3,4	4,4	5,1	5,2	60	148	530
Навоз 20 т/га	2,5	3,9	4,6	5,5	6,4	65	166	595
NPK экв. 10 т навоза	2,9	3,4	6,6	8,1	8,5	75	164	767
NPK экв. 20 т навоза	2,5	5,8	7,8	8,8	7,8	65	216	850
Навоз 5 т+NPK экв.	3,8	5,5	7,3	8,3	7,6	99	242	845
Навоз 10 т + NPK экв.	3,1	4,0	8,8	7,6	7,6	81	185	809
Навоз 20 т + NPK экв.	2,5	4,0	5,6	8,1	7,4	65	169	718
$НСР_{05}$	$F_ф<F_т$	$F_ф<F_т$	$F_ф<F_т$	$F_ф<F_т$	$F_ф<F_т$	$F_ф<F_т$	$F_ф<F_т$	$F_ф<F_т$

1 – запасы обменного кальция приведены в т/га, обменного магния в кг/га.

В *опыте 2* известкование по 1,0 Нг проводили перед закладкой. В исследованиях Н.И. Акановой (2001) отмечается, что максимальное смещение Нг после внесения извести отмечается через шесть, а pH_{KCl} – через 4-6 лет после внесения мелиоранта. Аналогичная закономерность прослеживается и в нашем опыте. Наибольшее положительное влияние извести на изменение показателей кислотности наблюдали к концу первой ротации по сравнению с годом внесения.

Снижение эффективности известкования в контрольном варианте наблюдали к концу второй ротации севооборота, отмечено существенное подкисление почвы (pH_{KCl} снизился с 5,7 до 5,1; Нг увеличилась с 2,2 до 2,6 смоль(экв)/кг) и снижение степени насыщенности почвы основаниями (с 90 до 87 %) (рис. 36-39). Далее по ротациям наблюдали небольшое варьирование данных показателей: pH_{KCl} – 5,1-5,3; Нг – 2,4-2,6 смоль(экв)/кг; S – 17,0-18,7 смоль(экв)/кг; V – 86-87 %. Сумма обменных оснований в пахотном слое почвы по ротациям изменялась незначительно - в пределах 17,0-18,8 смоль(экв)/кг) и была на 6-15% ниже исходного уровня.

Изучение сочетания различных видов минерального удобрения показало, что применение азотных удобрений в чистом виде (N_{90}) и в сочетании с суперфосфатом и калием хлористым ($(NP)_{90}$, $(NK)_{90}$, $(NPK)_{90}$) способствовало существенному подкислению почвы. Ухудшение показателей кислотности в пахотном слое почвы наблюдали также как и в контрольном варианте с конца второй ротации, однако при внесении удобрений процесс подкисления был более ярко выражен.

Длительное внесение калия хлористого ($К_{90}$) способствовало поддержанию кислотности почвы на исходном уровне, что возможно связано с замещением ионов водорода в ППК на ионы калия. Применение фосфорных и фосфорно-калийных удобрений не оказало существенного влияния на показатели кислотности почвы, изменения находились на уровне варианта без удобрений.

Применение азотных удобрений в чистом виде (N_{90}) и в сочетании с суперфосфатом и калием хлористым, в отдельные ротации привело к уменьшению в пахотном слое почвы суммы обменных оснований. Наибольшее снижение показателя отмечено в вариантах $(NK)_{90}$ и $(NPK)_{90}$. Также здесь наблюдали максимальное уменьшение степени насыщенности почв основаниями с 87-92 до 81-82 %.

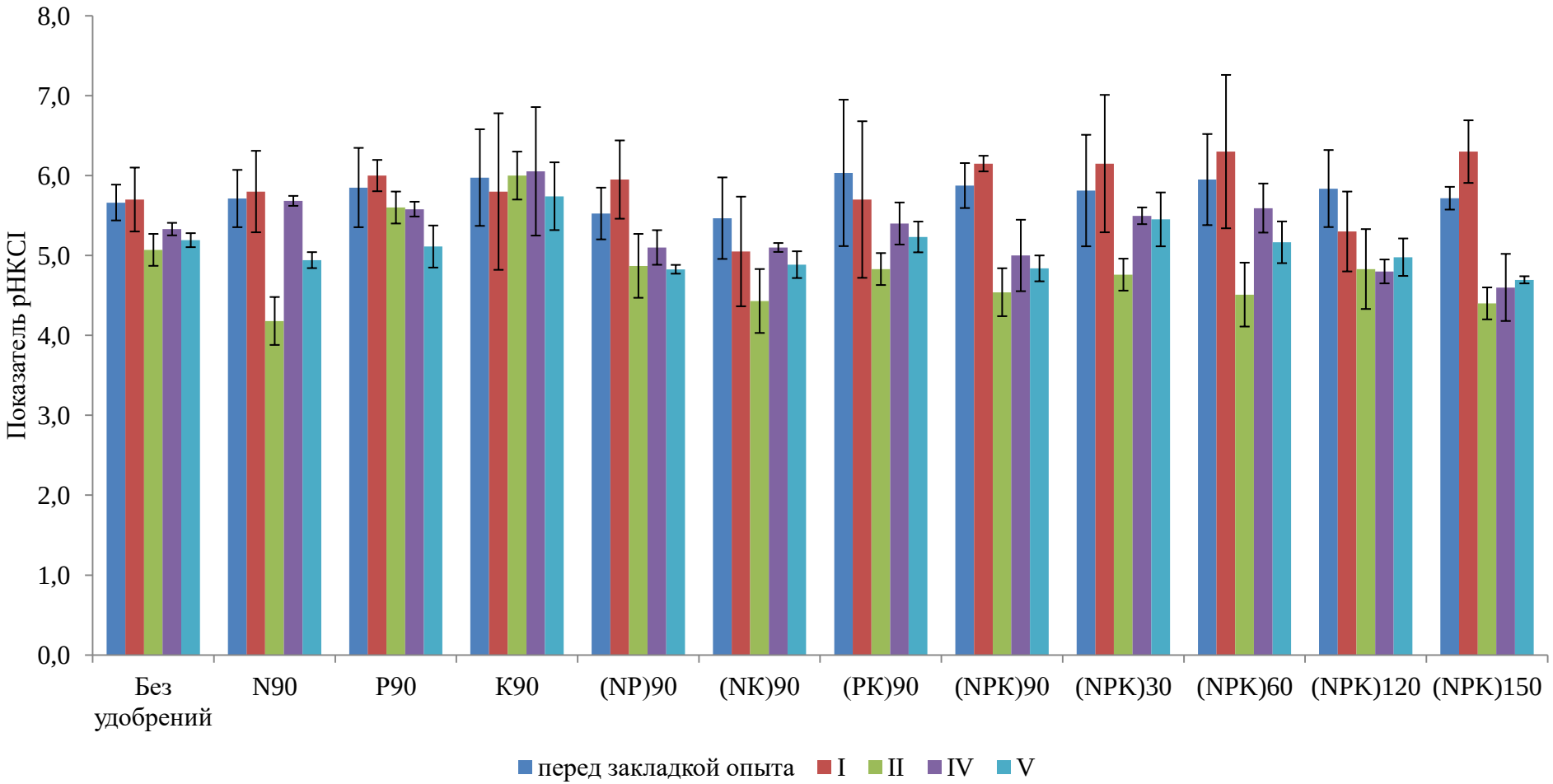


Рисунок 36 – Изменение актуальной кислотности (pH_{KCl}) в пахотном слое дерново-подзолистой почвы по ротациям севооборота при длительном применении различных видов, соотношений и доз минеральных удобрений (1978-2019 гг.) *(опыт 2)*

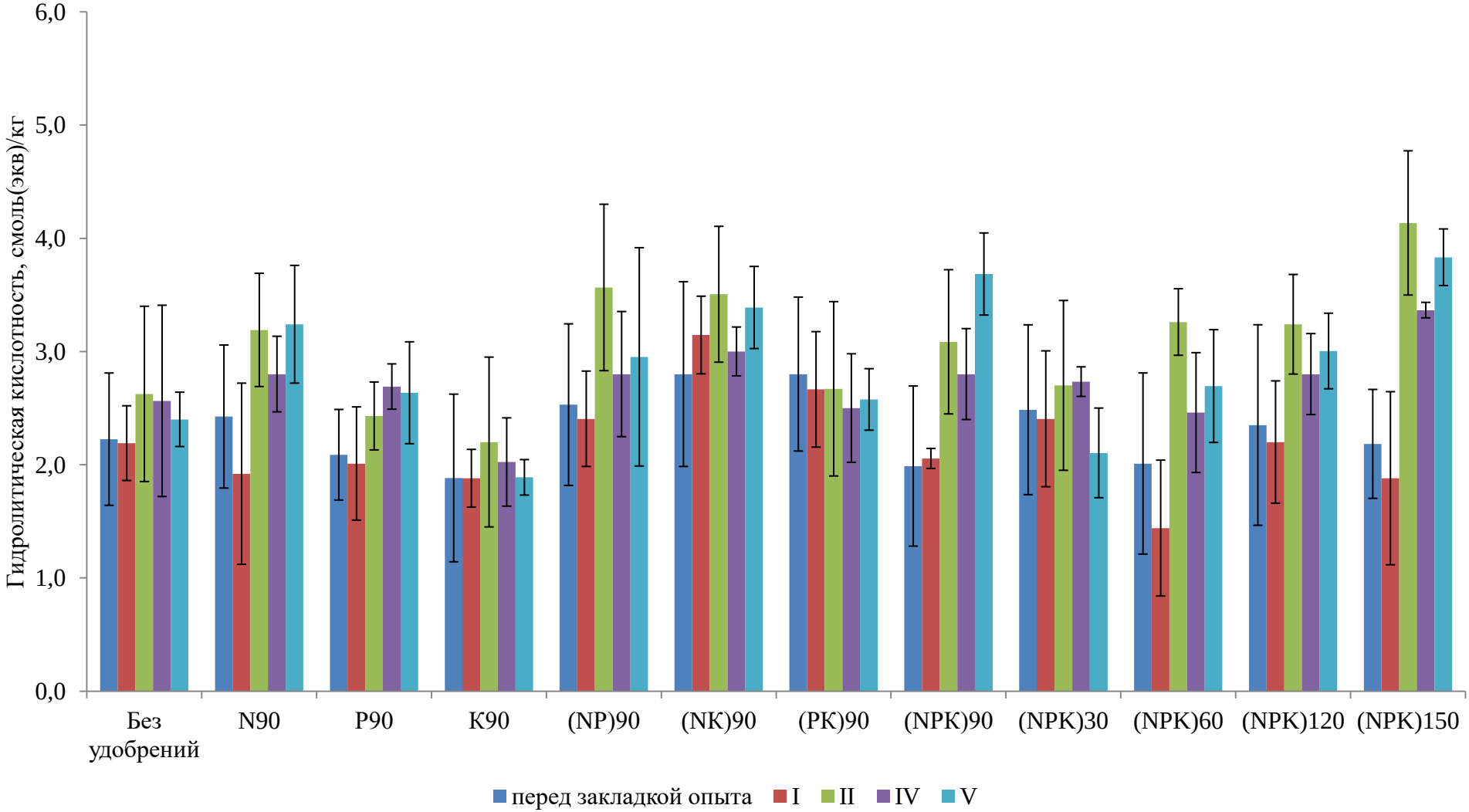


Рисунок 37 – Изменение гидролитической кислотности в пахотном слое дерново-подзолистой почвы по ротациям севооборота при длительном применении различных видов, соотношений и доз минеральных удобрений (1978-2019 гг.) *(опыт 2)*

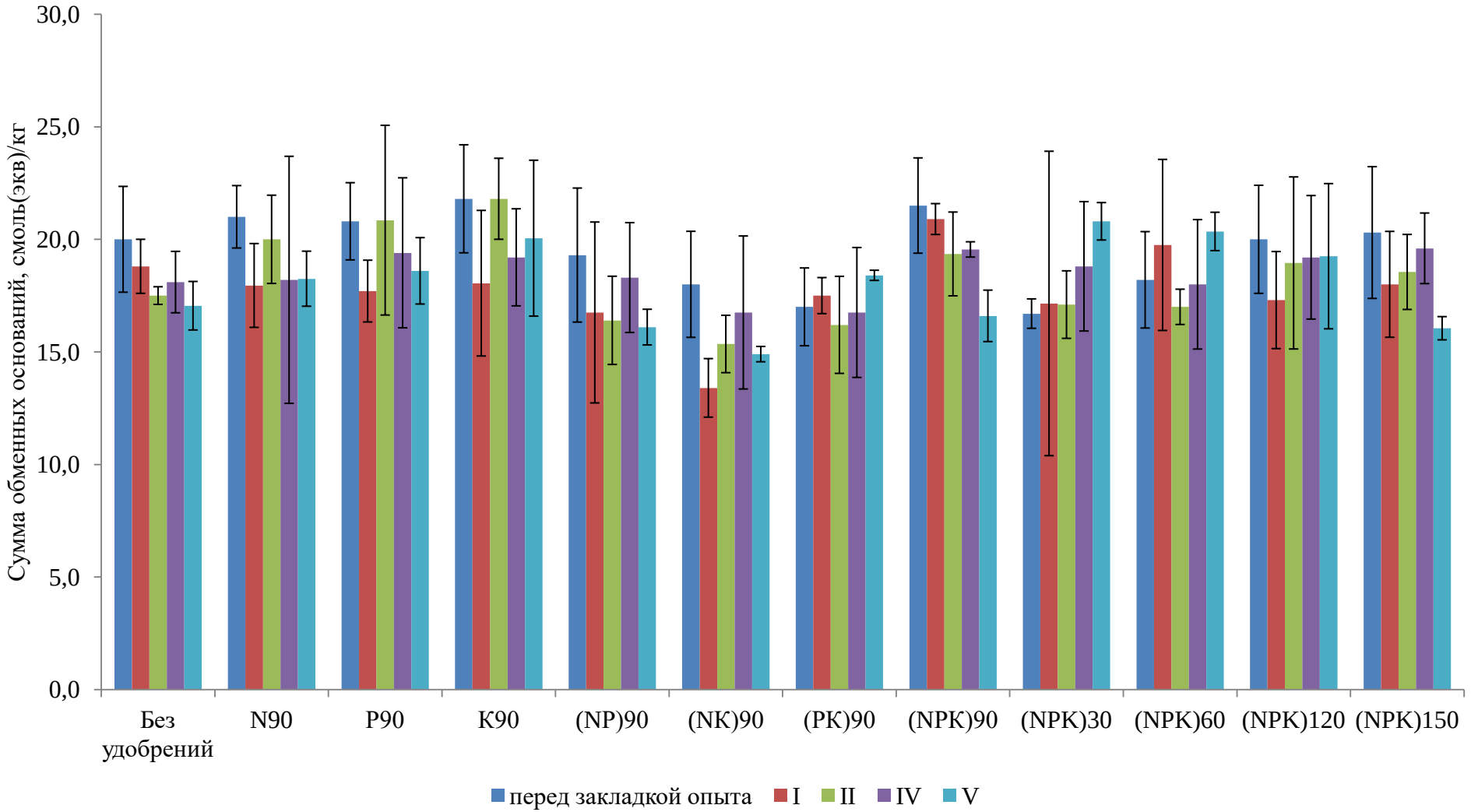


Рисунок 38 – Изменение суммы обменнных оснований в пахотном слое дерново-подзолистой почвы по ротациям севооборота при длительном применении различных видов, соотношений и доз минеральных удобрений (1978-2019 гг.) *(опыт 2)*

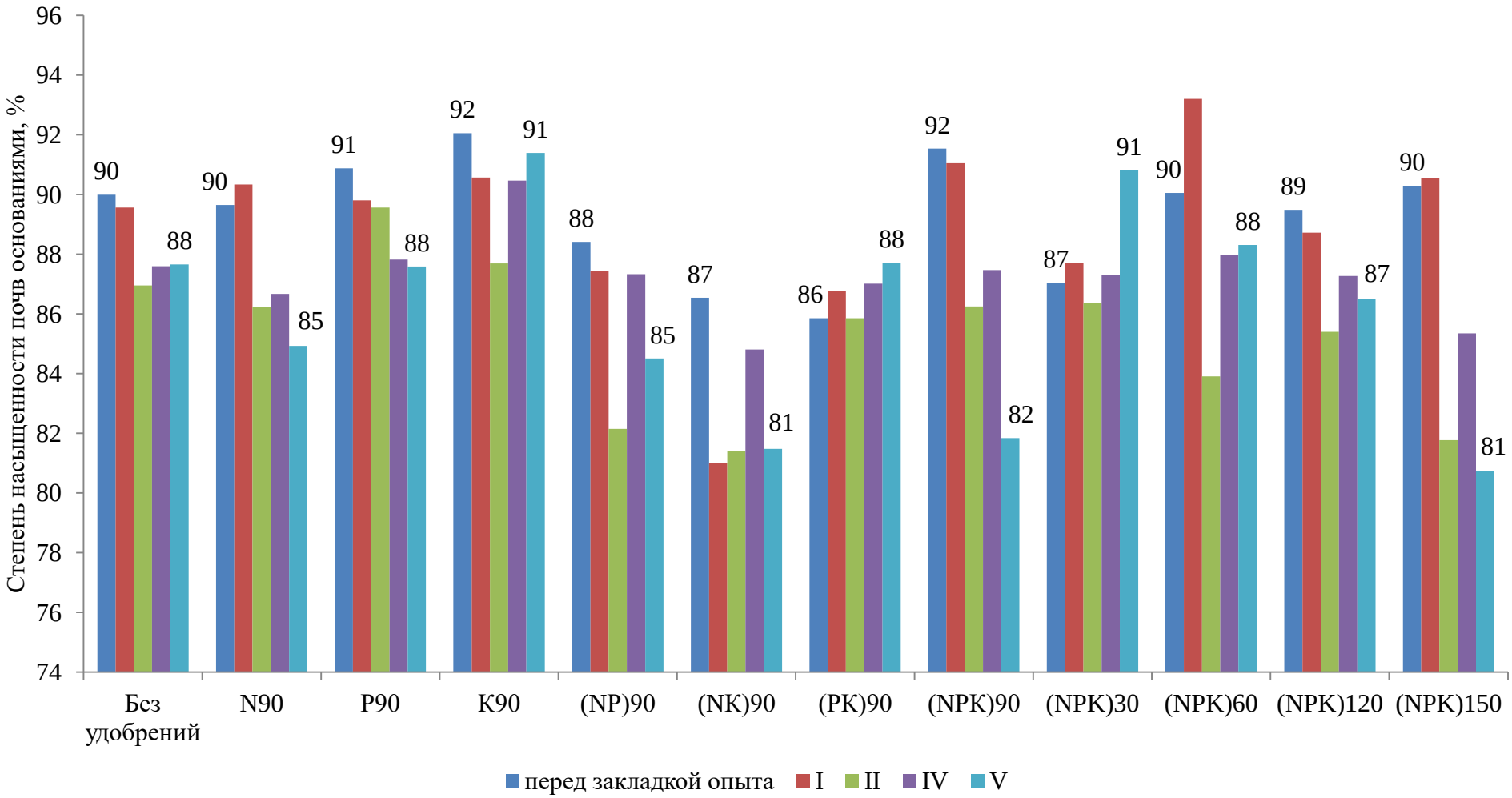


Рисунок 39 – Изменение степени насыщенности почвы основаниями в пахотном слое дерново-подзолистой почвы по ротациям севооборота при длительном применении различных видов, соотношений и доз минеральных удобрений (1978-2019 гг.) *(опыт 2)*

Наблюдения, проведённые в начале VI ротации, по профилю почвы показали, что длительное применение азотных удобрений в чистом виде и в сочетании с суперфосфатом и калием хлористым способствовало существенному подкислению почвы не только пахотного слоя, но и более глубоких слоев (табл. 66). При длительном внесении N_{90} и $(NP)_{90}$ наблюдали снижение показателя pH_{KCl} и увеличение гидролитической кислотности относительно контрольного варианта до глубины 60 см, при внесении $(NK)_{90}$ и $(NPK)_{90}$ по всему метровому слою. В зависимости от варианта и слоя почвы снижение показателя pH_{KCl} варьировало от 0,3 до 1,2 единиц, гидролитическая кислотность увеличилась на 0,4-1,5 смоль(экв)/кг (в 1,3-1,8 раза). Также при внесении азотно-калийных удобрений в метровом слое почвы отмечено снижение суммы обменных оснований в 1,1-1,6 раза. Снижение данного показателя в первую очередь происходило из-за выщелачивания обменных катионов в результате сильного подкисления почвы за пределы метрового слоя и антагонизма калия с кальцием и магнием. Однако, в вариантах N_{90} и $(NP)_{90}$ не наблюдали ухудшение показателей суммы обменных оснований, это, по-видимому, связано с тем, что складывающееся соотношение N:P:K в почве по разному влияло на происходящие почвенные процессы. Степень насыщенности почвы основаниями в вариантах $(NK)_{90}$ и $(NPK)_{90}$ снизилась по всему метровому слою, в вариантах N_{90} и $(NP)_{90}$ – до глубины 60 см.

При сравнении различных доз полного минерального удобрения установлено, что внесение NPK в дозах 60-150 кг д.в. каждого элемента/га привело к существенному подкислению пахотного слоя почвы и снижению степени насыщенности почв основаниями, изменения наблюдали с конца второй ротации. Наибольшее отрицательное влияние на физико-химические свойства почвы отмечено при внесении максимальной дозы $(NPK)_{150}$.

Таблица 66 - Изменение показателей кислотности, суммы обменных оснований и степени насыщенности основаниями по профилю почвы при длительном применении различных видов, соотношений и доз минеральных удобрений (VI ротация, 2021 г.) *(опыт 2)*

Вариант	Перед закладкой, 0-20	VI ротация				
		0-20	20-40	40-60	60- 80	80-100
pH_{KCl}						
Без удобрений	5,7	5,2	4,9	4,8	4,8	6,0
N_{90}	5,7	4,9	4,5	4,5	4,9	5,6
P_{90}	5,9	5,1	5,1	4,9	4,9	5,7
K_{90}	6,0	5,5	5,1	4,7	4,7	5,7
$(NP)_{90}$	5,5	4,5	4,3	4,2	5,0	6,0
$(NK)_{90}$	5,5	4,6	4,6	4,3	4,5	4,9
$(PK)_{90}$	6,0	5,2	4,7	4,5	4,7	5,7
$(NPK)_{90}$	5,9	4,7	4,6	4,5	4,5	4,7
$(NPK)_{30}$	5,8	5,8	5,3	5,0	4,9	6,4
$(NPK)_{60}$	6,0	4,6	4,8	4,7	4,8	6,1
$(NPK)_{120}$	5,8	4,7	4,6	4,5	4,5	4,7
$(NPK)_{150}$	5,7	4,5	4,6	4,4	4,4	4,7
$НСР_{05}$	-	0,3	0,4	0,3	0,3	0,5
Нг, смоль(экв)/кг						
Без удобрений	2,2	2,5	2,7	2,8	2,8	1,4
N_{90}	2,4	3,5	3,7	3,3	2,6	1,7
P_{90}	2,1	2,6	2,9	3,1	2,7	1,7
K_{90}	1,9	1,6	2,4	2,7	2,7	1,6
$(NP)_{90}$	2,5	3,8	3,9	4,0	2,8	1,3
$(NK)_{90}$	2,8	3,9	3,3	3,6	3,1	2,2
$(PK)_{90}$	2,8	2,6	2,7	3,0	2,6	1,3
$(NPK)_{90}$	2,0	4,0	3,5	3,5	2,9	2,5
$(NPK)_{30}$	2,5	2,3	2,9	2,6	1,8	0,9
$(NPK)_{60}$	2,0	3,8	3,3	3,1	2,8	1,7
$(NPK)_{120}$	2,4	3,4	3,3	3,4	2,7	1,9
$(NPK)_{150}$	2,2	5,1	3,8	3,7	3,1	2,4
$НСР_{05}$	-	0,2	0,4	0,5	0,3	0,4
S, смоль(экв)/кг						
Без удобрений	20,0	17,0	18,3	24,0	27,7	40,7
N_{90}	21,0	18,7	22,5	25,7	28,5	38,3
P_{90}	20,8	19,1	19,3	24,6	26,7	38,1
K_{90}	21,8	18,6	21,6	23,8	25,7	36,0
$(NP)_{90}$	19,3	15,9	18,8	22,8	26,9	43,0
$(NK)_{90}$	18,0	13,6	15,0	22,0	24,5	26,1
$(PK)_{90}$	17,0	16,8	20,2	22,6	24,9	36,6
$(NPK)_{90}$	21,5	15,7	18,5	23,0	25,7	29,6
$(NPK)_{30}$	16,7	21,4	24,9	27,6	35,4	47,8
$(NPK)_{60}$	18,2	16,7	19,3	25,5	27,7	43,1
$(NPK)_{120}$	20,0	16,7	21,1	25,4	32,7	39,0
$(NPK)_{150}$	20,3	16,0	20,6	24,5	26,1	27,3
$НСР_{05}$	-	3,4	2,8	1,9	3,1	7,0

Продолжение таблицы 66

Вариант	Перед закладкой, 0-20	VI ротация				
		0-20	20-40	40-60	60- 80	80-100
V, %						
Без удобрений	90	87	87	90	91	97
N_{90}	90	84	85	88	92	96
P_{90}	91	88	87	89	91	96
K_{90}	92	92	90	89	90	96
$(NP)_{90}$	88	80	83	85	91	97
$(NK)_{90}$	87	78	82	86	89	92
$(PK)_{90}$	86	87	88	88	90	97
$(NPK)_{90}$	92	79	84	87	90	92
$(NPK)_{30}$	87	90	90	91	95	98
$(NPK)_{60}$	90	81	85	89	91	96
$(NPK)_{120}$	89	85	86	88	92	95
$(NPK)_{150}$	90	76	85	87	89	92
$НСР_{05}$	-	3	3	2	2	2

Наблюдения, проведённые по профилю почвы, показали, что при длительном применение NPK в дозах 90-150 кг д.в./га подкисление почвы происходит в метровом слое. Соответственно отмечено снижение в метровом слое почвы относительно контрольного варианта и степени насыщенности почв основаниями. При внесении невысокой дозы $(NPK)_{60}$ подкисление почвы и уменьшение степени насыщенности основаниями наблюдали только в пахотном и подпахотном слоях.

При длительном внесении N_{90} и $(NP)_{90}$ отмечены тенденции накопление обменных форм кальция в почве относительно варианта без удобрений с глубины 20-40 см (табл. 67). Данное явление обычно связывают с вымыванием кальция из пахотного горизонта (Минеев, Гомонова, 2009; Якименко, 2012). При внесении $(NK)_{90}$ и $(NPK)_{90}$ существенных изменений в содержании обменных соединений кальция по профилю не наблюдали, что можно объяснить вымыванием кальция за пределы метрового слоя почвы. При низких значениях pH почвы наблюдается снижение устойчивости почвенных коллоидов и способность их адсорбировать катионы кальция, магния и калия, что способствует вымыванию их из корнеобитаемого слоя почвы (Лебедев, 1987).

Таблица 67 - Изменение содержания обменного кальция и обменного магния по профилю почвы при длительном применении различных видов, соотношений и доз минеральных удобрений (VI ротация, 2021 г.) *(опыт 2)*

Вариант	Содержание, смоль(экв)/кг					Запасы, т/га (кг/га)[1]		
	0-20	20-40	40-60	60- 80	80-100	0-20	0-40	0-100
Обменный Ca^{2+}								
Без удобрений	14,3	14,8	24,4	28,9	32,3	0,37	0,8	3,4
N_{90}	15,9	23,3	28,9	31,2	35,4	0,41	1,0	4,0
P_{90}	14,9	16,0	23,1	26,2	28,7	0,39	0,8	3,2
K_{90}	16,9	22,8	26,0	28,5	30,5	0,44	1,1	3,7
$(NP)_{90}$	14,9	21,4	28,1	32,4	35,1	0,39	1,0	3,9
$(NK)_{90}$	13,4	15,6	25,4	30,1	32,3	0,35	0,8	3,5
$(PK)_{90}$	15,9	23,5	28,0	30,1	34,7	0,41	1,0	3,9
$(NPK)_{90}$	16,0	21,6	28,1	29,5	31,4	0,42	1,0	3,7
$(NPK)_{30}$	18,5	28,6	31,7	38,1	37,3	0,48	1,3	4,5
$(NPK)_{60}$	13,9	16,6	25,8	27,6	31,1	0,36	0,8	3,4
$(NPK)_{120}$	16,6	20,3	25,0	30,4	33,3	0,43	1,0	3,7
$(NPK)_{150}$	14,0	19,5	24,7	26,3	28,8	0,38	0,9	3,3
$НСР_{05}$	4,0	3,8	2,7	3,1	2,5	$F_ф<F_т$	0,2	0,4
Обменный Mg^{2+}								
Без удобрений	2,3	3,1	4,3	4,4	5,2	60	144	571
N_{90}	1,9	2,3	3,3	3,0	3,8	49	112	422
P_{90}	1,9	4,8	3,4	4,1	4,6	49	179	552
K_{90}	2,6	3,2	6,2	7,1	7,1	68	154	781
$(NP)_{90}$	1,9	2,1	4,8	5,1	4,5	49	106	547
$(NK)_{90}$	2,0	4,0	4,5	4,5	4,1	52	160	561
$(PK)_{90}$	2,4	3,3	4,1	4,9	3,9	62	152	547
$(NPK)_{90}$	2,6	3,3	4,5	6,1	6,1	68	157	672
$(NPK)_{30}$	2,4	2,9	4,3	3,6	4,2	63	153	521
$(NPK)_{60}$	2,2	3,1	4,3	4,3	3,9	57	135	519
$(NPK)_{120}$	2,3	3,1	4,3	4,2	4,2	59	143	532
$(NPK)_{150}$	2,3	3,1	4,8	5,2	5,1	61	150	645
$НСР_{05}$	$F_ф<F_т$	$F_ф<F_т$	1,4	1,4	1,6	14	32	148

1 – запасы обменного кальция приведены в т/га, обменного магния в кг/га.

Достоверное увеличение обменной формы кальция относительно контрольного варианта в слое 20-40 см отмечено при одностороннем внесении калия хлористого и в слоях 20-40 и 40-60 см при внесении фосфорно-калийных удобрений. Также при одностороннем внесении калия хлористого отмечено накопление обменных соединений магния – с глубины 40 см. Причиной полученных результатов, скорее всего, послужило вытеснение из почвенного поглощающего комплекса ионов кальция и магния ионами калия и перемещение их по профилю (Якименко, 2012). В работе В.Г.

Минеева и Н.Ф. Гомоновой (2009), насыщение обменных позиций калием в вариантах с применением калийных удобрений увеличивалось с 2% до 6-7%, а доля кальция и магния снижалась с 80% до 50-70%.

Возможна и другая причина полученных результатов. Содержание обменных соединений магния при внесении калия хлористого в слое 40-100 см соответствует целинной почве. Известно существование антагонизма между К и Са, Mg (Тихомирова, 2007; Попова и др., 2013). Калий мог препятствовать поступлению в растения магния, что послужило сохранению его обменных соединений в более глубоких слоях почвы относительно других вариантов опыта.

В *опыте 3* известкование не проводили. В данном опыте наблюдали тенденцию к более существенному подкислению почвы, чем в *опытах 1* и *2*. В контрольном варианте опыта показатель pH_{KCl} снизился от первой ротации к пятой с 4,8 до 4,4, гидролитическая кислотность возросла с 3,7 до 4,5 смоль(экв)/кг (рис. 40). Отмечено небольшое снижение степени насыщенности основаниями. Сумма обменных оснований по ротациям варьировала в пределах 17,0 – 19,7 смоль (экв)/кг.

Наблюдения, проведённые в конце V ротации по профилю почвы, показали, что длительное применение осадков городских сточных вод в чистом виде не оказало существенного влияния на изменение показателей кислотности почвы (табл. 68). Отмечено повышение суммы обменных оснований в пахотном слое почвы и, соответственно, степени насыщенности почв основаниями. При внесении ОСВ по фону минеральных удобрений наблюдали увеличение потенциальной кислотности почвы в пахотном слое почвы, Нг увеличилась с 5,6 (фон) до 6,1 смоль(экв)/кг.

Длительное применение минеральных удобрений оказало существенное влияние на кислотность почвы по всему метровому слою. Отмечено достоверное снижение показателя актуальной кислотности на 0,2 единицы в каждом слое почвы по сравнению с контрольным вариантом.

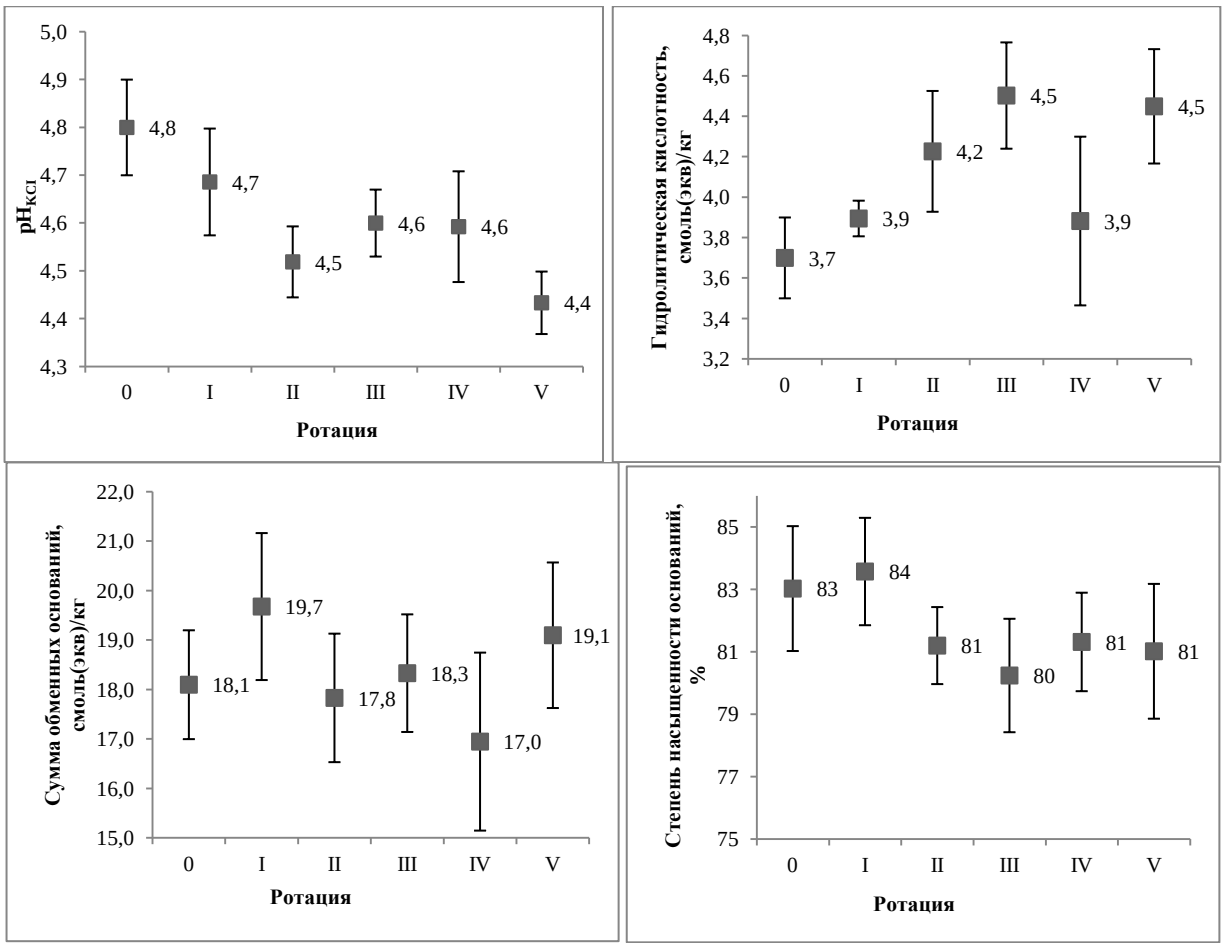


Рисунок 40 - Динамика физико-химических свойств дерново-подзолистой почвы (0-20 см) в контрольном варианте опыта (*опыт 3*)

Гидролитическая кислотность возросла на 0,2-1,4 смоль(экв)/кг (в 1,1-1,3 раза). Максимальный рост гидролитической кислотности отмечен в пахотном и подпахотном слоях. В результате отмечено снижение степени насыщенности основаниями. Достоверные изменения наблюдали до глубины 60 см. Внесение навоза позволило уменьшить отрицательное влияние минеральных удобрений на кислотность почвы.

При внесении навоза КРС отмечено улучшение показателей почвенно-поглощающего комплекса. В пахотном слое почвы наблюдали увеличение pH_{KCl} и суммы обменных оснований. Отмечено уменьшение гидролитической кислотности в слоях 20-40 и 40-60 см, в результате чего в данных слоях почвы увеличилась степень насыщенности основаниями.

Таблица 68 -Изменение показателей физико-химических свойств по профилю почвы при длительном применении ОСВ (V ротация, 2013 г.) *(опыт 3)*

Варианты	Показатель / глубина (см)				
	0-20	20-40	40-60	60- 80	80-100
pH_{KCl}					
Без удобрений	4,4	4,4	4,5	4,5	4,6
Навоз	4,5	4,4	4,5	4,5	4,5
ОСВ	4,4	4,5	4,6	4,6	4,6
NPK – фон	4,2	4,2	4,3	4,3	4,4
Фон + навоз	4,3	4,3	4,4	4,4	4,4
Фон + ОСВ	4,2	4,3	4,4	4,4	4,4
$НСР_{05}$	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2
Нг, смоль(экв)/кг					
Без удобрений	4,2	3,8	2,8	2,7	2,5
Навоз	4,1	3,2	2,6	2,6	2,4
ОСВ	4,4	3,4	2,8	2,7	2,5
NPK – фон	5,6	4,7	3,1	2,9	2,9
Фон + навоз	5,3	4,1	2,9	2,7	2,7
Фон + ОСВ	6,1	4,5	2,7	2,4	2,7
$НСР_{05}$	0,3	0,6	0,2	0,2	0,2
S, смоль(экв)/кг					
Без удобрений	17,5	21,7	26,9	26,4	28,8
Навоз	18,8	24,1	26,5	27,9	27,3
ОСВ	19,9	23,8	26,7	27,3	28,7
NPK – фон	19,3	23,0	25,9	28,5	28,8
Фон + навоз	19,4	21,7	26,9	28,1	29,7
Фон + ОСВ	18,4	19,2	25	22,6	24,6
$НСР_{05}$	1,3	$F_ф<F_т$	$F_ф<F_т$	$F_ф<F_т$	$F_ф<F_т$
V, %					
Без удобрений	80	85	90	91	92
Навоз	82	88	91	91	92
ОСВ	82	88	90	91	92
NPK – фон	78	83	89	91	91
Фон + навоз	79	84	90	91	92
Фон + ОСВ	75	81	90	90	90
$НСР_{05}$	2	2	1	$F_ф<F_т$	$F_ф<F_т$
Обменный Ca^{2+},смоль(экв)/кг					
Без удобрений	15,3	19,8	22,9	23,5	25,0
Навоз	15,3	21,4	23,0	24,3	23,9
ОСВ	15,3	19,8	23,9	24,3	24,2
NPK – фон	13,6	17,0	20,8	22,0	22,6
Фон + навоз	13,1	17,0	21,3	22,3	25,9
Фон + ОСВ	14,8	16,8	21,0	21,5	22,8
$НСР_{05}$	1,4	$F_ф<F_т$	$F_ф<F_т$	$F_ф<F_т$	$F_ф<F_т$
Обменный Mg^{2+}, смоль(экв)/кг					
Без удобрений	3,8	5,5	6,5	6,6	6,5
Навоз	3,6	6,0	6,4	7,0	6,8
ОСВ	3,8	4,4	6,0	6,8	6,1
NPK – фон	3,1	4,8	5,9	5,5	6,3
Фон + навоз	3,4	4,6	5,6	5,1	6,9
Фон + ОСВ	3,3	4,3	5,9	6,5	6,5
$НСР_{05}$	$F_ф<F_т$	$F_ф<F_т$	$F_ф<F_т$	$F_ф<F_т$	$F_ф<F_т$

Таким образом, в результате длительного экстенсивного возделывания сельскохозяйственных культур в течение 35-50 лет в верхнем слое почвы (0-20 см) отмечены тенденции ухудшения показателей кислотности почвы, снижения суммы поглощённых оснований, содержания обменных соединений кальция. Существенному улучшению физико-химических свойств пахотной почвы способствовало известкование, его эффективность наблюдали в течение 2 ротаций полевого восьмипольного севооборота.

Сравнение минеральной, органической и органоминеральной системы удобрения (выровненных по элементам питания) показало, что применение минеральной системы удобрений привело к существенному подкислению почвы и уменьшению степени насыщенности почвы основаниями. При органической системе наблюдали улучшение физико-химических свойств почвы. Органоминеральная система удобрений по влиянию на кислотность почвы, сумму обменных оснований и степень насыщенности основаниями занимала промежуточное положение.

Длительное применение азотных удобрений, как при одностороннем внесении, так и в сочетании с суперфосфатом и калием хлористым (N_{90}, $(NP)_{90,}$ $(NK)_{90}$ и $(NPK)_{90}$) способствовало существенному подкислению почвы, снижению суммы обменных оснований и степени насыщенности основаниями. Сочетание азотных удобрений с калием хлористым оказало более сильное отрицательное влияние на физико-химические свойства почвы. Длительное внесение калийных удобрений в чистом виде способствовало поддержанию кислотности почвы на исходном уровне. Применение фосфорных и фосфорно-калийных удобрений не оказало существенного влияния на изменение физико-химических свойств почвы.

Ухудшение показателей кислотности почвы и степени насыщенности основаниями наблюдали при внесении полного минерального удобрения NPK в дозе свыше 60 кг д.в. каждого элемента/га.

Отрицательные изменения физико-химических свойств почвы при внесении минеральных удобрений NPK свыше 90 кг д.в. каждого элемента /га наблюдали до глубины 1 метр. Положительное влияние органической системы удобрений отмечено в слое 0-40 см.

8 МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПАШНИ И ПРИМЕНЕНИИ УДОБРЕНИЙ

Почвенным микроорганизмам принадлежит важная роль в почвообразовательном процессе, синтезе и минерализации органического вещества. В результате сельскохозяйственного использования в почве создаются другие условия обитания, что приводит к изменению структуры и функций микробиологических сообществ. Влияние могут оказывать система удобрений, система обработки почвы, тип севооборота и другие агротехнические приёмы (Ананьева, 2003; Приходько, Сиземская, 2015; Rusakova, 2020; Никитин и др., 2022).

8.1 Численность микроорганизмов основных эколого-трофических групп почвы

В результате сельскохозяйственного использования почвы может наблюдаться как уменьшение, так и увеличение видового разнообразия почвенной микробиоты, изменение долевого вклада отдельных групп и видов, а также появление структурных особенностей, не свойственных данным зональным условиям (Добровольский и др., 2012).

Дерново-подзолистая почва злаково-разнотравного луга согласно ориентировочной шкале обогащенности почвы аммонифицирующими, амилолитическими и олиготрофными микроорганизмами (Титова, Козлов, 2012) соответствовала градациям «очень бедная» и «бедная» (табл. 69). Общее количество аммонифицирующей микрофлоры (на МПА), отвечающей за разложение азотсодержащего органического вещества, составило 1,5±0,3 млн., амилолитической (на КАА), участвующей в разложении безазотистых соединений почвы и, одновременно с этим, обеспечивающей иммобилизацию минерального азота - 2,0±0,9 млн. и олиготрофной (на ПА) – 3,0±1,4 млн. КОЕ/г воздушно-сухой почвы.

Таблица 69 - Количество микроорганизмов различных эколого-трофических групп в целинной и пахотной дерново-подзолистой почве, коэффициенты, характеризующие направленность трансформации органического вещества почвы, 2016-2017 гг.

Вариант	Общая численность на средах						Общее количество, млн. КОЕ/г воздушно-сухой почвы	Коэффициенты		
	МПА (аммони-фикаторы)	КАА (амило-литики)	ПА (олиго-трофы)	КГА (актино-мицеты)	Гетчинсона (целлюло-золитики)	Чапека (микро-мицеты)		минера-лизации (КАА/МПА)	педотроф-ности (ПА/МПА)	трансформации органического вещества*
	млн. КОЕ/г воздушно-сухой почвы			тыс. КОЕ/г воздушно-сухой почвы						
Злаково-разнотравный луг	1,5±0,3	2,0±0,9	3,0±1,4	165±160	185±75	25±12	6,9	1,3	2,0	2,6
Бессменный чистый пар	1,7±0,3	3,5±2,7	2,2±1,0	365±310	75±25	12±10	7,9	2,0	1,3	2,5
Опыт 1										
Без удобрений	1,3±0,5	2,1±1,0	1,9±1,3	765±500	80±65	23±20	6,2	1,7	1,5	2,1
Навоз 10 т/га	3,7±1,6	2,9±1,4	3,5±2,4	1050±670	130±70	38±18	11,2	0,8	1,0	8,4
Навоз 20 т/га	2,2±1,9	1,8±0,8	1,6±0,6	785±340	105+35	25±16	6,5	0,8	0,7	4,9
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	1,1	0,8	1,9
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	1,0	0,7	1,6
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	2,2	0,9	1,9
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	0,9	1,2	8,2
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	1,0	1,8	5,0

*- (КАА+МПА)·МПА/КАА

Считается, что олиготрофные микроорганизмы отвечают за деструкцию органического вещества почвы промежуточной степени разложенности и его подготовку к процессу гумификации (Титова, Козлов, 2012). Микроорганизмы данной группы обладают способностью расщеплять углеводы наиболее стойких циклических и гетероциклических связей (Мишустин, 1975).

Также в почвенных образцах была определена общая численность целлюлозолитической микрофлоры, актиномицетов и микромицетов. Целлюлозолитики – микроорганизмы, отвечающие за разложение безазотистого органического вещества почвы (полисахариды, целлюлозы). Актиномицеты - мицелиальные бактерии, участвующие в переработке недоступных другим бактериям трудногидролизуемых компонентов органических остатков. Микромицеты (микроскопические грибы) - основные деструкторы растительного опада в почве. Общее количество целлюлозолитической микрофлоры и актиномицетов в почве злаково-разнотравного луга составило 185±75 тыс. КОЕ и 165±160 тыс. КОЕ/г в.с., соответственно. Численность микромицетов изучаемой почвы была очень низкая по сравнению с другими группами микроорганизмов - 25±12 тыс. КОЕ/г в.с. почвы. Однако, путем регуляции почвообразовательных процессов, состава органического вещества почвы, ее оструктуренности, кислотности и подвижности элементов питания в почвенном растворе, микромицеты осуществляют значимую работу в формировании плодородия целинных и окультуренных земель.

Изучение качественного состава амилолитической микрофлоры и целлюлозолитиков показало, что в исследуемой целинной почве в первой группе микроорганизмов в долевом отношении преобладали бактерии (82%), а во второй актиномицеты (91%) (табл. 70).

Таблица 70 - Качественный состав микроорганизмов, утилизирующих минеральные формы азота и целлюлозу в почве, %

Вариант	Соотношение на КАА			Соотношение на среде Гетчинсона с целлюлозой		
	бактерии	грибы	актиноми-цеты	бактерии	грибы	актиноми-цеты
Злаково-разнотравный луг	82	2	16	5	4	91
Бессменный чистый пар	92	2	6	8	18	74
Опыт 1						
Без удобрений	90	1	9	0	19	81
Навоз 10 т/га	84	4	12	12	16	72
Навоз 20 т/га	87	3	10	10	20	70
NPK экв. 10 т навоза	91	4	5	18	27	55
NPK экв. 20 т навоза	88	0	12	9	24	67
Навоз 5 т+NPK экв.	94	1	5	6	7	87
Навоз 10 т + NPK экв.	87	2	12	22	7	71
Навоз 20 т + NPK экв.	79	3	18	17	6	77

Общее количество аммонифицирующей (на МПА) и амилолитической микрофлоры (на КАА), а также микромицетов в пахотной (полевой севооборот, без удобрений) дерново-подзолистой почве при возделывании культур в полевом восьмипольном севообороте с двумя полями клевера сохранилось на уровне целинного аналога. Численность олиготрофных микроорганизмов и целлюлозолитиков была ниже в 1,6 и 2,3 раза, соответственно, что возможно связано с меньшим поступлением грубых растительных остатков. Существенно увеличилось общее количество актиномицетов с 165±160 (луг) до 765±500 тыс. КОЕ/г в.с. почвы (почти в 5 раз). Наблюдали изменения в качественном составе микроорганизмов, утилизирующих минеральные формы азота и целлюлозу в почве. Увеличилась доля бактерий в составе амилолитической микрофлоры (на КАА) с 82 (луг) до 90 %, уменьшилась доля актиномицетов с 16 до 9 %. В сообществе целлюлозолитиков отсутствовали бактерии, доля грибного компонента увеличилась с 4 до 19 %, актиномицетов снизилась с 91 % (луг) до 81 %.

Пахотная дерново-подзолистая почва согласно ориентировочной шкале обогащенности почвы аммонифицирующими, амилолитическими и олиготрофными микроорганизмами также как, и почва целинного аналога,

соответствовала градациям «очень бедная» и «бедная».

Наряду с определением общей численности эколого-трофических групп микроорганизмов дополнительную информацию в агроэкологических исследованиях почвенной микробиоты дает расчет экологических коэффициентов, которые позволяют проследить за особенностями взаимоотношений отдельных групп микроорганизмов, участвующих в общем процессе разложения органического вещества почвы.

Коэффициент минерализации и иммобилизации Е.Н. Мишустина определяется отношением численности микроорганизмов, учтенных посевом на КАА, к численности микроорганизмов, учтенных посевом на МПА. В почвах с энергичным процессом минерализации микроорганизмы, усваивающие минеральный азот (на КАА) обычно превышают по численности микрофлору, развивающуюся за счет органического азота (на МПА) и значения данного коэффициента > 1, что отражает более интенсивный процесс разложения органических веществ в почве. Слишком высокое значение коэффициента Мишустина (> 3-5) может косвенно свидетельствовать о повышении скорости разложения ОВ.

Коэффициент педотрофности (олигонитрофильности) – отношение числа микроорганизмов, растущих на бедном элементами питания агаре (ПА или ЭА), к числу микроорганизмов, растущих на богатых органических средах (на МПА). Повышение данного индекса в целом может свидетельствовать о замедлении процессов деструкции органического вещества и о переходе изучаемого биоценоза в более устойчивое состояние, стремящееся к состоянию климаксной системы (Титова, Козлов, 2012).

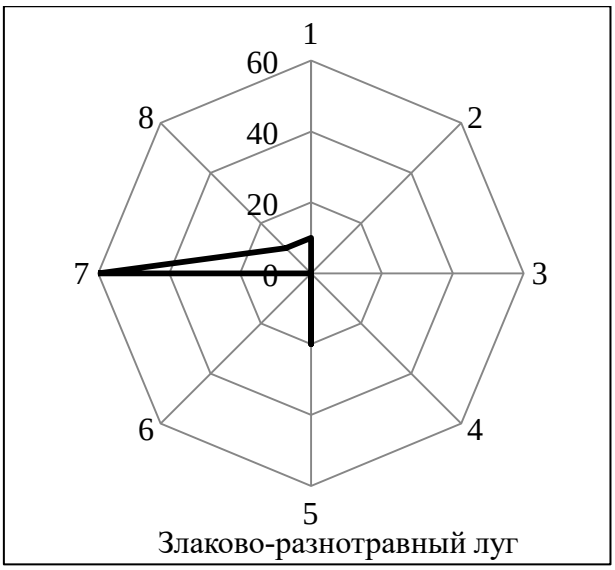
Коэффициент минерализации в пахотной почве (севооборот, без удобрений) увеличился с 1,3 (луг) до 1,7, коэффициент педотрофности уменьшился с 2,0 до 1,5, что свидетельствует о нарушении гомеостатического состояния микробоценоза почвы.

Тестом на нарушение (изменение) микробного сообщества могут служить структурные параметры (частота встречаемости, доминирование,

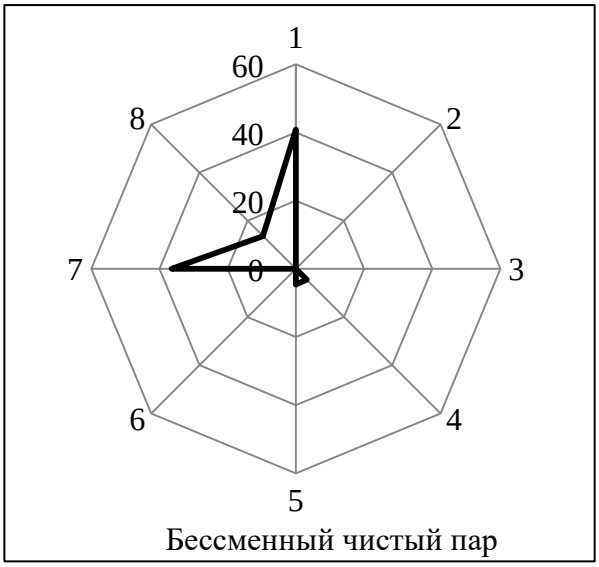
долевое участие) определенной трофической или таксономической группы микроорганизмов. В нашей работе для этой роли были использованы мицелиальные бактерии – актиномицеты, вследствие лучших, по сравнению с другими прокариотами, видовой идентификацией и описанием видовой структуры сообществ (Звягинцев, Зенова, 2001; Strohl, 2004).

Дифференцированный учет в посевах на КГА колоний по морфотипам позволил установить, что на дерново-подзолистой почве преобладали колонии, микроскопия которых выявила типичные для рода *Streptomyces* морфологические признаки, а также рода *Micromonospora*. Выборочная идентификация выделенных штаммов, основанная на анализе фрагментов гена 16S рРНК, подтвердила, что изоляты с данным морфотипом являются представителями рода *Streptomyces*, семейства *Streptomycetaceae*, порядка *Streptomycetales*, класса *Actinobacteria*. В то же время видовая идентификация стрептомицетов, основанная на анализе гена 16s рРНК, была затруднена из-за высокого сходства нуклеотидных последовательностей данного гена для представителей всех таксонов внутри семейства *Streptomycetaceae* (Labeda et al., 2012). Действительно, все нуклеотидные фрагменты, выданные BLAST, для исследуемых штаммов более чем на 98%, соответствовали введенным последовательностям. В связи с этим помимо генетических данных в работе были изучены такие фенотипические признаки изолятов, как цвет воздушного и субстратного мицелия на диагностических средах. Это позволило в образцах почвы определить частоту встречаемости и долевое участие представителей отдельных цветовых секций и серий.

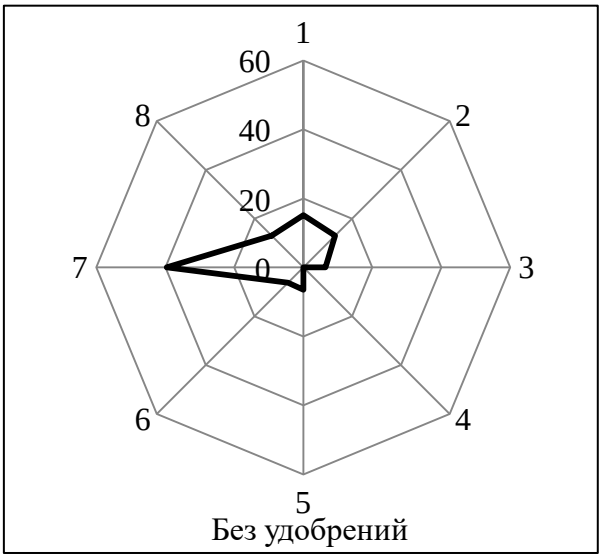
Анализ структуры комплекса актиномицетов показал, что в почве злаково-разнотравного луга встречались представители трех различных цветовых секций и серий рода *Streptomyces* (Cinereus Achromogenes - 10 %, Albus – 20 %, Imperfectus – 60 %) и микромоноспоровые виды (10 %) (рис.41).



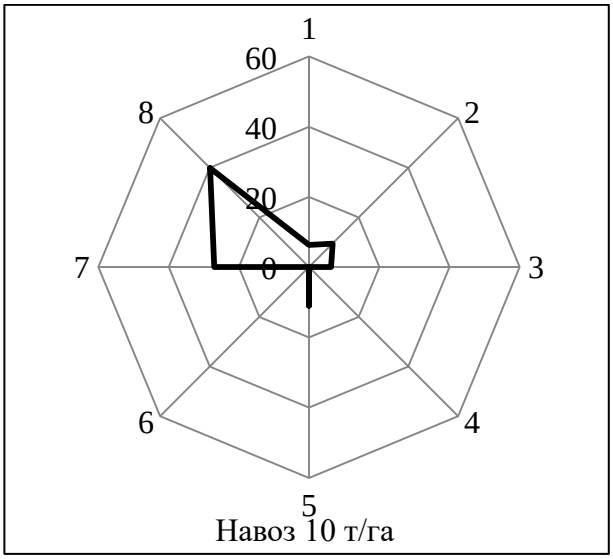
Злаково-разнотравный луг



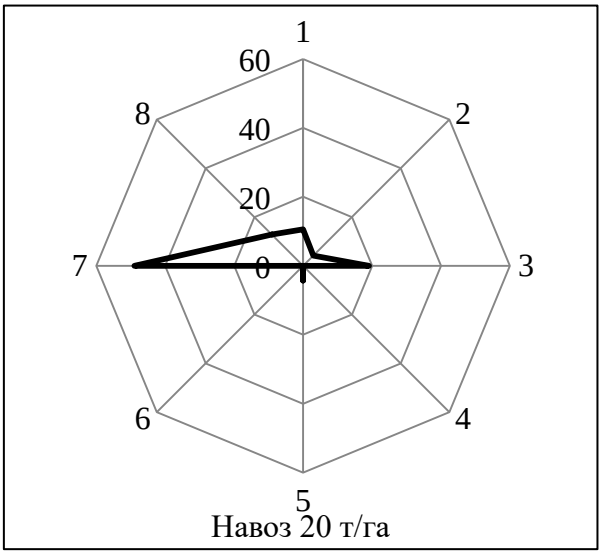
Бессменный чистый пар



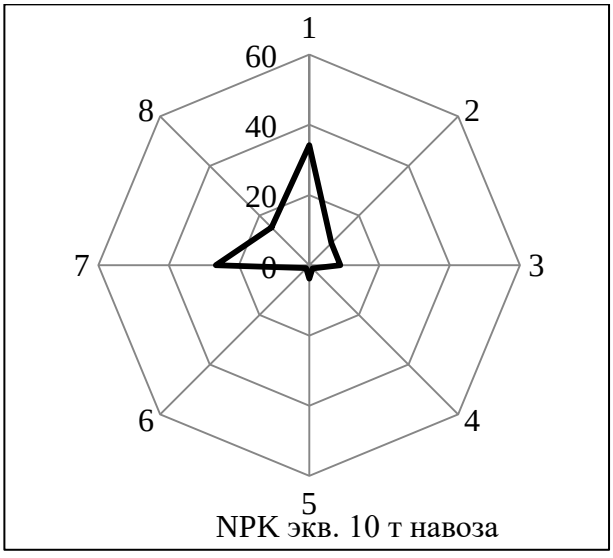
Без удобрений



Навоз 10 т/га



Навоз 20 т/га



NPK экв. 10 т навоза

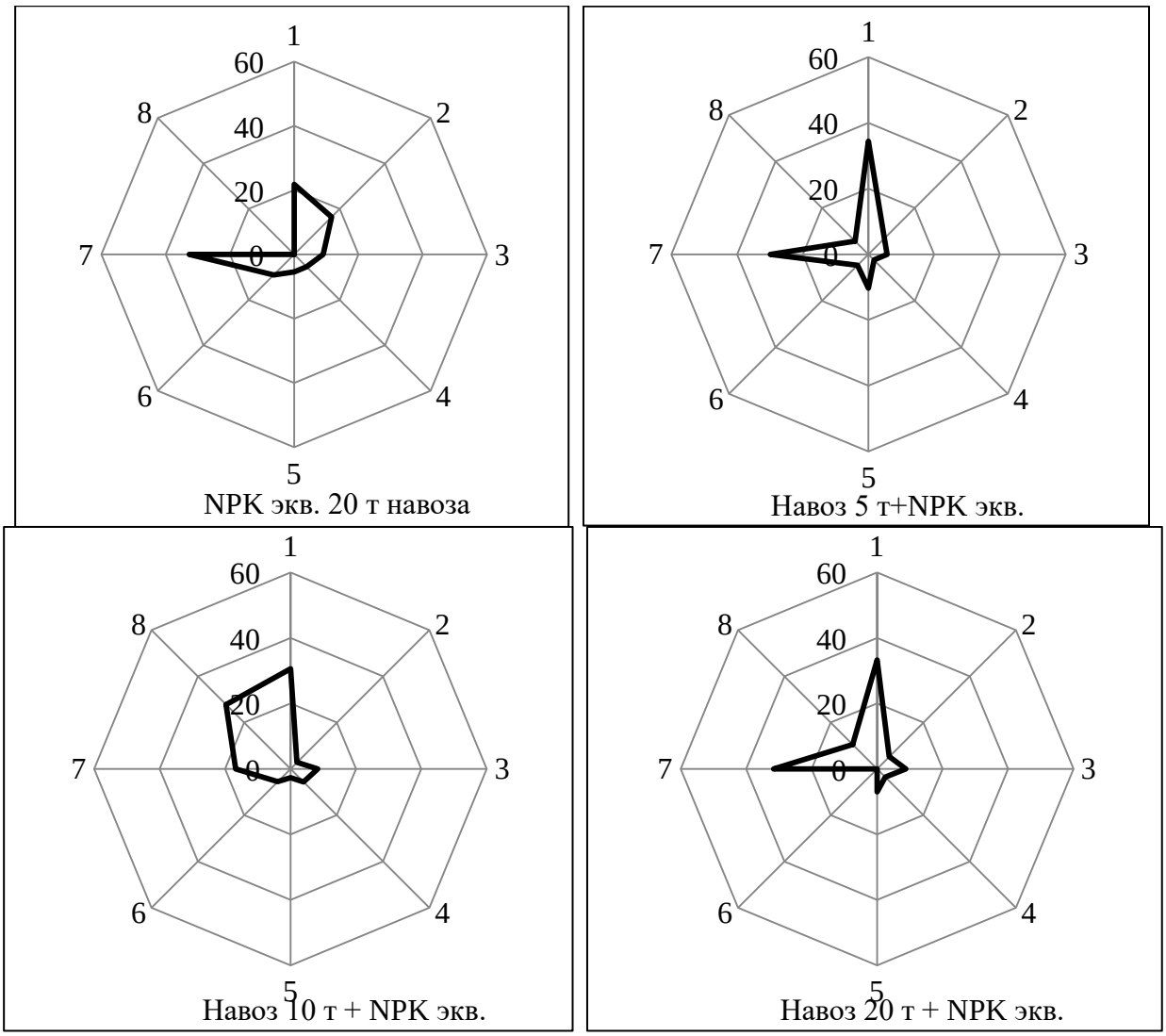


Рисунок 41 - Структура актиномицетных комплексов целинной и пахотной дерново-подзолистой почвы (долевой участие), %: 1-7- род *Streptomyces (*1 – Cinereus Achromogenes, 2 – Clnoreus Chromogenes, 3 – Cinereus Aureus, 4 – Cinereus Violaceus, 5 – Albus, 6 – Helvolus, 7 – Imperfectus), 8 - род *Micromonospora.*

Расширение видового спектра стрептомицетов до шести секций рода *Streptomyces* (Cinereus Achromogenes - 15 %, Cinoreus Chromogenes – 13 %, Clnereus Aureus – 6 %, Albus – 7 %, Helvolus – 6 % и Imperfectus – 40 %) произошло в пахотной почве (севооборот; без удобрений). Долевое участие рода *Micromonospora* составило 13 %.

Отсутствие поступления большого количества свежих растительных остатков, постоянная механическая обработка почвы, усиление аэрации

верхнего горизонта, привели к активизации процессов разложения почвенного ОВ в длительно парующейся почве и, соответственно, к более существенным изменениям в структуре микробиологического комплекса. 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. Снижение количества микромицетов свидетельствует о дефиците в почве легкогидролизуемых азотсодержащих веществ. Наблюдали изменения в качественном составе микроорганизмов, утилизирующих минеральные формы азота и целлюлозу в почве. Увеличилась доля бактерий в составе амилолитической микрофлоры (на КАА) с 82 (луг) до 92 % и доля грибного компонента с 4 до 18 % в составе целлюлозолитиков, в обеих группах уменьшилась доля актиномицетов. При этом существенной разницы в качественном составе между почвой, где возделывали сельскохозяйственные культуры (без удобрений), и почвой бессменного чистого пара не наблюдали.

Коэффициент минерализации при бессменном паровании почвы увеличился до 2,0, педотрофности уменьшился до 1,3 , что свидетельствуют об интенсивных процессах разложения ОВ почвы и нарушении состояния микробиологической системы.

В почве бессменного чистого пара отмечены виды только четырех секций и серий рода *Streptomyces*, изменились доминирующие виды, как в сравнении с целинной почвой, так и пахотной (севооборот, без удобрений): Cinereus Achromogenes - 41 %, Cinereus Violaceus – 5 %, Albus – 5 %, Imperfectus – 36 %. Долевое участие рода *Micromonospora* составило 18 %.

Применение удобрений оказало существенное влияние на численность различных эколого-трофических групп микроорганизмов и их соотношение в

почве. Направленность изменений зависела от системы удобрений, вида удобрений и насыщенности пашни удобрениями.

Благоприятные условия для роста и размножения микрофлоры почвы сформировались при применении органической и органоминеральной систем удобрения (*опыт 1*). В органической системе выделился вариант с насыщенностью пашни навозом 10 т/га в год, здесь наблюдали увеличение численности всех изученных эколого-трофических групп в 1,3-2,8 раза. Общее количество микрофлоры почвы (полученной путём суммирования) в данном варианте возросло почти в два раза. Применение органических удобрений оказало наибольшее влияние на изменение численности микрофлоры на МПА.

Применение органоминеральной системы удобрений при более высокой насыщенности (навоз 10 т/га + NPK эквивалентно навозу и навоз 20 т/га + NPK эквивалентно навозу) способствовало росту и развитию в почве аммонифицирующих, амилолитических, олиготрофных микроорганизмов, целлюлозолитиков и грибов, их численность возросла в 1,2-3,1 раза. Общее количество микроорганизмов в почве возросло с 6,2 млн. до 10,7-13,2 млн. КОЕ/г воздушно-сухой почвы. В данных вариантах наблюдали наибольшее количество микромицетов в опыте. Принимая во внимание существующее мнение о микромицетах, как основных деструкторах органических веществ, создающих условия для развития различных бактерий на продуктах своего ресинтеза, можно сделать предположение, что органоминеральная система способствует развитию микроорганизмов с самыми разнообразными функциями. Это приводит к более интенсивной и глубокой переработке ОВ в почве. При более низкой насыщенности пашни удобрениями – навоз 5 т/га + NPK эквивалентно навозу наблюдали рост количества микроорганизмов на КАА, актиномицетов и уменьшение на ПА. При этом общее количество микроорганизмов в почве сохранилось на уровне контрольного варианта.

Длительное применение минеральной системы удобрений привело к снижению в почве численности аммонифицирующих, амилолитических и

олиготрофных микроорганизмов на 23-74%. Максимальное уменьшение наблюдали при внесении NPK эквивалентно 20 т навоза. Общее количество микроорганизмов в почве снизилось до 3,1-4,2 млн. КОЕ/г воздушно-сухой почвы, ниже контрольного варианта в 1,5-2,0 раза.

Удобрения повлияли на качественный состав амилолитической микрофлоры и целлюлозолитиков. Внесение навоза привело к уменьшению доли бактерий в составе амилолитической микрофлоры почвы (на КАА) с 90 (контрольный вариант) до 84-87 %, увеличению доли грибов (с 1 до 3-4 %) и актиномицетов (с 9 до 10-12%). Существенно возросла доля бактерий (с 0 до 10-12 %) и снизилась доля актиномицетов (с 81 до 70-72 %) в сообществе целлюлозолитиков. В вариантах с органоминеральной системой удобрений изменения в составе амилолитической микрофлоры почвы (на КАА) и целлюлозолитиков были аналогичными вариантам с навозом. Исключение составила доля грибного компонента у целлюлозолитиков – отмечено снижение с 19 (контрольный вариант) до 6-7 %.

Длительное внесение NPK способствовало увеличению доли бактерий в составе целлюлозолитиков до 9-18 %, грибов до 24-27 % и уменьшению доли актиномицетов до 55-67 %. Максимальные изменения в опыте в составе микроорганизмов наблюдали в варианте с наибольшей насыщенностью пашни удобрениями в опыте (навоз 20 т/га + NPK эквивалентно навозу).

В варианте «навоз 5 т/га + NPK эквивалентно навозу» отмечен наибольший коэффициент минерализации в опыте – 2,2, что свидетельствует об интенсивно протекающих в почве процессах разложения органического вещества, а также усиленной иммобилизации минерального азота. В остальных вариантах коэффициент варьировал в небольших пределах от 0,8 до 1,1, это говорит о паритете между процессами иммобилизации и минерализации соединений азота в почве. Наибольший коэффициент педотрофности в опыте отмечен в варианте с максимальной насыщенностью пашни удобрениями навоз 20 т/га + NPK эквивалентно навозу – 1,8, что возможно свидетельствует о замедлении процессов деструкции

органического вещества в данном варианте и о переходе системы в более устойчивое состояние, стремящееся к состоянию климаксной.

Оценить степень превращения поступающих растительных остатков в почве в ОВ позволяет расчёт коэффициента трансформации органического вещества (Зинченко, 2019, 2022). Наиболее высокие коэффициенты трансформации получены при внесении навоза 10 т/га и сочетании навоза 10 т/га в год с эквивалентным количеством минеральных удобрений (8,2 и 8,4), т.е. в этих вариантах растительные остатки наиболее интенсивно трансформировались в ОВ почвы.

Актиномицетный комплекс в варианте без удобрений включал виды шести цветовых секций и серий рода *Streptomyces*, а также виды рода *Micromonospora*. Анализ таксономической структуры комплекса актиномицетов показал, что длительное применение органических и минеральных удобрений влияло на изменение количества видовых секций и серий, а также их доминирование. Наибольшее разнообразие актиномицетов и наиболее широкий спектр доминантов с высокой частотой встречаемости отмечены при применении органоминеральной системы удобрений («навоз 5 т/га + NPK эквивалентно навозу», «навоз 10 т/га + NPK эквивалентно навозу»).

В *опыте 2* исследование численности микроорганизмов в дерново-подзолистой почве проводили в образцах, отобранных в другие временные сроки и при других погодных условиях, чем в целинной почве и опыте 1, поэтому сравнение и анализ, полученных результатов проводили только внутри опыта. Вегетационный период 2021 года, когда проводили отбор образцов, был аномально засушливым, что могло отразиться на результатах исследований (табл. 71).

Таблица 71 - Количество микроорганизмов разных эколого-трофических и таксономических групп в дерново-подзолистой почве при длительном применении минеральных удобрений, коэффициенты, характеризующие направленность трансформации органического вещества почвы (VI ротация, 2021 г.) *(опыт 2)*

Вариант	Общая численность на средах					Общее количество, млн. КОЕ/г воздушно-сухой почвы	Коэффициенты		
	МПА (аммони-фикаторы)	КАА (амило-литики)	Эшби (диазот-рофы)	Гетчинсона (целлюло-золитики)	Чапека (микро-мицеты)		минера-лизации (КАА/МПА)	олигонитроф ильности (Эшби/МПА)	трансформации органического вещества*
	млн. КОЕ/г воздушно-сухой почвы			тыс. КОЕ/г воздушно-сухой почвы					
Без удобрений	8,3±3,0	0,6±0,3	6,7±1,1	90±40	135±115	15,8	0,1	0,8	123
N_{90}	3,8±0,5	1,5±0,2	1,0±0,1	210±35	365±60	6,8	0,4	0,3	13
P_{90}	3,0±0,9	0,7±0,2	0,3±0,1	135±25	35±10	4,3	0,2	0,1	16
K_{90}	4,7±1,0	2,3±0,2	3,7±2,5	190±20	400±175	11,2	0,5	0,8	14
$(NP)_{90}$	4,2±0,3	2,1±0,4	1,7±0,1	135±30	435±290	8,5	0,5	0,4	13
$(NK)_{90}$	2,2±0,5	1,1±0,4	1,3±0,6	200±30	300±100	5,2	0,5	0,6	7
$(PK)_{90}$	4,4±0,2	2,3±0,4	4,0±0,2	245±20	300±20	11,2	0,5	0,9	13
$(NPK)_{90}$	3,4±1,0	1,4±0,6	5,3±0,2	275±40	1035±305	11,4	0,4	1,6	12
$(NPK)_{60}$	4,8±0,1	0,9±0,5	1,0±0,1	165±30	600±200	7,5	0,2	0,2	29
$(NPK)_{150}$	4,8±0,2	3,6±0,2	2,0±1,4	120±25	965±475	11,5	0,7	0,4	11

*- (КАА+МПА)•МПА/КАА

Численность микроорганизмов в контрольном варианте опыта согласно ориентировочной шкалы обогащенности почвы микрофлорой соответствовала градациям «очень бедная» (< 1 млн. КОЕ/г почвы) в отношении утилизаторов минерального азота (на КАА) и целлюлозолитиков (на ГА), «средняя» (5-10 млн. КОЕ/г почвы) в отношении диазотрофов (на ЭА) и «богатая» (6-10 млн. КОЕ/г почвы) в отношении аммонификаторов (на МПА). Диазотрофы (азотфиксаторы, олигонитрофилы) - часть олиготрофных микроорганизмов, способных расти в условиях незначительного количества доступного азота в почвенном растворе. Учет численности олигонитрофилов позволяет определить способность почвенной микрофлоры к несимбиотической фиксации азота воздуха и проследить за активностью разложения ОВ (Титова, Козлов, 2012). Количество грибных пропагул было низкое – 135±115 тыс. КОЕ/г. В структуре комплекса амилолитической микрофлоры почвы (на КАА) преобладали бактерии (89%), целлюлозолитиков - актиномицеты (86%) (табл. 72).

Таблица 72 - Качественный состав микроорганизмов, утилизирующих минеральные формы азота и целлюлозу в почве, %

Вариант	Соотношение на КАА			Соотношение на среде Гетчинсона с целлюлозой		
	бактерии	грибы	актиноми-цеты	бактерии	грибы	актиноми цеты
Без удобрений	89	11	0	9	6	86
N_{90}	81	19	0	6	3	90
P_{90}	96	4	0	2	9	89
K_{90}	81	19	0	7	7	86
$(NP)_{90}$	77	17	6	9	5	86
$(NK)_{90}$	71	29	0	5	1	94
$(PK)_{90}$	67	26	7	2	4	94
$(NPK)_{90}$	62	33	5	6	1	93
$(NPK)_{60}$	64	30	7	15	5	80
$(NPK)_{150}$	89	11	0	21	0	79

Длительное внесение минеральных удобрений не зависимо от вида удобрения, их сочетания и дозы оказало существенное влияние на микробное сообщество почвы. Общая численность аммонифицирующей микрофлоры относительно контрольного варианта снизилась на 42-73%, диазотрофной –

на 20-95%. Наибольшее уменьшение количества диазотрофных микроорганизмов наблюдали при длительном внесении фосфорных удобрений в чистом виде P_{90}, аммонифицирующих – в варианте $(NK)_{90}$. Вместе с тем во всех вариантах с минеральными удобрениями отмечено возрастание численности микроорганизмов, усваивающих минеральные источники азота (на КАА), - в 1,5 – 3,1 раза, целлюлозолитиков - в 2,2 - 2,3 раза и микромицетов в 2,2-7,1 раза. Исключение составил вариант $P_{90,}$ где количество микроскопических грибов снизилось на 74 %. Максимальное увеличение количества амилолитической (на КАА) и целлюлозолитической (на ГА) микрофлоры наблюдали при внесении $(NPK)_{150}$.

Общее количество микроорганизмов в почве при внесении минеральных удобрений было на 28-73 % ниже контрольного варианта (15,8 млн. КОЕ/г воздушно-сухой почвы). Минимальное общее количество микроорганизмов наблюдали при длительном одностороннем применении фосфорных удобрений (4,3 млн. КОЕ/г воздушно-сухой почвы). В вариантах K_{90}, $(PK)_{90}$, $(NPK)_{90}$, $(NPK)_{150}$ общая численность микрофлоры была наиболее близкой к контролю -11,2-11,5 млн. КОЕ/г воздушно-сухой почвы.

Причины уменьшения количества микроорганизмов в почве при внесении минеральных удобрений могут отличаться и зависят от вида удобрений, их сочетания в результате которого происходит определенное изменения агрохимических свойств почвы, например, уменьшение или увеличение количества легкодоступного органического вещества и интенсивности процессов его минерализации, подкисление в результате внесения физиологически кислых азотных удобрений, нарушение соотношения в почве N : P : K. Кроме того считается, от 30-40 % (Благодатская и др., 2016) до 90–99% (Никитин и др., 2022) всех бактерий, архей и микроскопических грибов на сегодняшний день некультивируемы. Поэтому нельзя исключать тот факт, что длительное внесение минеральных удобрений может привести к существенной перестройке микробного

сообщества и увеличению групп микроорганизмов, которые данными методами не культивируются.

Процессы минерализации при внесении минеральных удобрений усилились, но в разной степени. Коэффициент минерализации увеличился в зависимости от вида удобрения, соотношения и дозы от 0,1 (контрольный вариант) до 0,2-0,7. Степень трансформирующего воздействия одностороннего применения азотных, фосфорных и калийных удобрений на микробный комплекс почвы снижалась в ряду K>N>P, где коэффициенты минерализации составили 0,5, 0,4 и 0,2, соответственно. В вариантах с парным сочетанием удобрений ($(NP)_{90}$, $(NK)_{90}$, $(PK)_{90}$) коэффициент был на одном уровне – 0,5. Значения коэффициентов минерализации возрастали с увеличением дозы внесения полного минерального удобрений от 0,2 ($(NPK)_{60}$) до 0,7 ($(NPK)_{150}$).

Коэффициент олигонитрофильности варьировал в опыте от 0,1 до 1,6. Отмечено как увеличение, так и уменьшение значений коэффициента при внесении минеральных удобрений относительно контрольного варианта (0,8). Он заметно снизился в вариантах N_{90} и P_{90} (до 0,3 и 0,1, соответственно), а при внесении K_{90} сохранился на уровне варианта без удобрений. Таким образом, подтвердился порядок воздействия отдельных элементов питания на изменение трофности почвенного микробного комплекса изучаемой дерново-подзолистой почвы: K<N<P. При рассмотрении парных сочетаний минимальное значение коэффициента получено при внесении азотно-фосфорных удобрений – 0,4, затем азотно-калийных – 0,6, а при использовании фосфорно-калийных – 0,9. Максимальное его значение отмечено при внесении полного минерального удобрения $(NPK)_{90}$ – 1,6. Здесь коэффициент олигонитрофильности был в 2-16 раз выше, чем в вариантах с односторонним или парным сочетанием различных видов минеральных удобрений. Рассмотрение различных доз полного минерального удобрения показало, что при дозах NPK 60 и 150 кг д.в./га значения коэффициента были более низкими, чем при дозе 90 кг

д.в./га. Это с учётом коэффициента минерализации может говорить о формировании в почве этого варианта микробного сообщества, наиболее устойчивого к внешним воздействиям.

Наиболее высокий коэффициент трансформации органического вещества среди вариантов с удобрениями получен при внесении NPK в дозе 60 кг д.в./га.

Отмечены изменения в результате длительного применения минеральных удобрений в качественном составе микроорганизмов амилолитической макрофлоры и целлюлозолитиков. Внесение минеральных удобрений существенно снизило долю бактерий (с 89 до 62-81 %) и повысило долю микроскопических грибов (с 11 до 17-33 %) в комплексе микроорганизмов, утилизирующих минеральные формы азота. Наибольшие изменения в структуре отмечены в вариантах с парным сочетанием удобрений и тройном сочетании NPK. Исключение составили варианты, где вносили фосфор в чистом виде и $(NPK)_{150}$. Наблюдали обратную закономерность (увеличение доли бактерий и снижение доли грибов) при длительном внесении $P_{90.}$ В варианте с максимальной дозой внесении полного минерального удобрения состав микроорганизмов на КАА не изменился. При этом следует отметить, что в данном варианте наблюди наибольшие изменение в составе целлюлозолитиков, отмечено существенное увеличение доли бактерий с 9 до 21 % и снижение доли актиномицетов с 86 до 79%, наблюдали отсутствие микроскопических грибов.

В зависимости от дозы внесения полного минерального удобрения в почве выявлены перестройки таксономической структуры комплекса актиномицетов, вырастающих при посеве на КГА. По сравнению с вариантом без удобрений наблюдали снижение частоты встречаемости и долевого участия в комплексе видов, относимых к цветовым секциям и сериям Cinereus Chromogenes, Helvolo-Flavus Helvolus и Albus Albus, но при этом увеличились встречаемость и относительное обилие представителей серий Cinereus Achromogenes и Cinereus Violaceus рода *Streptomyces* (табл. 73).

Таблица 73 ─ Изменение структуры актиномицетного комплекса дерново-подзолистой почвы в результате длительного применения полного минерального удобрения в возрастающих дозах (VIротация, 2021 г.)

Вариант	Доля актиномицетов в прокариотном комплексе, %	Частота встречаемости/ долевое участие видов, %							
		секций и серий рода *Streptomyces*							рода *Micromonospora*
		Cinereus			Albus Albus	Helvolo-Flavus Helvolus	Roseus	Imperfectus	
		Achromogenes	Chromogenes	Violaceus					
Без удобрений	10,4	100/41,0	100/10,0	66/2,0	100/11,0	33/35,0	0	0	33/1,0
$(NPK)_{60}$	7,3	100/75,0	33/5,8	66/3,5	66/7,7	66/7,7	0	0	0
$(NPK)_{90}$	9,0	100/55,8	66/6,7	100/4,8	100/10,6	100/9,6	0	100/1,9	100/10,6
$(NPK)_{150}$	5,5	100/43,5	0	100/13,0	66/8,7	100/26,1	33/4,3	33/4,3	0

В вариантах $(NPK)_{90}$ и $(NPK)_{150}$ появились виды секций Roseus и Imperfectus, не обнаруженные в контрольном варианте. В комплексе актиномицетов варианта $(NPK)_{90}$ в число доминантов перешли виды рода *Micromonospora*, отмеченные в почве без удобрений как типичные редкие. Наибольшее разнообразие актиномицетов (7 таксонов) и наиболее широкий спектр доминантов с высокой частотой встречаемости (100%) – 6 таксонов отмечено при внесении $(NPK)_{90}$. Увеличение дозы полного минерального удобрения, одновременно с изменением частоты встречаемости и относительного обилия представителей отдельных таксонов, приводило к снижению с 10,4 (без удобрений) до 5,5% (NPK_{150}) долевого вклада актиномицетов в прокариотный комплекс почвы. Полученные результаты являются следствием разной чувствительности отдельных представителей актинобиоты к содержанию в почве элементов питания и характеризуют изменение экологического состояния почвы в результате применения минеральных удобрений в возрастающих дозах.

Установлены корреляционные связи в пахотных и целинных дерново-подзолистых почвах для каждой группы микроорганизмов с агрохимическими показателями (прил. 14). Отмечены достоверные прямые корреляционные связи средней силы между количеством в почве аммонифицирующих микроорганизмов (на МПА) и содержанием трудногидролизуемого азота (r=0,5), с показателем pH_{KCL} (r=0,5) и обратной силы с гидролитической кислотностью (r = - 0,5). Взаимосвязь с показателями кислотности почвы выявлена только для аммонифицирующих микроорганизмов.

Установлены достоверные прямые связи средней силы (r=0,5-0,6) между количеством олиготрофных микроорганизмов (на ПА) в почве с содержанием общего азота, его негидролизуемой и трудногидролизуемой формами, подвижного фосфора, валового калия и его необменной формой. Для актиномицетов выявлена взаимосвязь с легкогидролизуемой формой

азота (r=0,7), содержанием минерального фосфора в почве (r=0,5), валовым калием (r=-0,6) и суммой обменных оснований (r=-0,7).

Отмечены достоверные прямые средние и высокие корреляционные связи между количеством целлюлозолитиков и общим (валовым) содержанием азота, фосфора, калия в почве и их различными формами (r=0,6-0,8). Это единственная группа микроорганизмов, у которой отмечена взаимосвязь с минеральной формой азота. Максимальное количество корреляционных связей выявлено для микромицетов. Установлены прямые средние, высокие и очень высокие взаимосвязи с $C_{орг}$, различными формами азота, фосфора, калия (r=0,5-0,9) и обратные средней силы с суммой обменных оснований, степенью насыщенности почв основаниями и содержанием обменного кальция (r=0,5).

Таким образом, 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, соответственно, что связано со снижением поступления грубых растительных остатков. Численность актиномицетов возросла почти в 5 раз. Общая численность амилолитической микрофлоры (на КАА) существенно не изменилась, однако отмечены изменения в качественном составе. Доля бактерий увеличилась с 82 (луг) до 90 %, уменьшилась доля актиномицетов с 16 до 9 %. Также качественные изменения затронули группу целлюлозолитиков – не обнаружены бактерии (луг – 5%), снизилась доля актиномицетов с 91 до 81 %, увеличилась доля грибного компонента с 4 до 19 %. Пахотная дерново-подзолистая почва в соответствии с ориентировочной шкалой обогащенности почвы аммонифицирующими, амилолитическими и олиготрофными микроорганизмами также как, и почва целинного аналога, соответствовала градациям «очень бедная» и «бедная». В пахотной почве наблюдается нарушение гомеостатического состояния микробоценоза, это подтверждают коэффициенты минерализации и педотрофности. Коэффициент минерализации в пахотной почве увеличился с

1,3 (луг) до 1,7, педотрофности уменьшился с 2,0 до 1,5. Анализ структуры комплекса актиномицетов показал, что в пахотной почве, в сравнении с почвой под злаково-разнотравным лугом, произошло расширение видового спектра стрептомицетов с трех до шести секций рода *Streptomyces*. Доминировали в комплексе представители серий рода *Streptomyces* - Cinereus Achromogenes, Cinereus Chromogenes, Imperfectus, а также микромоноспоровые актиномицеты (род *Micromonospora*).

Применение удобрений оказало существенное влияние на численность различных эколого-трофических групп микроорганизмов и их соотношение в почве. Направленность изменений зависела от системы удобрений, вида удобрений и насыщенности пашни удобрениями.

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 т/га + NPK эквивалентно навозу и навоз 20 т/га + NPK эквивалентно навозу) систем удобрения. Наблюдали увеличение численности микроорганизмов изученных эколого-трофических групп относительно варианта без удобрений в 1,2-3,1 раза. Общее количество (культивируемой) микрофлоры почвы возросло с 6,2 до 10,7-13,2 млн. КОЕ/г воздушно-сухой почвы. В почве, где вносили органические удобрения в сочетании с минеральными, наблюдали наибольшее количество микроскопических грибов. 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 эквивалентно навозу) получен высокий коэффициент педотрофности – 1,8, что возможно свидетельствует о замедлении процессов деструкции органического вещества и о переходе системы в более устойчивое состояние, стремящееся к состоянию климаксной.

Длительное внесение минеральных удобрений не зависимо от вида удобрения (N, P, K), их сочетания (NP, PK, NK, NPK) и дозы (насыщенности пашни) существенно повлияло на микробоценоз почвы. Во всех случаях отмечено снижение в почве численности аммонифицирующей и олиготрофной (диазотрофной) микрофлоры на 21-95%. Изменения в численности амилолитической микрофлоры, целлюлозолитиков и микромицетов имело различные направления: сохранялась, увеличивалась или снижалась. При этом общее количество (культивируемое) микроорганизмов в почве при внесении минеральных удобрений уменьшилось на 27-73 %. Рассмотрение различных доз полного минерального удобрения (NPK_{60-150}) показало, что при дозе 90 кг д.в./га, в почве идет формирование микробного сообщества, наиболее устойчивого к внешним воздействиям.

Анализ таксономической структуры комплекса актиномицетов показал, что длительное применение органических и минеральных удобрений влияло на изменение количества и соотношение представителей отдельных видовых секций и серий, а также изменяло состав доминантов. Наибольшее разнообразие актиномицетов и наиболее широкий спектр доминантов наблюдали при применении органоминеральной системы удобрений (навоз 5 т/га + NPK эквивалентно навозу, навоз 10 т/га + NPK эквивалентно навозу) и при внесении полного минерального удобрения NPK в дозе 90 кг д.в. на гектар.

Длительное внесение органических и минеральных удобрений привело к существенным изменениям в качественном составе микроорганизмов, утилизирующих минеральные формы азота (на КАА) и целлюлозу в почве.

8.2 Экофизиологические параметры микробоценоза почвы

Результаты наших исследований показали, что скорость базального дыхания (БД) микроорганизмов в почве злаково-разнотравного луга отмечена на уровне 2,8±0,3 мкг $C–CO_2$/(г ч) (табл. 74).

Таблица 74 - Экофизиологические параметры микробоценоза верхнего слоя (0-20 см) дерново-подзолистой целинной и пахотной почвы

Вариант	БД, мкг $C-CO_2$/ г час	СИД, мкг $C-CO_2$/ г час	$C_{мик}$, мкг/г	qCO_2 мкг CO_2-C /мг Смик час	$C_{мик}/C_{орг}$, %	$C_{мик}/C_{лаб}$ $Na_2P_2O_{7,\%}$	Азотфиксация, мкг C_2H_4 /кг час
Злаково-разнотравный луг	2,8±0,3	7,6±0,8	570±90	4,9	4,6	28,6	62,1±11,4
Полевой севооборот (без удобрений)*	2,3±0,2	7,0±2,3	525±175	4,4	5,0	23,4	32,1±3,8
Бессменный чистый пар	1,6±0,6	4,9±1,2	365±90	4,4	4,7	21,5	11,5±2,9

* - среднее контрольных вариантов длительных опытов 1-3.

Скорость субстрат-индуцированного дыхания (СИД) составила 7,6±0,8 мкг $C–CO_2$/(г ч), соответственно содержание микробной биомассы ($C_{мик}$), полученной расчётным путём (через СИД) - 570±60 мкг/г. Базальное дыхание характеризует скорость минерализации органического вещества в почве, скорость СИД - потенциальную активность микробиологического сообщества (Ананьева, 2003).

Более низкую скорость БД микроорганизмов наблюдали в пахотной почве (полевой севооборот, без удобрений), её значение было ниже почти на 20 % в сравнении с целинной почвой. При этом скорость СИД и содержание $C_{мик}$ в пахотной почве сохранились на уровне целинного аналога. Положительное влияние могло оказать соблюдение севооборота и наличие в нем двух полей клевера. Лишь незначительная часть общей микробной биомассы поддерживает активное состояние в почве без внесения легкодоступных субстратов, в то время как большая часть живых клеток неактивна (Jenkinson et al., 1981; Благодатская и др., 2016). Поэтому при

длительном сельскохозяйственном использовании пашни могло произойти снижение скорости БД в связи с уменьшением легкодоступного ОВ, однако потенциальная активность микроорганизмов, которую отражает СИД, не изменилась. Следует отметить, что в *опыте 3* были получены более низкие значения скорости СИД и $C_{мик}$ в почве варианта без удобрений, чем в почве целинного аналога. Это можно объяснить как вариабельностью показателей, так и отсутствием известкования перед закладкой опыта, что привело к более сильному подкислению почвы в сравнении с другими опытами и, соответственно, ухудшению микробиологических показателей.

Минимальная скорость БД, СИД и $C_{мик}$ отмечены в бессменном чистом пару – на 36-43 % ниже, чем в почве под злаково-разнотравным лугом. Снижение данных показателей связано с уменьшением запасов почвенного углерода и преобладании процессов минерализации.

Доля углерода микробной биомассы в составе органического углерода почвы – важный показатель качества органического вещества и служит индикатором его доступности (Insam, Domsch, 1988; Ананьева, 2009; Ананьева, 2021). Более высокая доля углерода микробной биомассы в составе ОВ отмечена в пахотной почве (полевой севооборот, без удобрений) - 5,0 %, в почве злаково-разнотравного луга доля составила 4,6 %. В пахотной почве в сравнении с целинным аналогом отмечено снижение доли к лабильной части ОВ – с 28,6 до 23,4 %.

Минимальная доля углерода микробной биомассы в составе лабильной части ОВ почвы отмечена в бессменном чистом пару (21,5 %). Однако доля в составе органического углерода в целом сохранилась на уровне целинного аналога. Полученные результаты свидетельствуют о том, что почва бессменного чистого пара достигла определённого нового стабильного состояния, как по содержанию $C_{орг}$, так и количеству микробной биомассы.

Важный процесс, характеризующий интенсивность протекающих биологических процессов в почве – азотфиксация. В нашей работе для определения азотфиксации использовали ацетиленовый метод, который

показывает, что 70—80% культур бактерий, выделяемых из почвы на питательные среды, фиксирует азот (Егоров, 2008; Никитишен, Личко, 2008; Добровольская и др., 2015).

Потенциальная азотфиксирующая активность микробных сообществ дерново-подзолистой почвы была максимальной в почве под лугом (62,1 мкг C_2H_4/кг час). Азотфиксация пахотной почвы (севооборот, без удобрений) была почти в 2 раза ниже. Не смотря на то, что при длительном рациональном использовании (соблюдение севооборота) пашни не отмечено существенных изменений в содержании микробной биомассы, в почве произошли изменения в качественном составе эколого-трофических групп микроорганизмов в сторону ухудшения, что подтверждается результатами по азотфиксации. В работе С.Н. Сазанова и др. авторов (2005) отмечено, что восстановление процессов азотфиксации дерново-подзолистой почвы в условиях залежи (по сравнению с лесной экосистемой) не происходило даже спустя 13 лет.

Наименьший уровень фиксации молекулярного азота (11,5 мкг C_2H_4/кг час) зафиксирован в бессменном пару. Способность азотфиксаторов активно размножаться в почве и проявлять свои многогранные качества ограничивается в первую очередь дефицитом легкодоступных органических веществ в почве.

Проведённые исследования в *опыте 1* показали, что применение органических удобрений (насыщенность навозом 10 и 20 т/га в год) способствовало повышению скорости БД микроорганизмов относительно контрольного варианта на 22-30%, содержания углерода микробной биомассы и её активности - на 42-46 % (табл. 75).

Влияние минеральной системы удобрений на экофизиологические параметры микробиологического сообщества почвы зависело от насыщенности пашни NPK. Скорость БД микроорганизмов существенно не изменилась при умеренной насыщенности пашни минеральными удобрениями (NPK эквивалентно 10 т/га навоза) и почти на 50 % повысились

скорость СИД и содержание углерода микробной биомассы. Уменьшение скорости БД микроорганизмов на 25 % отмечено в варианте с высокой насыщенностью пашни NPK (эквивалентно 20 т/га навоза), что свидетельствует об угнетении микробиологического сообщества в почве. Однако показатели скорости СИД и содержание $C_{мик}$ были высокими – на 63 % выше контрольного варианта. Похожие результаты отмечены в работе Е.А. Сусьян и др. (2008), где при внесении минеральных удобрений наблюдали снижение БД и увеличение СИД, и наоборот.

Таблица 75 - Экофизиологические показатели микробиологического сообщества почвы при длительном применении органической, минеральной и органоминеральной систем удобрения *(опыт 1)*

Вариант	БД, мкг CO_2-C /г ч	СИД, мкг CO_2-C /г ч	$C_{мик}$, мкг/г	qCO_2, мкг CO_2-C /мг Смик час	$C_{мик}/C_{орг}$, %	$C_{мик}/C_{лаб}$ $Na_2P_2O_7$,%
Без удобрений	2,1±0,2	7,2±1,0	540±80	3,8	5,8	21
Навоз 10 т/га	2,7±0,4	10,5±3,3	790±250	3,4	6,7	29
Навоз 20 т/га	2,5±0,3	10,2±1,0	765±75	3,3	6,7	19
NPK экв. 10 т навоза	2,1±0,5	10,5±1,3	790±100	2,7	8,7	25
NPK экв. 20 т навоза	1,5±0,4	11,7±2,2	880±165	1,7	8,4	21
Навоз 5 т+NPK экв.	2,3±0,4	8,5±2,7	635±200	3,6	5,9	22
Навоз 10 т + NPK экв.	2,1±0,5	6,4±3,8	480±285	4,4	4,0	13
Навоз 20 т + NPK экв.	2,0±0,5	4,9±2,0	370±150	5,5	2,8	8
$НСР_{05}$	0,4	3,0	225	-	-	-

Полученные результаты свидетельствуют о том, что длительное применение минеральных удобрений в высоких дозах создаёт неблагоприятные условия для развития микроорганизмов, часть из них переходит в неактивное состояние. Переход в состояние покоя — распространенная стратегия в природе, используемая различными организмами для преодоления неблагоприятных условий окружающей среды (Благодатская и др., 2016; Dworkin, Shah, 2010). Однако, они способны, увеличивать свою метаболическую активность в течение нескольких минут в ответ на внесение субстрата, даже если деление клеток начинается несколькими часами или несколькими днями позже (Winding et al., 1994; Благодатская и др., 2016). Метод СИД основан на измерении начальной

скорости дыхания активных и потенциально активных микроорганизмов после обогащения почвы дополнительным источником углерода в виде глюкозы (Anderson, Domsch, 1978), что объясняет полученные результаты. Можно сделать предположение, что применение минеральных удобрений совместно с дополнительными источниками углерода, например, соломой будет положительно влиять на поддержание активности почвенной микрофлоры. Такие результаты можно увидеть в работах Y. Chen et al. (2017), F. Degrune (2017), I.V. Rusakovoj (2020).

Органоминеральная система удобрений не оказала достоверного влияния на скорость БД микроорганизмов, все отклонения находились в пределах ошибки опыта. Однако стоит обратить внимание на вариант с максимальной насыщенностью пашни удобрениями – «навоз 20 т/га в год + NPK эквивалентно навозу». Здесь наблюдали минимальные значения скорости СИД и содержания $C_{мик}$ в опыте. Показатели были ниже контрольного варианта на 31 %. Наши исследования не предполагали изучение кинетических характеристик роста микроорганизмов, поэтому нельзя достоверно сказать, что на снижение скорости СИД повлияло избыточное поступление элементов питания. Возможно, изменилась скорость роста микроорганизмов, время оборачиваемости активной биомассы в микробном сообществе, что повлияло на полученные результаты.

Доля углерода микробной биомассы в составе ОВ почвы в вариантах с органической и минеральной системой удобрений возросла с 5,8 (контроль) до 6,7-8,7 %. Повышение доли углерода микробной биомассы в лабильной части ОВ почвы наблюдали только при умеренной насыщенности пашни минеральными или органическими удобрениями (NPK эквивалентно 10 т/га навоза или навоз 10 т/га в год).

Минимальная доля углерода микробной биомассы в составе ОВ в целом и его лабильной части в опыте отмечена в варианте с насыщенностью пашни навозом 20 т/га в год и эквивалентного количества NPK.

Дополнительное объяснение происходящих процессов в почве можно получить при использовании микробного метаболического коэффициента (qCO_2), в котором одновременно отражены изменения базального дыхания и микробной биомассы почвы. *qCO2* отражает эффективность преобразования гетеротрофными микроорганизмами органического углерода в микробную биомассу, поэтому его можно использовать в качестве индикатора изменений качества почвы (Fernandes et al., 2005; Никитин и др., 2022). По его величине можно прогнозировать продолжительность и глубину нарушений в экосистемах (Благодатская и др., 1995; Ананьева, 2003; Фрунзе, 2018).

Наименьшее значение qCO_2 было отмечено при высокой насыщенности пашни минеральными удобрениями (NPK эквивалентно 20 т навоза). Низкий уровень *qCO2* может указывать на снижение интенсивности биогеохимического цикла углерода в почве (Никитин и др., 2022; Babur, 2019). Полученные результаты, возможно, связаны с недостатком в почве органического углерода и избытком азота. Наиболее высокое значение qCO_2 в опыте получено в варианте с максимальной насыщенностью пашни удобрениями («навоз 20 т/га + NPK эквивалентно навозу»). Высокие значения *qCO2* свидетельствует о высоких затратах углерода при обороте питательных веществ. Высокое удельное дыхание микроорганизмов qCO_2 также связывают с большей скоростью отмирания микробной биомассы (Сусьян и др., 2008). В вариантах с навозом (насыщенность 10 и 20 т/га) и в варианте «навоз 5 т/га + NPK эквивалентно навозу» получены значения qCO_2 близкие к контролю.

Результаты *опыта 2* показали, что длительное применение фосфорных и калийных удобрений в чистом виде (P_{90} и K_{90}) привело к уменьшению скорости БД на 18-26% (табл. 76). При этом существенных изменений данного показателя в варианте $(PK)_{90}$, как и в других изучаемых вариантах не наблюдали, т.е. нарушения в активной деятельности микробиологического сообщества в первую очередь наблюдается при ярко выраженном избыточном поступлении в систему одного из элементов питания. Сочетание

двух и трёх элементов питания создаёт больше возможностей для поддержания в почве оптимальных условий для развития микроорганизмов.

Таблица 76 - Экофизиологические показатели микробиологического сообщества почвы при длительном применении минеральных удобрений *(опыт 2)*

Вариант	БД, мкг CO_2-С /г ч	СИД, мкг CO_2-С /г ч	$С_{мик}$, мкг/г	qCO_2, мкг CO_2-С /мг Смик час	$С_{мик}/С_{орг}$, %
Без удобрений	2,3±0,2	7,6±1,0	570±70	4,0	5,1
N_{90}	2,4±0,2	14,4±1,9	1080±145	2,3	9,8
P_{90}	1,9±0,2	7,7±1,9	575±140	3,3	4,8
K_{90}	1,7±0,2	7,2±1,4	545±110	3,1	3,9
$(NP)_{90}$	2,6±0,5	7,4±0,5	555±40	4,6	4,3
$(NK)_{90}$	2,4±0,2	9,7±1,4	730±105	3,3	5,7
$(PK)_{90}$	2,3±0,4	9,0±0,9	675±65	3,5	6,3
$(NPK)_{90}$	2,1±0,5	12,4±1,5	930±115	2,3	7,0
$(NPK)_{150}$	2,4±0,2	10,0±1,5	750±115	3,2	5,5
$НСР_{05}$	0,4	3,0	220	-	-

Скорость СИД микроорганизмов и $С_{мик}$ в почве увеличились почти в 2 раза при длительном внесении азотных удобрений. Некоторые исследователи приводят данные, что азотные удобрения наоборот снижают $С_{мик}$ (Luo et al., 2015), что обычно связывают с подкислением почвы. Также достоверное повышение скорости СИД и $С_{мик}$ почвы отмечено при внесении полного минерального удобрения $(NPK)_{90}$ (на 64%). При длительном внесении $(NPK)_{150}$ показатели скорости СИД и $С_{мик}$ в почве были ниже, чем при дозе 90 кг.

Удельное микробное дыхание дерново-подзолистой почвы было ниже контроля во всех вариантах (исключение составил вариант $(NP)_{90}$). Минимальные значения qCO_2 наблюдали в вариантах N_{90} и $(NPK)_{90}$ 2,3 мкг CO_2-С /мг $С_{мик}$ час. В этих же вариантах отмечена наиболее высокая доля углерода микробной биомассы в общем органическом (N_{90} – 9,8% и $(NPK)_{90}$ – 7,0 %). Снижение доли углерода микробной биомассы относительно контрольного варианта наблюдали при внесении в чистом виде фосфорных, калийных удобрений и сочетании азотных с фосфорными удобрениями. Минимальная доля отмечена при внесении калия хлористого K_{90} (3,9 %).

В *опыте 3* применение ОСВ в дозе 40 т/га в течение пяти ротаций севооборота не оказало существенного влияния на микробиологические показатели дерново-подзолистой почвы (табл. 77). Отсутствовали достоверные изменения в экофизиологических показателях микробоценоза почвы и при внесении навоза КРС в дозе 40 т/га (насыщенность пашни 5,7 т/га в год).

Таблица 77 - Экофизиологические показатели микробиологического сообщества почвы при длительном применении ОСВ *(опыт 3)*

Вариант	БД, мкг CO_2-С /г ч	СИД, мкг CO_2-С /г ч	$С_{мик}$, мкг/г	qCO_2, мкг CO_2-С /мг Смик час	$С_{мик}/С_{орг}$, %	$С_{мик}/С_{лаб}$ $Na_2P_2O_7$,%
Контроль	2,4±0,2	6,2±0,9	465±85	5,2	4,2	25,8
Навоз КРС	2,0±0,1	6,0±1,0	450±75	4,6	3,8	22,4
ОСВ	2,0±0,2	5,7±1,0	430±75	4,7	3,4	18,6
NPK – фон	1,7±0,2	3,9±0,8	290±55	5,8	2,4	13,8
Фон + навоз КРС	2,9±0,7	5,0±0,7	370±55	7,7	2,8	16,9
Фон + ОСВ	3,6±0,5	4,6±0,7	350±55	10,3	2,5	13,4
$НСР_{05}$	0,6	1,3	100	-	-	-

Отмечено снижение скорости микробного продуцирования CO_2 и углерода микробной биомассы в почве в результате длительного внесения минеральных удобрений. Скорость БД, СИД и $С_{мик}$ уменьшились на 29-37%. Полученные результаты, возможно, связаны с подкислением почвы. В данном опыте известкование перед закладкой опыта не проводили, поэтому процессы подкисления почвы в результате внесения минеральных удобрений имели более интенсивный характер, чем в других опытах.

Отрицательное воздействие минеральных удобрений на микробиологические показатели почвы снизилось при внесении навоза. Значения скорости БД, СИД и $С_{мик}$ в варианте «фон + навоз КРС» приблизились к контрольному варианту. Применение ОСВ в сочетании с минеральными удобрениями достоверно повысило скорость БД - в 1,5 раза относительно контроля и в 2,1 раза относительно фона. Здесь также получено максимальное значение удельного микробного дыхания почвы qCO_2 – 10,3, что свидетельствует о напряжённости микробиологических процессов углеродного цикла.

Корреляционные зависимости между микробиологическими показателями почв и её агрохимическими свойствами по опытам сильно варьировали и в отдельных случаях носили разнонаправленный характер (прил. 15). Например, в *опыте 1* между скоростью БД и показателем pH_{KCL} установлена достоверная высокая прямая корреляционная зависимость (r=0,8), в *опыте 2* - высокая обратная (r=-0,8), а в *опыте 3* – недостоверная слабая (r=-0,4). Корреляционная зависимость скорости БД с $C_{орг}$ в *опыте 3* высокая, в *опытах 1 и 2* слабая. Аналогичные результаты встречаются и в других исследованиях. В работе В.Е. Приходько, М.Л. Сиземской (2015) установлена высокая корреляционная связь между данными показателями, а в исследованиях Е.Г. Гавриленко и других авторов (2011) - слабая (r=0,3-0,4). Полученные результаты корреляционного анализа связаны с динамичностью изучаемых микробиологических параметров почвы и их большей взаимосвязи с влажностью почвы и температурным режимом.

О более значимых закономерностях стоит говорить при рассмотрении результатов всех трёх опытов, включая целинную почву и почву бессменного чистого пара. В пахотных и целинных дерново-подзолистых почвах были установлены достоверные прямые и обратные корреляционные связи средней силы между микробным метаболическим коэффициентом, в котором одновременно отражены изменения скорости БД и $C_{мик}$, с показателями кислотности почвы (pH_{KCL} – r = - 0,5; Нг - r = 0,6), степенью насыщенности почв основаниями (r=-0,5) и необменной формой калия (r=-0,5). Из чего можно сделать вывод, что ухудшение кислотно-основных свойств почвы и уменьшение содержания в ней необменной формы калия ведёт к нарушению функционирования микробиологического сообщества почвы.

Таким образом, скорость базального дыхания микроорганизмов в пахотной почве (севооборот, без удобрений) была почти на 20 % ниже в сравнении с целинным аналогом. Однако, при этом, потенциальная активность микроорганизмов в почве и количество углерода микробной биомассы существенно не изменились, что возможно связано с соблюдением

севооборота и наличием в нем двух полей клевера. Длительное сельскохозяйственное использование пашни существенно повлияло на процессы азотфиксации в почве. Отмечено снижение потенциальной азотфиксирующей активности почвы почти в 2 раза.

Нарушения в функционировании микробиологического сообщества почвы наблюдали при её бессменном паровании. Отмечено уменьшение скорости БД с 2,8±0,3 (луг) до 1,6±0,6 мкг $C–CO_2$/(г ч), СИД – с 7,6±0,8 до 4,9±1,2 мкг $C–CO_2$/(г ч) и $C_{мик}$ – с 570±90 до 365±90 мкг/г. Уменьшение содержания микробной биомассы свидетельствует о снижении запасов почвенного углерода и преобладании процессов минерализации. Доля $C_{мик}$ в составе органического углерода в целом сохранилась на уровне целинного аналога. Почва бессменного чистого пара достигла определённого стабильного состояния, как по содержанию $C_{орг}$, так и количеству микробной биомассы.

Изменение экофизиологических параметров (базальное дыхание, субстрат-индуцированное дыхание, углерод микробной биомассы, микробный метаболический коэффициент, доля углерода микробной биомассы в составе ОВ почвы) микробиологического сообщества почвы зависело от системы удобрения, вида удобрений, насыщенности (доз) пашни удобрениями.

Применение органических удобрений (навоз КРС) при насыщенности пашни 10 т/га в год и более способствовало повышению активности микроорганизмов в почве, отмечено увеличение на 22-46% скорости базального и субстрат-индуцированного дыхания, углерода микробной биомассы, что обусловлено непосредственным поступлением в почву органического субстрата, в том числе легкодоступного. Кроме того органические удобрения сами являются источником микроорганизмов. При внесении навоза КРС с насыщенностью пашни 5,7 т/га в год не наблюдали изменений в экофизиологических параметрах микробиологического сообщества. Применение нетрадиционного органического удобрения ОСВ

(40 т/га или насыщенность 5,7 т/га в год) не оказало существенного влияния на дыхание микроорганизмов и содержание углерода микробной биомассы.

Установлено, что длительное применение фосфорных и калийных удобрений в чистом виде (P_{90} и K_{90}) привело к угнетению деятельности микроорганизмов в почве. Отмечено достоверное снижение скорости базального дыхания на 18-26%. Здесь также отмечено снижение доли углерода микробной биомассы в составе органического вещества почвы. Это говорит о нарушении процессов минерализации органического вещества. Длительное внесение азотных удобрений (N_{90}) привело к увеличению потенциальной активности микроорганизмов и содержания углерода микробной биомассы почти в 2 раза. Не выявлено существенных изменений в дыхании почвы и содержании углерода микробной биомассы при сочетании азотно-фосфорных, азотно-калийных и фосфорно-калийных удобрений.

При длительном внесении полного минерального удобрения изменения в экофизиологических параметрах микробиологического сообщества почвы наблюдали по трём направлениям:

– снижение скорости базального дыхания, субстрат-индуцированного дыхания (потенциальной активности микроорганизмов) и содержания углерода микробной биомассы;
– отсутствие влияния на скорость базального дыхания, повышение субстрат-индуцированного дыхания и содержания углерода микробной биомассы;
– снижение скорости базального дыхания, повышение субстрат-индуцированного дыхания и содержания углерода микробной биомассы.

Влияние на изменение данных параметров зависело от насыщенности (дозы) пашни NPK и складывающихся в течение длительного применения минеральных удобрений физико-химических свойств почвы. Увеличение потенциальной активности микроорганизмов в почве в результате применения минеральных удобрений, на фоне снижение базального дыхания говорит об ухудшении условий для развития микроорганизмов. Переход в

состояние покоя - распространенная стратегия в природе, используемая различными организмами для преодоления неблагоприятных условий окружающей среды. Дополнительное поступление источников органического вещества, например соломы, может способствовать восстановлению активности микроорганизмов в почве.

Существенного изменения в экофизиологических параметрах микробоценоза почвы не установлено при применении органоминеральной системы удобрений, при условии умеренной насыщенности пашни удобрениями. Внесение навоза способствовало снижению отрицательного воздействия минеральных удобрений на микробиологические показатели почвы. При очень высокой насыщенности пашни удобрениями в варианте «навоз 20 т/га в год + NPK эквивалентно навозу» наблюдали тенденцию снижение скорости СИД, содержания углерода микробной биомассы. Здесь также наблюдали наиболее высокое значение микробного метаболического коэффициента, что свидетельствует о высоких затратах углерода при обороте питательных веществ. Рост содержания органического углерода в почве при внесении навоза 20 т/га и эквивалентного количества минеральных удобрений может быть связан с торможением процессов минерализации органического вещества.

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.

Длительное сельскохозяйственное использование пашни, внесение органических и минеральных удобрений приводит к нарушению устойчивости микробных сообществ в почве. Наблюдаются изменения, как количественных микробиологических параметров, так и в таксономической структуре. Характер и направление выявленных изменений зависели от системы удобрения, вида удобрений, насыщенности (доз) пашни

удобрениями. Наиболее благоприятное влияние на состояние микробиологического сообщества почвы по комплексу показателей отмечено при применении органической системы удобрений с насыщенностью навозом 10 т/га в год и органоминеральной системе – «навоз 10 т/га в год + NPK эквивалентно навозу». При использовании органоминеральной системы с более низкой насыщенностью – внесение навоза 5 т/га + эквивалентное количество NPK, происходит интенсивная минерализация ОВ почвы и его потеря. При очень высокой насыщенности пашни удобрениями навоз 20 т/га в год + NPK эквивалентно навозу получены данные, свидетельствующие о замедлении процессов деструкции органического вещества и о переходе системы в более устойчивое состояние, стремящееся к состоянию климаксной.

Наибольшие отрицательные изменения в микробном сообществе почвы отмечены при длительном одностороннем применении фосфорных и калийных удобрений или очень высокой насыщенности NPK. Установлено, что при дозе NPK 90 кг д.в./га, в почве идет формирование микробного сообщества, наиболее устойчивого к внешним воздействиям.

9 ВЛИЯНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ УДОБРЕНИЙ НА ПРОДУКТИВНОСТЬ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР, БАЛАНС ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА И ЭЛЕМЕНТОВ ПИТАНИЯ

Удобрения являются одним из определяющих факторов, обеспечивающих величину и стабильность урожаев возделываемых культур. Наиболее эффективно оценить системы удобрений можно только в условиях севооборота. Уровень применения удобрений в севообороте, обеспечивающий максимальную продуктивность культур и положительный баланс элементов питания – важный нормативный материал при разработке мероприятий по сохранению плодородия почв.

9.1 Урожайность полевых культур

Результаты *опыта 1* показали, что продуктивность сельскохозяйственных культур без применения удобрений по ротациям севооборота варьировала от 2,34 до 2,72 т з.ед. и в среднем за 5 ротаций (40 лет) составила 2,58 т з.ед. (табл. 78). Применение органической, минеральной и органоминеральной систем удобрений достоверно повысило продуктивность севооборота во всех вариантах опыта на 15-30 %. Наибольшая продуктивность получена при применении минеральной и органоминеральной систем удобрения. При органической системе удобрений полученная продуктивность севооборота достоверна ниже относительно других систем удобрений. Наибольшее увеличение продуктивности на 0,77 т з.ед. наблюдали в варианте с максимальным насыщением пашни удобрениями «навоз 20 т + NPK эквивалентно навозу». 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.

Таблица 78 - Влияние применения органической, минеральной и органоминеральной систем удобрения на продуктивность полевого восьмипольного севооборота (среднее по 2 закладкам, 1977-2017 гг.)*(опыт 1)*

Вариант	Ротации					Среднее за 5 ротаций	Отклонение	Окупаемость 1кг д.в. NPK, кг з.ед.
	II	III	IV	V	VI			
	т з. ед. в год							
Без удобрений	2,59	2,72	2,34	2,72	2,54	2,58	-	-
Навоз 10 т/га	3,01	3,18	2,75	3,08	2,84	2,97	0,39	3,5
Навоз 20 т/га	3,17	3,34	2,78	3,22	3,01	3,10	0,52	2,4
NPK экв. 10 т навоза	3,21	3,27	2,92	3,20	3,24	3,17	0,59	5,4
NPK экв. 20 т навоза	3,29	3,29	3,19	3,29	3,44	3,30	0,72	3,3
Навоз 5 т+NPK экв.	3,28	3,22	2,84	3,26	3,25	3,17	0,58	5,3
Навоз 10 т + NPK экв.	3,11	3,32	3,04	3,48	3,41	3,27	0,69	3,1
Навоз 20 т + NPK экв.	3,25	3,26	3,22	3,59	3,46	3,36	0,77	1,8
$НСР_{05}$	0,13	0,09	0,12	0,09	0,16	-	0,06	-

Наибольшая окупаемость в среднем за 5 ротаций получена при внесении NPK экв. 10 т навоза и навоза 5 т/га + NPK эквивалентно навозу ($N_{35}P_{25}K_{50}$ в год). Оплата 1 кг д.в. NPK в данных вариантах составила 5,3-5,4 кг з.ед.

В среднем за 5 ротаций урожайность зерна озимой ржи при применении различных систем удобрений возросла на 21-28 %, яровой пшеницы – на 14-52 %, ячменя – на 10-13 %, овса – на 17-25 %, урожайность клубней картофеля - на 24-58 % (табл. 79). Наиболее отзывчивыми на применение удобрений среди всех культур в севообороте были яровая пшеница и картофель. В вариантах «NPK эквивалентно 20 т навоза», «навоз 10 т + NPK эквивалентно навозу» и «навоз 20 т + NPK эквивалентно навозу» урожайность данных культур возрастала на 43-58 %, в отдельные ротации урожайность культур в этих вариантах 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 %.

Таблица 79 - Влияние длительного применения органической, минеральной и органоминеральной систем удобрения на урожайность сельскохозяйственных культур (среднее по 2 закладкам, 1977-2017 гг.), т/га

Вариант	Ротации					Среднее за 5 ротаций
	II	III	IV	V	VI	
Озимая рожь (зерно)						
Без удобрений	3,0	2,5	2,8	3,1	3,2	2,9
Навоз 10 т/га	3,2	3,7	3,1	3,6	3,8	3,5
Навоз 20 т/га	3,6	4,0	3,1	3,7	4,1	3,7
NPK экв. 10 т навоза	3,4	3,7	3,0	3,4	4,0	3,5
NPK экв. 20 т навоза	3,7	3,9	3,2	3,6	4,2	3,7
Навоз 5 т+NPK экв.	3,5	3,8	3,1	3,3	4,1	3,6
Навоз 10 т + NPK экв.	3,6	4,0	3,2	3,4	4,2	3,7
Навоз 20 т + NPK экв.	3,6	3,7	3,2	3,3	4,4	3,6
$НСР_{05}$	0,3	0,4	0,2	0,2	0,5	0,2
Яровая пшеница (зерно)						
Без удобрений	1,5	1,8	2,4	2,3	2,5	2,1
Навоз 10 т/га	1,7	2,0	2,9	2,8	2,8	2,4
Навоз 20 т/га	1,9	2,1	3,3	2,8	3,0	2,6
NPK экв. 10 т навоза	2,2	2,2	3,3	2,9	3,4	2,8
NPK экв. 20 т навоза	2,5	2,2	4,3	3,5	3,4	3,2
Навоз 5 т+NPK экв.	2,1	1,8	3,2	3,1	3,2	2,7
Навоз 10 т + NPK экв.	2,3	2,0	3,7	3,5	3,5	3,0
Навоз 20 т + NPK экв.	2,5	2,0	4,4	3,8	3,3	3,2
$НСР_{05}$	0,4	0,3	0,3	0,2	0,3	0,2
Клевер 1 г.п. (сено 16 %)						
Без удобрений	2,9	7,0	4,3	4,9	3,3	4,5
Навоз 10 т/га	3,3	6,9	5,1	5,0	3,2	4,7
Навоз 20 т/га	2,9	7,2	5,0	5,9	3,5	4,9
NPK экв. 10 т навоза	2,3	6,7	4,6	5,4	3,1	4,4
NPK экв. 20 т навоза	2,0	6,3	4,3	5,0	3,1	4,2
Навоз 5 т+NPK экв.	2,8	7,0	4,7	5,2	3,5	4,6
Навоз 10 т + NPK экв.	2,1	5,7	4,5	5,3	3,4	4,2
Навоз 20 т + NPK экв.	1,7	5,2	4,2	5,2	3,4	3,9
$НСР_{05}$	0,5	0,5	0,5	0,6	0,4	0,2
Клевер 2 г.п. (сено 16 %)						
Без удобрений	2,6	3,9	1,5	3,4	3,0	2,9
Навоз 10 т/га	2,5	4,3	1,5	4,0	3,0	3,1
Навоз 20 т/га	2,4	3,9	1,7	3,7	3,3	3,0
NPK экв. 10 т навоза	2,5	4,3	1,5	4,1	3,3	3,1
NPK экв. 20 т навоза	2,7	3,9	1,7	4,1	3,8	3,2
Навоз 5 т+NPK экв.	2,5	4,5	1,5	4,1	3,7	3,3
Навоз 10 т + NPK экв.	2,6	4,3	1,6	4,1	3,9	3,3
Навоз 20 т + NPK экв.	2,9	4,6	1,5	4,1	3,9	3,4
$НСР_{05}$	0.4	0.1	$F_ф<F_т$	0.4	0.5	0,2

Продолжение таблицы 79

Вариант	Ротации					Среднее за 5 ротаций
	II	III	IV	V	VI	
Ячмень (зерно)						
Без удобрений	3,3	3,3	3,0	2,3	3,6	3,1
Навоз 10 т/га	3,2	3,8	3,5	2,4	3,8	3,4
Навоз 20 т/га	3,4	3,8	3,7	2,5	3,8	3,5
NPK экв. 10 т навоза	3,6	3,7	3,3	2,4	3,8	3,4
NPK экв. 20 т навоза	3,6	3,7	3,2	2,6	4,1	3,4
Навоз 5 т+NPK экв.	3,5	3,9	3,4	2,5	3,9	3,4
Навоз 10 т + NPK экв.	3,6	3,7	3,2	2,7	3,8	3,4
Навоз 20 т + NPK экв.	3,7	3,9	3,4	2,8	3,5	3,5
$НСР_{05}$	$F_ф<F_т$	0.3	$F_ф<F_т$	0.2	0.2	0,1
Картофель (клубни)						
Без удобрений	15,7	18,0	12,9	19,5	14,2	16,1
Навоз 10 т/га	21,4	19,6	17,3	23,1	18,0	19,9
Навоз 20 т/га	22,8	23,2	14,2	24,1	18,8	20,6
NPK экв. 10 т навоза	20,2	20,7	21,7	24,9	25,3	22,5
NPK экв. 20 т навоза	23,7	21,8	23,4	25,0	26,7	24,1
Навоз 5 т+NPK экв.	23,6	20,3	18,6	26,5	24,8	22,8
Навоз 10 т + NPK экв.	20,7	22,8	22,3	28,1	26,5	24,1
Навоз 20 т + NPK экв.	24,7	21,6	23,6	29,2	27,7	25,4
$НСР_{05}$	2,7	2,2	3,5	2,1	3,6	1,2
Овёс (зерно)						
Без удобрений	3,7	2,1	2,1	2,5	1,6	2,4
Навоз 10 т/га	4,6	2,5	2,2	3,0	1,6	2,8
Навоз 20 т/га	4,6	2,5	2,5	3,2	1,8	2,9
NPK экв. 10 т навоза	4,6	2,7	2,5	3,3	1,8	2,9
NPK экв. 20 т навоза	4,2	2,8	2,8	3,2	2,1	3,0
Навоз 5 т+NPK экв.	4,6	2,3	2,5	3,1	1,6	2,8
Навоз 10 т + NPK экв.	4,1	2,8	2,6	3,5	1,9	3,0
Навоз 20 т + NPK экв.	3,8	2,8	2,6	3,4	2,2	3,0
$НСР_{05}$	0,5	0,2	0,2	0,2	0,4	0,2

Полученные результаты по невысокой эффективности систем удобрения на ячмене связаны с размещением культуры по хорошему предшественнику (Борисоник, 1974). Клевер оставляет в почве большое количество органических остатков, азота, улучшает агрофизические свойства, чем обеспечивает хорошее развитие последующей культуры.

Урожайность сена клевера лугового 1 года пользования зависела от урожайности покровной культуры (в среднем по ротациям r = -0,7). Хорошее развитие покровной культуры приводило к ослаблению и изреживанию всходов клевера лугового. Подобные результаты получены в работе В.В.

Окоркова с соавторами (2011). Только в вариантах с органической системой удобрений, где была получена наименьшая прибавка урожайности яровой пшеницы, наблюдал достоверное увеличение урожайности сена клевера на 0,2-0,4 т/га, в остальных вариантах отмечено снижение урожайности данной культуры. На клевере 2 года пользования наблюдали увеличение урожайности сена на 0,1-0,5 т/га во всех вариантах опыта по сравнению с вариантом без удобрений.

Урожайность сельскохозяйственных культур и эффективность применения удобрений зависела от условий увлажнения вегетационного период. Наиболее высокая урожайность озимой ржи и эффективность применения удобрений на данной культуре получена в более засушливых условиях (ГТК = 0,7-1,0), что объясняется высокой полегаемостью культуры. Яровая пшеница обеспечивала более высокие урожаи без применения удобрений в годы с нормальным увлажнением (ГТК=1,0-1,3), овёс хорошо себя показывал, как в годы с нормальным, так избыточным увлажнением (ГТК >1,3). Максимальная эффективность удобрений на обеих яровых зерновых культурах получена при умеренном (нормальном) увлажнении вегетационного периода. Эффективность применения удобрений на яровом ячмене не зависела от условия увлажнения вегетационного периода. Картофель и клевер без применения удобрений обеспечивали более высокую урожайность в годы с избыточным увлажнением. Максимальные прибавки от удобрений на картофеле получены в годы с нормальным и избыточном увлажнением, на клевере – с избыточным увлажнением (Васбиева, Ямалтдинова, 2023).

В *опыте 2* внесение азотных удобрений (N_{90}), сочетание $(NP)_{90}$, $(NK)_{90}$, $(PK)_{90}$ и $(NPK)_{90}$ обеспечило достоверное увеличение продуктивности севооборота в среднем за пять ротаций на 12-25 % (табл. 80). Применение суперфосфата и калия хлористого в чистом виде не оказало заметного влияния на продуктивность севооборота, отмечено увеличение на 5-6 %, в пределах случайной ошибки опыта.

Таблица 80 - Влияние длительного применения минеральных удобрений на продуктивность полевого восьмипольного севооборота (среднее по 2 закладкам, 1978-2019 гг.) *(опыт 2)*

Вариант	Ротации					Среднее за 5 ротаций	Прибавка	Окупаемость 1кг д.в. NPK, кг з.ед.
	I	II	III	IV	V			
	т з. ед. в год							
Без удобрений	2,66	2,76	2,38	2,84	2,62	2,65	-	-
N_{90}	3,40	3,55	2,73	3,10	2,97	3,15	0,50	8,9
P_{90}	2,90	3,03	2,35	2,77	2,77	2,76	0,11	2,0
K_{90}	3,08	2,94	2,55	2,70	2,85	2,82	0,17	3,0
$(NP)_{90}$	3,41	3,03	2,67	3,04	2,93	3,02	0,37	3,3
$(NK)_{90}$	3,33	3,33	2,75	3,19	2,98	3,11	0,46	4,1
$(PK)_{90}$	3,39	3,11	2,53	2,88	2,97	2,97	0,32	2,8
$(NPK)_{90}$	3,40	3,43	2,83	3,18	3,31	3,23	0,58	3,4
$(NPK)_{30}$	3,28	3,33	2,71	2,93	2,78	3,01	0,35	6,2
$(NPK)_{60}$	3,33	3,66	3,02	3,28	3,26	3,31	0,66	5,9
$(NPK)_{120}$	3,34	3,22	2,81	3,26	3,28	3,18	0,53	2,4
$(NPK)_{150}$	3,36	3,28	2,83	3,45	3,36	3,26	0,60	2,1
$НСР_{05}$	-	-	-	-	-	-	0,17	-

Рассмотрение возрастающих доз полного минерального удобрения от 30 до 150 кг д.в./га показало, что максимальная продуктивность полевого восьмипольного севооборота получена в варианте $(NPK)_{60}$ – 3,31 т з. ед.

Наибольшая окупаемость в среднем за 5 ротаций получена при внесении азотных удобрений в чистом виде N_{90}, оплата 1 кг д.в. составила 8,9 кг з.ед.

Анализ изменения урожайности сельскохозяйственных культур в зависимости от применяемых удобрений показал, что в среднем за 5 ротаций на озимой ржи наиболее эффективным было применение азотных удобрений N_{90}: получена прибавка зерна 0,5 т/га, что выше контрольного варианта на 16 %, окупаемость 1 кг NPK зерном составила 5,6 кг (табл. 81). Также достоверные прибавки (0,3-0,5 т/га) были получены при одностороннем внесении калия хлористого, двойном и тройном сочетании элементов питания, при этом окупаемость была ниже – 1,1-4,4 кг. Применение суперфосфата не оказало существенного влияния на урожайность озимой ржи.

Таблица 81 - Влияние длительного применения минеральных удобрений на урожайность сельскохозяйственных культур (среднее по 2 закладкам), т/га *(опыт 2)*

Вариант	Ротации					Среднее за 5 ротаций	Отклонение, +/-	Окупаемость 1кг д.в. NPK основной продукцией, кг
	I	II	III	IV	V			
Озимая рожь (зерно)								
Без удобрений	3,1	3,4	2,5	3,4	3,5	3,2	-	-
N_{90}	3,3	4,3	3,4	3,2	4,3	3,7	0,5	5,6
P_{90}	3,0	3,9	2,8	3,1	3,7	3,3	0,1	1,1
K_{90}	3,0	4,0	3,7	3,3	4,0	3,6	0,4	4,4
$(NP)_{90}$	3,3	3,7	3,5	3,0	4,1	3,5	0,3	1,7
$(NK)_{90}$	3,2	4,1	3,7	3,3	3,9	3,7	0,5	2,8
$(PK)_{90}$	3,5	3,6	3,5	3,2	4,2	3,6	0,4	2,2
$(NPK)_{90}$	3,4	3,8	3,5	3,0	4,2	3,6	0,4	1,5
$(NPK)_{30}$	3,1	4,1	3,5	3,3	3,8	3,6	0,4	4,4
$(NPK)_{60}$	3,3	3,7	3,5	3,5	4,4	3,7	0,5	2,8
$(NPK)_{120}$	3,6	3,9	3,5	3,0	4,2	3,7	0,5	1,4
$(NPK)_{150}$	3,9	3,7	3,5	3,1	4,0	3,7	0,5	1,1
$НСР_{05}$	-	-	-	-	-	-	0,3	-
Картофель (клубни)								
Без удобрений	12,3	24,8	15,5	16,9	12,5	16,4	-	-
N_{90}	15,3	30,7	16,2	20,9	16,9	20,0	3,6	40,0
P_{90}	18,7	28,1	15,3	14,7	15,6	18,5	2,1	23,3
K_{90}	16,4	25,4	14,8	15,9	17,6	18,0	1,6	17,8
$(NP)_{90}$	23,5	31,5	15,7	22,0	16,1	21,7	5,4	30,0
$(NK)_{90}$	18,4	34,4	18,7	21,2	19,2	22,4	6,0	33,3
$(PK)_{90}$	20,0	28,1	13,9	16,0	17,2	19,0	2,6	14,4
$(NPK)_{90}$	25,1	35,4	15,5	17,9	20,3	22,8	6,4	23,7
$(NPK)_{30}$	24,6	29,1	16,0	19,3	14,4	20,7	4,3	47,8
$(NPK)_{60}$	20,9	38,0	19,3	19,9	18,7	23,4	7,0	38,9
$(NPK)_{120}$	22,7	33,8	17,2	24,7	20,1	23,7	7,3	20,3
$(NPK)_{150}$	25,2	35,8	17,1	26,3	22,6	25,4	9,0	20,0
$НСР_{05}$	-	-	-	-	-	-	2,7	-
Яровая пшеница (зерно)								
Без удобрений	2,0	0,6	1,9	1,8	1,8	1,6	-	-
N_{90}	2,6	0,7	2,6	2,5	2,3	2,1	0,5	5,6
P_{90}	2,4	0,9	1,4	1,9	2,1	1,7	0,1	1,1
K_{90}	2,5	0,6	1,9	1,9	2,1	1,8	0,2	2,2
$(NP)_{90}$	2,8	0,6	2,3	2,4	2,4	2,1	0,5	2,8
$(NK)_{90}$	2,8	0,7	2,1	2,7	2,3	2,1	0,5	2,8
$(PK)_{90}$	2,5	0,7	1,7	2,3	1,9	1,8	0,2	1,1
$(NPK)_{90}$	3,0	0,7	3,0	2,9	3,1	2,5	0,9	3,3
$(NPK)_{30}$	2,8	0,9	2,1	2,4	2,1	2,1	0,4	4,4
$(NPK)_{60}$	3,0	0,9	2,9	2,8	3,2	2,6	0,9	5,0
$(NPK)_{120}$	2,9	0,8	2,6	2,7	3,1	2,4	0,8	2,2
$(NPK)_{150}$	2,7	0,8	2,9	2,9	3,2	2,5	0,9	2,0
$НСР_{05}$	-	-	-	-	-	-	0,3	-

Продолжение таблицы 81

Вариант	Ротации					Среднее за 5 ротаций	Отклонение, +/-	Окупаемость 1кг д.в. NPK основной продукцией, кг
	I	II	III	IV	V			
Клевер 1 г.п. (сено 16 %)								
Без удобрений	7,3	4,7	1,7	4,4	3,4	4,3	-	-
N_{90}	8,3	5,1	1,6	2,8	2,7	4,1	-0,2	-2,2
P_{90}	6,4	3,8	1,8	3,9	2,5	3,7	-0,6	-6,7
K_{90}	9,0	5,7	1,7	2,5	3,1	4,4	0,1	1,1
$(NP)_{90}$	5,6	4,1	1,8	2,3	2,5	3,3	-1,0	-5,6
$(NK)_{90}$	6,8	5,3	1,8	3,9	3,0	4,2	-0,1	-0,6
$(PK)_{90}$	9,3	6,2	2,1	3,5	3,7	5,0	0,7	3,9
$(NPK)_{90}$	4,5	5,2	2,1	5,0	3,4	4,0	-0,3	-1,1
$(NPK)_{30}$	4,9	5,3	1,8	2,2	3,0	3,4	-0,9	-10,0
$(NPK)_{60}$	5,6	4,7	1,9	4,2	3,7	4,0	-0,3	-1,7
$(NPK)_{120}$	4,3	4,9	1,6	3,0	2,8	3,3	-1,0	-2,8
$(NPK)_{150}$	2,5	3,9	2,3	4,5	2,6	3,2	-1,2	-2,7
$НСР_{05}$	-	-	-	-	-	-	Fф<Fт	-
Клевер 2 г.п. (сено 16 %)								
Без удобрений	3,4	5,3	2,5	4,3	2,3	3,8	-	-
N_{90}	4,0	6,2	1,4	4,0	3,2	4,2	0,4	4,4
P_{90}	4,2	5,1	1,0	4,4	2,8	4,0	0,2	2,2
K_{90}	3,9	5,5	1,2	3,7	3,3	3,9	0,2	2,2
$(NP)_{90}$	2,9	4,6	2,0	4,5	3,2	3,7	-0,1	-0,6
$(NK)_{90}$	4,0	5,0	1,7	3,9	2,6	3,8	0,0	0,0
$(PK)_{90}$	3,5	5,5	1,8	4,7	2,5	3,9	0,1	0,6
$(NPK)_{90}$	3,4	4,3	1,1	3,9	2,3	3,3	-0,4	-1,5
$(NPK)_{30}$	3,3	5,1	2,2	4,0	2,6	3,7	-0,1	-1,1
$(NPK)_{60}$	4,5	5,8	1,5	4,3	3,3	4,3	0,5	2,8
$(NPK)_{120}$	3,3	4,5	1,4	4,2	3,4	3,7	-0,1	-0,3
$(NPK)_{150}$	3,3	4,9	0,8	4,4	3,1	3,7	0,0	0,0
$НСР_{05}$	-	-	-	-	-	-	Fф<Fт	-
Ячмень (зерно)								
Без удобрений	3,0	2,4	3,3	2,5	2,1	2,7	-	-
N_{90}	3,6	2,2	3,9	3,1	2,7	3,1	0,4	4,4
P_{90}	3,0	2,7	4,1	3,0	2,5	3,1	0,4	4,4
K_{90}	3,6	2,6	2,9	3,4	2,2	2,9	0,3	3,3
$(NP)_{90}$	3,4	1,7	3,3	2,9	2,9	2,8	0,2	1,1
$(NK)_{90}$	3,8	1,7	3,7	2,9	2,9	3,0	0,3	1,7
$(PK)_{90}$	4,1	2,4	3,4	3,7	2,6	3,2	0,6	3,3
$(NPK)_{90}$	3,9	2,4	3,5	3,3	2,9	3,2	0,5	1,9
$(NPK)_{30}$	3,6	2,6	3,8	3,4	2,7	3,2	0,6	6,7
$(NPK)_{60}$	3,9	2,9	4,0	3,2	2,7	3,3	0,7	3,9
$(NPK)_{120}$	3,6	2,4	4,0	3,3	3,0	3,3	0,6	1,7
$(NPK)_{150}$	4,1	2,2	3,9	3,2	3,2	3,3	0,7	1,6
$НСР_{05}$	-	-	-	-	-	-	0,4	-

Продолжение таблицы 81

Вариант	Ротации					Среднее за 5 ротаций	Отклонение, +/-	Окупаемость 1кг д.в. NPK основной продукцией, кг
	I	II	III	IV	V			
Овёс (зерно)								
Без удобрений	2,7	2,2	2,2	3,9	4,2	3,1	-	-
N_{90}	4,1	3,8	2,1	4,8	3,8	3,7	0,6	6,7
P_{90}	2,6	2,2	1,6	3,8	4,0	2,9	-0,2	-2,2
K_{90}	2,4	2,4	2,3	3,5	3,7	2,9	-0,2	-2,2
$(NP)_{90}$	3,4	3,7	2,5	4,4	3,6	3,5	0,4	2,2
$(NK)_{90}$	3,3	3,7	2,3	4,4	3,2	3,4	0,2	1,1
$(PK)_{90}$	2,7	2,6	2,3	3,2	4,3	3,0	-0,1	-0,6
$(NPK)_{90}$	3,3	4,3	2,7	4,3	4,0	3,6	0,5	1,9
$(NPK)_{30}$	3,1	3,2	2,8	3,6	3,8	3,3	0,2	2,2
$(NPK)_{60}$	3,5	3,8	2,3	4,7	3,9	3,6	0,5	2,8
$(NPK)_{120}$	3,8	3,3	2,4	4,4	3,1	3,4	0,3	0,8
$(NPK)_{150}$	3,4	3,5	2,2	4,0	3,8	3,4	0,3	0,4
$НСР_{05}$	-	-	-	-	-	-	0,5	-

На картофеле наиболее эффективным было применение полного минерального удобрения. Наибольшая урожайность клубней получена при внесении максимальной дозы $(NPK)_{150}$ – 25,4 т/га, прибавка составила 9,0 т/га (55 %). Однако с учётом окупаемости 1 кг NPK основной продукцией выделяется вариант $(NPK)_{60}$, где прибавка составила 7,0 т/га (43%), окупаемость - 38,9 кг клубней картофеля и вариант $(NPK)_{30}$, где прибавка составила 4,3 т/га (26%), окупаемость – 47,8 кг клубней картофеля. Результаты исследований показали, что в среднем за пять ротаций на картофеле было не эффективно применение калия хлористого, суперфосфата и их сочетание, хотя в отдельные ротации наблюдали увеличение урожайности культуры в данных вариантах на 25-63%.

Наиболее эффективным применение полного минерального удобрения было и на яровой пшенице. Выделился вариант $(NPK)_{60}$. Здесь получена прибавка 0,9 т/га (56 %), окупаемость составила 5,0 кг. Наибольшая окупаемость получена при внесении азотных удобрений N_{90} -5,6 кг, однако прибавка зерна составила 0,5 т/га. Также как и на картофеле, на пшенице

было не эффективно применение суперфосфата и калия хлористого или их сочетания.

Достоверного влияния минеральных удобрений на урожайность сена клевера лугового 1 и 2 года пользования не выявлено. По влиянию на урожайность ярового ячменя выделился вариант $(NPK)_{30}$. Прибавка составила 0,6 т/га (21 %), окупаемость 1 кг NPK зерном – 6,7 кг. На данной культуре было не эффективно применения калия хлористого, азотно-калийных и азотно-фосфорных удобрений. Внесение суперфосфата P_{90} по влиянию на урожайность ячменя не уступало азотному удобрению N_{90} – в обоих вариантах получена прибавка 0,4 т/га, окупаемость – 4,4 кг.

Установлено, что на овсе эффективно одностороннее применение азотного удобрения N_{90}. В среднем за пять ротаций в данном варианте получена максимальная прибавка в опыте 0,6 т/га (34%) и окупаемость – 6,7 кг. Достоверное увеличение урожайности отмечено также при внесении $(NPK)_{60\text{-}90}$, прибавка составила 0,5 т/га. В остальных вариантах изменения урожайности культуры находились в пределах ошибки опыта.

В *опыте 3* продуктивность полевого семипольного севооборота (в среднем на 1 га пашни) при внесении ОСВ возросла на 0,57 т з. ед. (27 %), при использовании навоза на 0,51 т з. ед. (25 %) (табл. 82). Применение ОСВ и навоза по фону минеральных удобрений увеличило продуктивность пашни на 0,19-0,24 т з. ед. (7-9%) (к фону). Внесение ОСВ в дозе 40 т/га 1 раз в ротацию севооборота достоверно повысило урожайность 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 в эквивалентной дозе. Применение навоза 40 т/га (насыщенность 5,7 т/га в год) увеличило урожайность зерновых культур на 0,4-0,6 и сена клевера на 0,8-1,1 т/га.

Таблица 82 - Влияние ОСВ на урожайность сельскохозяйственных культур и продуктивность полевого севооборота *(опыт 3)*

Вариант	Урожайность, т/га (среднее за III -VI ротации, 1993-2020 гг.)						Продуктивность, т з. ед./га пашни						
	озимая рожь (зерно)	яровая пшеница (зерно)	клевер 1 г.п. (сено 16 %)	клевер 2 г.п. (сено 16 %)	ячмень (зерно)	овёс (зерно)	III	IV	V	VI	в среднем	отклонение от	
												контроля	фона
Без удобрений	2,1	1,6	5,1	3,6	2,6	1,7	2,14	1,58	2,45	2,17	2,08	-	-
Навоз	2,7	2,0	6,2	4,4	3,2	2,1	2,35	2,13	3,18	2,71	2,59	0,51	-
ОСВ	2,8	2,1	6,2	4,4	3,2	2,3	2,61	2,23	2,94	2,81	2,65	0,57	-
NPK – фон	2,8	2,2	5,3	3,8	3,8	2,9	2,39	2,19	3,39	2,96	2,73	0,65	-
Фон + навоз	3,1	2,6	5,8	4,0	3,9	3,0	2,58	2,32	3,60	3,18	2,92	0,84	0,19
Фон + ОСВ	2,9	2,7	5,6	4,3	3,6	3,3	2,62	2,58	3,51	3,19	2,97	0,89	0,24
$НСР_{05}$	0,2	0,3	0,5	0,4	0,4	0,2	0,18	0,47	0,13	0,31	-	0,17	

9.2 Балансы органического углерода и NPK

Существенное значение для обоснования наиболее эффективных уровней применения удобрений и направленного регулирования почвенного плодородия имеют расчёты баланса органического вещества и элементов минерального питания. Анализ использования удобрений и средств химической мелиорации почв в период интенсивной химизации (1971–1995 гг.) показывает, что благодаря их внесению в дозах, превышающих вынос питательных веществ урожаями сельскохозяйственных культур, баланс питательных веществ в земледелии страны был положительным, что способствовало резкому повышению плодородия почв в России, особенно в Нечерноземной зоне (Кудеяров, 2018; Сычёв и др., 2020). Начиная с 90-х годов прошлого столетия, применение удобрений сократилось. Баланс питательных веществ в земледелии стал складываться со значительным превышением выноса над их поступлением в почву. Нарушение баланса питательных веществ в земледелии приводит к снижению плодородия почвы и урожайности сельскохозяйственных культур.

По данным наших исследований в *опыте 1* в варианте без применения удобрения минерализация органического вещества в почве превысила процессы гумификации в 1,6 раза, получен отрицательный баланс углерода в почве (-130 кг/га в год) (табл. 83).

Таблица 83 - Баланс органического углерода в полевом восьмипольном севообороте, т/га (среднее по 2 закладкам, 1977-2017 гг.) *(опыт 1)*

Вариант	Приход	Расход	Баланс	
			за ротацию	в год
Без удобрений	1,9	2,9	-1,0	-0,13
Навоз 10 т/га	4,2	3,0	1,2	0,15
Навоз 20 т/га	6,6	2,7	3,9	0,48
NPK экв. 10 т навоза	2,0	3,4	-1,4	-0,17
NPK экв. 20 т навоза	2,0	2,8	-0,8	-0,10
Навоз 5 т+NPK экв.	3,1	3,3	-0,2	-0,02
Навоз 10 т + NPK экв.	4,3	3,2	1,1	0,14
Навоз 20 т + NPK экв.	6,6	2,2	4,4	0,55

За 5 ротаций севооборота было потеряно около 5 т/га органического углерода. Отрицательный баланс ОВ получен при минеральной системе удобрений (NPK эквивалентно 10 и 20 т/га навоза), близкий к нулевому при органоминеральной системе с невысоким насыщением пашни навозом (навоз 5 т/га +NPK экв. навозу). Положительный баланс сформировался в вариантах с органической и органоминеральной системой удобрений при насыщении пашни навозом 10 и 20 т/га в год (140-150 и 480-550 кг/га в год, соответственно).

Среднегодовой вынос азота урожаем сельскохозяйственных культур в контрольном варианте составил около 60, фосфора 20 и калия 65 кг/га (табл.84-86). При внесении навоза среднегодовой вынос N, P_2O_5 и K_2O увеличился на 15-35 %, использовании минеральных удобрений – на 15-40%, при органоминеральной системе удобрений – на 20-50 %. В большей степени наблюдали увеличение потребления азота и калия. Это подтверждает и расчёт хозяйственного выноса на 1 тонну основной продукции (прил. 16).

Таблица 84 - Баланс азота в полевом восьмипольном севообороте, кг/га (среднее по 2 закладкам, 1977-2017 гг.) *(опыт 1)*

Вариант	Поступление азота* в сумме за 5 ротаций, кг/га	Хозяйственный вынос азота в сумме за 5 ротаций, кг/га	Баланс +/–, кг/га		Интенсивность баланса	Коэффициент использования азота из удобрений
			всего	в среднем в год		
	кг/га				%	
Без удобрений	685	2332	-1647	-41	29	-
Навоз 10 т/га	2136	2763	-627	-16	77	30
Навоз 20 т/га	3544	2903	641	16	122	20
NPK экв. 10 т навоза	2121	2949	-828	-21	72	43
NPK экв. 20 т навоза	3541	3124	418	10	113	28
Навоз 5 т+NPK экв.	2238	2942	-705	-18	76	39
Навоз 10 т + NPK экв.	3654	3188	467	12	115	29
Навоз 20 т + NPK экв.	6440	3329	3111	78	193	17

***** - с удобрениями, семенами и клевером.

Таблица 85 - Баланс фосфора в полевом восьмипольном севообороте, кг/га (среднее по 2 закладкам, 1977-2017 гг.) *(опыт 1)*

Вариант	Поступление фосфора* в сумме за 5 ротаций, кг/га	Хозяйственный вынос фосфора в сумме за 5 ротаций, кг/га	Баланс +/–, кг/га		Интенсивность баланса	Коэффициент использования фосфора из удобрений
			всего	в среднем в год		
	кг/га				%	
Без удобрений	60	778	-718	-18	8	-
Навоз 10 т/га	1010	891	119	3	113	12
Навоз 20 т/га	1955	960	996	25	204	10
NPK экв. 10 т навоза	1010	905	105	3	112	13
NPK экв. 20 т навоза	1950	938	1012	25	208	8
Навоз 5 т+NPK экв.	1038	922	116	3	113	15
Навоз 10 т + NPK экв.	2022	986	1036	26	205	11
Навоз 20 т + NPK экв.	3918	1038	2880	72	378	7

***** - с удобрениями и семенами.

Таблица 86 - Баланс калия в полевом восьмипольном севообороте, кг/га (среднее по 2 закладкам, 1977-2017 гг.) *(опыт 1)*

Вариант	Поступление калия* в сумме за 5 ротаций, кг/га	Хозяйственный вынос калия в сумме за 5 ротаций, кг/га	Баланс +/–, кг/га		Интенсивность баланса	Коэффициент использования калия из удобрений
			всего	в среднем в год		
	кг/га				%	
Без удобрений	130	2659	-2529	-63	5	-
Навоз 10 т/га	2199	3298	-1099	-27	67	31
Навоз 20 т/га	4268	3574	694	17	119	22
NPK экв. 10 т навоза	2202	3584	-1382	-35	61	45
NPK экв. 20 т навоза	4226	3729	496	12	113	26
Навоз 5 т+NPK экв.	2288	3638	-1350	-34	63	45
Навоз 10 т + NPK экв.	4407	3913	494	12	113	29
Навоз 20 т + NPK экв.	8549	4064	4485	112	210	17

***** - с удобрениями и семенами.

Существенно возрастал при использовании удобрений хозяйственный вынос N и K_2O 1 тонной зерна озимой ржи, яровой пшеницей и овса, в меньшей степени увеличивался вынос 1 т зерна ячменя и 1 т сена клевера. На картофеле вынос основных элементов питания по вариантам опыта варьировал незначительно.

Положительный баланс по азоту и калию сложился в вариантах – «навоз 20 т/га», «NPK экв. 20 т навоза», «навоз 10 т/га в год + NPK экв. навозу», «навоз 20 т/га в год + NPK экв. навозу». Отрицательный баланс по азоту и калию в остальных вариантах был около 20-35 кг/га в год, компенсация выноса составила 60-80%. По фосфору во всех вариантах складывался нулевой или положительный баланс.

Наиболее высокая интенсивность баланса азота, фосфора и калия (193, 378 и 210 % соответственно) отмечена в варианте «навоз 20 т/га в год + NPK экв. навозу». Однако здесь получены самые низкие коэффициенты использования NPK из удобрений. В отдельные ротации севооборотов КИУ N варьировал от 7 до 27, P_2O_5 – от 4 до 12 и K_2O – от 16 до 18 % (в среднем за 5 ротаций КИУ составили 17, 7 и 17 % соответственно).

Наиболее высокий КИУ азота, фосфора и калия получен при внесении NPK эквивалентно 10 т навоза и внесении навоза 5 т/га + NPK эквивалентно навозу, полученные коэффициенты в среднем за 5 ротаций были близки к нормативным литературными данными (Анспок и др., 1981). В отдельные ротации севооборотов в этих вариантах коэффициент использования азота из удобрений варьировал от 25 до 60, P_2O_5 – от 5 до 20 и K_2O – от 30 до 70 %. Снижение коэффициентов использования элементов питания из удобрений при увеличении их доз отмечено в работах Г.П. Дзюина (2016), А.М. Плотникова (2018). Коэффициенты использования растениями азота и калия из удобрений были в 2-10 раз выше, чем фосфора, что объясняется хорошей растворимостью азотных и калийных удобрений в воде. Наиболее полное использование растениями из удобрений азота и калия подтверждается результатами исследований других авторов (Дуйшембиев и др., 2018).

В *опыте 2* минерализация органического вещества в почве контрольного варианта превысила процессы гумификации в 1,6 раза, баланс углерода составил минус 140 кг/га в год (табл. 87). За 5 ротаций севооборота было потеряно около 5,5 т/га органического углерода. 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.

Таблица 87 - Баланс органического углерода в полевом восьмипольном севообороте, т/га (среднее по 2 закладкам, 1978-2019 гг.) *(опыт 2)*

Вариант	Приход	Расход	Баланс	
			за ротацию	в год
Без удобрений	1,9	3,0	-1,1	-0,14
N_{90}	1,9	2,1	-0,2	-0,03
P_{90}	1,9	3,1	-1,2	-0,15
K_{90}	1,9	3,4	-1,5	-0,19
$(NP)_{90}$	1,9	2,0	-0,1	-0,01
$(NK)_{90}$	1,9	2,0	-0,1	-0,01
$(PK)_{90}$	1,9	3,5	-1,6	-0,20
$(NPK)_{90}$	2,0	2,2	-0,2	-0,02
$(NPK)_{30}$	1,9	3,2	-1,3	-0,16
$(NPK)_{60}$	2,0	2,7	-0,7	-0,09
$(NPK)_{120}$	2,0	1,5	0,5	0,06
$(NPK)_{150}$	2,0	1,0	1,0	0,13

Среднегодовой вынос азота урожаем сельскохозяйственных культур в контрольном варианте составил около 65 кг/га азота и калия, 25 кг/га фосфора (табл.88-90).

Таблица 88 - Баланс азота в полевом восьмипольном севообороте, кг/га (за 5 ротаций, 1978-2019 гг., среднее по 2 закладкам) (*опыт 2*)

Вариант	Поступление азота* в сумме за 5 ротаций, кг/га	Хозяйственный вынос азота в сумме за 5 ротаций, кг/га	Баланс +/–, кг/га		Интенсивность баланса	Коэффициент использования азота из удобрений
			всего	в среднем в год		
	кг/га				%	
Без удобрений	840	2552	-1712	-43	33	-
N_{90}	3140	3312	-172	-4	95	33
P_{90}	760	2508	-1748	-44	30	-
K_{90}	920	2848	-1928	-48	32	-
$(NP)_{90}$	3025	3118	-93	-2	97	26
$(NK)_{90}$	3090	3173	-83	-2	97	28
$(PK)_{90}$	915	2898	-1983	-50	32	-
$(NPK)_{90}$	3045	3219	-174	-4	95	30
$(NPK)_{30}$	1505	2940	-1435	-36	51	58
$(NPK)_{60}$	2345	3194	-849	-21	73	43
$(NPK)_{120}$	3730	3186	544	14	117	22
$(NPK)_{150}$	4480	3310	1170	29	135	21

***** - с удобрениями, семенами и клевером.

Таблица 89 - Баланс фосфора в полевом восьмипольном севообороте, кг/га (за 5 ротаций, 1978-2019 гг., среднее по 2 закладкам) (*опыт 2*)

Вариант	Поступление фосфора* в сумме за 5 ротаций, кг/га	Хозяйственный вынос фосфора в сумме за 5 ротаций, кг/га	Баланс +/–, кг/га		Интенсивность баланса	Коэффициент использования фосфора из удобрений
			всего	в среднем в год		
	кг/га				%	
Без удобрений	60	970	-910	-23	6	-
N_{90}	60	1050	-990	-25	6	-
P_{90}	2310	945	1365	34	244	0
K_{90}	60	978	-918	-23	6	
$(NP)_{90}$	2310	1030	1280	32	224	3
$(NK)_{90}$	60	1015	-955	-24	6	
$(PK)_{90}$	2310	1040	1270	32	222	3
$(NPK)_{90}$	2310	1140	1170	29	203	8
$(NPK)_{30}$	810	1025	-215	-5	79	7
$(NPK)_{60}$	1560	1140	420	11	137	11
$(NPK)_{120}$	3060	1070	1990	50	286	3
$(NPK)_{150}$	3810	1150	2660	67	331	5

***** - с удобрениями и семенами.

Таблица 90 - Баланс калия в полевом восьмипольном севообороте, кг/га (за 5 ротаций, 1978-2019 гг., среднее по 2 закладкам) (*опыт 2*)

Вариант	Поступление калия* в сумме за 5 ротаций, кг/га	Хозяйственный вынос калия в сумме за 5 ротаций, кг/га	Баланс +/–, кг/га		Интенсивность баланса	Коэффициент использования калия из удобрений
			всего	в среднем в год		
	кг/га				%	
Без удобрений	130	2570	-2440	-61	5	-
N_{90}	130	2897	-2767	-69	4	-
P_{90}	130	2587	-2457	-61	5	-
K_{90}	2380	2853	-473	-12	83	13
$(NP)_{90}$	130	2857	-2727	-68	5	-
$(NK)_{90}$	2380	3290	-910	-23	72	32
$(PK)_{90}$	2380	2976	-596	-15	80	18
$(NPK)_{90}$	2380	3327	-947	-24	72	34
$(NPK)_{30}$	880	3203	-2323	-58	27	84
$(NPK)_{60}$	1630	3479	-1849	-46	47	61
$(NPK)_{120}$	3130	3072	58	1	102	17
$(NPK)_{150}$	3880	3207	673	17	121	17

***** - с удобрениями и семенами.

Внесение N_{90} увеличило среднегодовой вынос N, P_2O_5 и K_2O на 30, 8 и 14 %, соответственно. Применение суперфосфата P_{90} не оказало существенного влияния на вынос элементов питания, а внесение калия хлористого K_{90} увеличило вынос азота и калия на 11-12 %. Сочетание азотно-фосфорных удобрений, азотно-калийных и фосфорно-калийных удобрений увеличило среднегодовой вынос N и K_2O на 11-28 %, P_2O_5– на 5-7%. Среднегодовой вынос азота был выше в вариантах с азотными удобрениями $(NP)_{90}$ и $(NK)_{90}$, а калия – в вариантах с калийными удобрениями $(NK)_{90}$ и $(PK)_{90}$. Применение полного минерального удобрения $(NPK)_{90}$ увеличило среднегодовой вынос азота и калия на 25-30 %, фосфора на 20%. Во всех вариантах в большей степени наблюдали увеличение потребления азота и калия, в меньшей фосфора.

Расчёт хозяйственного выноса на 1 тонну основной продукции показал, что вынос элементов питания зависел от сельскохозяйственной культуры, вида удобрений, их сочетания и дозы (прил. 17). Внесение азотных удобрений в чистом виде (N_{90}) способствовало увеличению хозяйственного выноса N и K_2O 1 тонной зерна озимой ржи и ячменя, только N - 1 тонной зерна яровой пшеницы, овса и клубней картофеля. На картофеле и пшенице прослеживаются тенденции уменьшения хозяйственного выноса K_2O. Применение фосфорных удобрений в чистом виде (P_{90}) привело к увеличению хозяйственного выноса N и K_2O 1 тонной зерна озимой ржи, уменьшению выноса N и/или K_2O другими культурами севооборота, за исключением картофеля. Внесение суперфосфата не привело к росту хозяйственного выноса P_2O_5, на некоторых культурах наблюдали тенденции к уменьшению потребления фосфора растениями. Внесение калия хлористого в чистом виде (K_{90}) способствовало увеличению хозяйственного выноса K_2O 1 тонной основной продукцией картофеля и клевера лугового, уменьшению – яровой пшеницы и овса. Использование азотно-фосфорных удобрений $(NP)_{90}$ привело к увеличению хозяйственного выноса N и K_2O 1 тонной зерна озимой ржи, ячменя и овса, хозяйственного выноса N – 1

тонной основной продукцией картофеля и пшеницы. Отмечено уменьшение хозяйственного выноса K_2O – на картофеле и клевере луговом. Внесение азотно-калийных удобрений $(NK)_{90}$ способствовало увеличению хозяйственного выноса N и K_2O 1 тонной зерна озимой ржи, ячменя и овса, хозяйственного выноса K_2O – 1 тонной сена клевера лугового. Применение фосфорно-калийных удобрений привело к увеличению хозяйственного выноса N и K_2O 1 тонной зерна озимой ржи и яровой пшеницы, хозяйственного выноса K_2O клевером луговым. На картофеле отмечены тенденции уменьшению хозяйственного выноса N. Внесение полного минерального удобрения $(NPK)_{90}$ способствовало увеличению хозяйственного выноса N и K_2O 1 тонной зерна озимой ржи, ячменя и овса, хозяйственного выноса N – 1 тонной клубней картофеля и 1 тонной зерна пшеницы, хозяйственного выноса K_2O – 1 тонной сена клевера лугового.

Близкий к нулевому и положительный баланс по азоту с учётом в севообороте двух полей клевера сложился при внесении азотных удобрений в дозе 90 кг д.в./га и выше – N_{90}, $(NP)_{90}$, $(NK)_{90}$, $(NPK)_{90\text{-}150}$. Интенсивность баланса составила 95-135 %. В вариантах, где азотные удобрения не вносили, получен баланс по азоту минус 45-50 кг в год, компенсация выноса за счёт клевера составила около 30 %. Положительный баланс по фосфору в почве получен при внесении суперфосфата в дозе 60 кг д.в. /га и выше. Близкий к нулевому и положительный баланс по калию сложился при применении калия хлористого в дозе 120-150 кг д.в./га, интенсивность баланса составила 102-121 %. При внесении более низких доз калийного удобрения (K_{90}, $(PK)_{90}$, $(NK)_{90}$, $(NPK)_{30\text{-}90}$) компенсация выноса составила 27-83%.

Наиболее высокий КИУ азота и калия получен при внесении $(NPK)_{30}$. В среднем за пять ротаций он составил 58 и 84 %, соответственно. Так же, как и в опыте 1, наблюдали снижение коэффициентов использования элементов питания из удобрений при увеличении их доз. Коэффициент использования фосфора из удобрений во всех вариантах с суперфосфатом был низким и варьировал от 3 до 11%.

В *опыте 3* минерализация органического вещества в почве контрольного варианта шла более низкими темпами, в сравнении с другими опытами, что связано с отсутствием в севообороте пропашной культуры - картофеля. Баланс органического углерода составил минус 90 кг/га в год (табл. 91). За 5 ротаций севооборота было потеряно около 3,5 т/га органического углерода. Баланс по органическому углероду при внесении ОСВ (насыщенность 5,7 т/га в год) составил 0,06 т/га в год, по фону - 0,10 т/га в год, применении навоза (насыщенность 5,7 т/га в год) – 0,03 и 0,09 т/га в год соответственно.

Таблица 91 - Баланс органического углерода в полевом семипольном севообороте, т/га (среднее за III -V ротации, 1993-2013 гг.) *(опыт 3)*

Вариант	Приход	Расход	Баланс	
			за ротацию	в год
Без удобрений	1,7	2,4	-0,7	-0,09
Навоз	3,1	2,9	0,2	0,03
ОСВ	3,3	2,9	0,4	0,06
NPK – фон	1,9	2,5	-0,6	-0,09
Фон + навоз	3,2	2,6	0,6	0,09
Фон + ОСВ	3,4	2,7	0,7	0,10

Среднегодовой вынос азота урожаем сельскохозяйственных культур в контрольном варианте составил около 40, фосфора 18 и калия 57 кг/га (табл. 92). Применение ОСВ и навоза КРС обеспечило положительный баланс по фосфору (интенсивность баланса 170-247 %). Баланс по азоту в данных вариантах составил минус 24-27 кг/га в год (интенсивность 68-71 %). Баланс по азоту близкий к нулевому сформировался при применении ОСВ и навоза по фону NPK. Внесение ОСВ и навоза компенсировало вынос калия только на 13-22 %, по фону минеральных удобрений $(NPK)_{60}$ – на 48-60 %.

Сложившиеся балансы органического углерода и элементов питания в опытах 1-3 в большей степени согласуются с агрохимическими показателями почвы.

Таблица 92 - Баланс элементов питания в полевом семипольного севообороте (среднее за III -V ротации, 1993-2013 гг.) (*опыт 3*)

Вариант	Поступление*			Хозяйственный вынос			Баланс, +/–						Интенсивность баланса, %		
							за ротацию			в год					
	кг/га														
	N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O
Без удобрений	163	8	10	447	113	388	-284	-105	-378	-41	-15	-54	37	7	3
Навоз	408	246	113	597	145	505	-189	101	-392	-27	14	-56	68	170	22
ОСВ	420	377	68	590	152	523	-171	225	-455	-24	32	-65	71	247	13
NPK – фон	415	248	250	597	157	523	-182	91	-273	-26	13	-39	69	157	48
Фон + навоз	624	486	353	671	169	586	-46	317	-233	-7	45	-33	93	288	60
Фон + ОСВ	655	617	308	687	177	639	-32	440	-331	-5	63	-47	95	349	48

***** - с удобрениями, семенами и клевером.

9.3 Корреляционно-регрессионный анализ между урожайностью культур и показателями плодородия почвы

Корреляционный анализ проведен между продуктивностью полевого севооборота (урожайностью культур, после которых отбирали почвенные образцы, чаще это была замыкающая культура севооборота овес) и изученными параметрами плодородия почвы. В *опыте 1 и 3* во все ротации установлены достоверные связи средней и высокой степени силы (r=0,7-0,9) между продуктивностью полевого севооборота (и/или урожайностью овса) и содержанием в почве $C_{орг}$. Исключение составила 2 ротация *опыта 1*, корреляционные связи были слабые, не достоверные. В *опыте 2* достоверных корреляционных взаимосвязей между данными показателями не выявлено (табл. 93-95).

Таблица 93 - Корреляционные зависимости между продуктивностью (урожайностью) сельскохозяйственных культур и содержанием (запасами) в почве $C_{орг}$ *(опыт 1)*

Показатель	Содержание $C_{орг}$, %					Запасы $C_{орг}$, т/га (VI ротация)		
	II	III	IV	V	VI	0-20	0-40	0-100
Продуктивность севооборота, т з.ед.	-0,2	0,7*	0,7*	0,8*	0,7*	0,7*	0,5	0,5
Урожайность овса, т/га	0,3	0,6	0,8*	0,9*	0,6	0,6	0,5	0,8*

* - существенный (p<0,05) .

Таблица 94 - Корреляционные зависимости между продуктивностью (урожайностью) сельскохозяйственных культур и содержанием (запасами) в почве $C_{орг}$ *(опыт 2)*

Показатель	Содержание $C_{орг}$, %				Запасы $C_{орг}$, т/га (V ротация)		
	I	II	IV	V	0-20	0-40	0-100
Продуктивность севооборота, т з.ед.	0,1	-0,2	0,2	0,5	0,6	0,4	0,2
Урожайность овса, т/га	-0,2	0,4	-0,2	-0,6	-0,5	-0,4	-0,2

* - существенный (p<0,05) .

Таблица 95 - Корреляционные зависимости между продуктивностью (урожайностью) сельскохозяйственных культур и содержанием (запасами) в почве $C_{орг}$ *(опыт 3)*

Показатель	Содержание $C_{орг}$, %				Запасы $C_{орг}$, т/га (V ротация)		
	III	IV	V	VI	0-20	0-40	0-100
Продуктивность севооборота, т з.ед.	0,8*	0,9*	0,9*	0,8*	0,7	0,7	0,6
Урожайность овса, т/га	0,7	0,8*	0,9*	0,9*	0,7	0,9*	0,9*

* - существенный (p<0,05).

Достоверные средние и высокие (r=0,6-0,9) корреляционные связи отмечены между продуктивностью севооборота и/или урожайностью сельскохозяйственных культур и содержанием в почве общего азота, его негидролизуемой, легкогидролизуемой и минеральной фракцией. В отдельные годы корреляционные связи между изучаемыми показателями могли отсутствовать или быть не достоверными, что связано с влиянием других факторов, например погодных условий вегетационного периода (табл. 96, 97).

Таблица 96 - Корреляционные зависимости между продуктивностью севооборота (урожайностью сельскохозяйственных культур) и содержанием в почве общего азота, его фракциями (мг/кг) *(опыт 1,2)*

Показатель	Опыт 1					Опыт 2	
	Урожайность, т/га				продуктивность севооборота, т.з.ед.	урожайность ячменя, т/га	продуктивность севооборота, т.з.ед.
	клевер луговой 2 г.п.	ячмень	картофель	овёс			
$N_{общ}$, мг/кг	0,6	0,5	0,7*	0,8*	0,6	0,8*	0,6*
$N_{нг}$, мг/кг	0,5	0,5	0,8*	0,7*	0,6	0,7*	0,6*
$N_{тг}$, мг/кг	0,3	0,3	-0,3	0,7	0,4	0,3	0,1
$N_{лг}$, мг/кг	0,6	0,3	0,7	0,6	0,7*	0,2	0,2
$N_{мин}$, мг/кг	0,6	-0,3	0,6	0,8*	0,7*	0,8*	0,6*

* - существенный ($p<0,05$) .

Таблица 97 - Корреляционные зависимости между продуктивностью севооборота (урожайностью сельскохозяйственных культур) и содержанием (запасами) в почве общего азота, его фракциями (мг/кг) *(опыт 3)*

Показатель	Содержание, мг/кг					Запасы, т/га		
	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100	0-20	0-40	0-100
Продуктивность севооборота, т з.ед.								
$N_{общ}$, мг/кг	0,6	0,7	0,4	0,4	0,5	0,5	0,7	0,6
$N_{нг}$, мг/кг	0,6	0,6	0,4	0,4	-0,1	0,6	0,6	0,5
$N_{тг}$, мг/кг	0,1	0,7	-0,3	-0,4	0,3	-0,1	0,4	0,3
$N_{лг}$, мг/кг	0,7	0,6	0,1	0,2	0,1	0,7	0,7	0,4
$N_{мин}$, мг/кг	0,7	0,7	0,8*	0,9*	0,9*	0,8*	0,7	0,9*
Урожайность овса, т/га								
$N_{общ}$, мг/кг	0,8	0,8*	0,6	0,5	0,6	0,7	0,8*	0,8
$N_{нг}$, мг/кг	0,8	0,8*	0,6	0,4	-0,3	0,8	0,8*	0,7
$N_{тг}$, мг/кг	0,3	0,6	-0,4	-0,4	0,5	0,1	0,5	0,5
$N_{лг}$, мг/кг	0,9*	0,8*	0,4	0,5	0,4	0,9*	0,9*	0,7
$N_{мин}$, мг/кг	0,6	0,5	0,8*	0,8*	0,9*	0,7	0,6	0,9*

* - существенный ($p<0,05$).

В *опыте 1* при изучении органических, минеральных и органоминеральных систем удобрений установлены высокие корреляционные зависимости между урожайностью культур и содержанием минерального азота в слоях 20-40 и 40-60 см, а также его запасами в слое 0-40 см и метровом слое почвы (табл. 98). В пахотном горизонте отмечены средние корреляционные связи, но они не достоверны, что может быть связано с высоким потреблением минерального азота растениями из данного слоя.

Таблица 98 - Корреляционные зависимости между урожайностью сельскохозяйственных культур (т/га) и содержанием (запасами) в почве минерального азота *(опыт 1)*

Содержание, мг/кг					Запасы, т/га		
0-20	20-40	40-60	60-80	80-100	0-20	0-40	0-100
Минеральный азот							
0,5*	0,8*	0,8*	0,5	0,5	0,5	0,8*	0,9*
Нитратный азот							
0,4*	0,6	0,4	0,5	0,8*	0,5	0,6	0,7*
Аммонийный азот							
0,4*	0,6	0,7	0,4	0,2	0,4	0,7	0,9*

* - существенный ($p<0,05$).

В *опыте 2* при изучении доз и соотношений минеральных удобрений выявлены высокие корреляционные зависимости между урожайностью культур и содержанием минерального азота в слоях 0-20 и 40-60 см. Между урожайностью культур и содержанием нитратного азота установлены высокие корреляционные зависимости в слое 0-80 см (табл. 99).

Таблица 99 - Корреляционные зависимости между урожайностью сельскохозяйственных культур (т/га) и содержанием (запасами) в почве минерального азота *(опыт 2)*

Содержание, мг/кг					Запасы, т/га		
0-20	20-40	40-60	60-80	80-100	0-20	0-40	0-100
Минеральный азот							
0,7*	0,6	0,7*	0,5	0,5	0,7*	0,7*	0,7*
Нитратный азот							
0,6*	0,7*	0,8*	0,6*	0,4	0,6*	0,6*	0,7*
Аммонийный азот							
0,6	0,3	0,5	0,3	0,5	0,6*	0,5	0,6*

* - существенный ($p<0,05$).

Выявлены высокие корреляционные связи между урожайностью культур и запасами нитратного и аммонийного азота в метровом слое почвы, между урожайностью и запасами минерального азота в слое 0-40 и 0-100 см.

В *опыте 3* установлено наличие достоверных высоких корреляционных связей между урожайностью сельскохозяйственных культур и запасами общего азота, его негидролизуемых соединений в слое 0-40 см, запасами легкогидролизуемого азота в слоях 0-20 и 0-40 см и запасами минерального азота в метровом слое почвы (табл. 97).

Полученные результаты наиболее высокой корреляционной зависимости между урожайностью сельскохозяйственных культур и запасами минерального азота в метровом слое почвы установлены и другими исследователями (Кидин, 2016).

Корреляционные связи между продуктивностью севооборота (урожайностью культур) и содержанием в почве общего фосфора, его минеральных, органических соединений по опытам сильно варьировали – от очень слабых (недостоверных) до очень высоких (табл. 100-102). Чётких закономерностей выявить не получилось. Можно только отметить, что чаще всего наличие достоверных корреляционных связей (r=0,7-1,0) между урожайностью и содержанием общего фосфора, его минеральными соединениями наблюдали в слое 0-60 см, органическими – в слое 0-20 см.

Таблица 100 - Корреляционные зависимости между продуктивностью севооборота (урожайностью культур) и содержанием (запасами) в почве общего фосфора, его минеральными и органическими соединениями *(опыт1)*

Показатель	Содержание, мг/кг					Запасы, т/га		
	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100	0-20	0-40	0-100
Общий фосфор								
Урожайность овса, т/га	0,7*	0,5	0,6	0,0	0,0	0,8*	0,7*	0,6
Продуктивность севооборота, т з.ед.	0,8*	0,7*	0,9*	0,2	-0,1	0,8*	0,8*	0,8*
Минеральные соединения фосфора								
Урожайность овса, т/га	0,5	0,6	0,5	-0,5	0,0	0,5	0,6	0,4
Продуктивность севооборота, т з.ед.	0,8*	0,8*	0,9*	-0,1	-0,1	0,8*	0,8*	0,7*
Органические соединения фосфора								
Урожайность овса, т/га	0,9*	0,2	0,4	0,4	0,0	0,9*	0,6	0,7*
Продуктивность севооборота, т з.ед.	0,7*	0,3	0,4	0,3	-0,1	0,7*	0,6	0,6

* - существенный ($p<0,05$).

Таблица 101 - Корреляционные зависимости между продуктивностью севооборота (урожайностью сельскохозяйственных культур) и содержанием (запасами) в пахотном слое почвы общего фосфора, его минеральными и органическими соединениями (*опыт 2*)

Показатель	Содержание, мг/кг			Запасы, т/га		
	$P_{общ}$	$P_{мин}$	$P_{орг}$	$P_{общ}$	$P_{мин}$	$P_{орг}$
Урожайность ячменя, т/га	0,4	0,0	0,9*	0,4	0,0	0,9*
Продуктивность севооборота, т з.ед.	0,1	0,0	0,3	0,1	0,0	0,2

* - существенный ($p<0,05$).

Таблица 102 - Корреляционные зависимости между продуктивностью севооборота (урожайностью сельскохозяйственных культур) и содержанием (запасами) в почве общего фосфора, его минеральными и органическими соединениями *(опыт 3)*

Показатель	Содержание, мг/кг					Запасы, т/га		
	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100	0-20	0-40	0-100
Общий фосфор								
Урожайность овса, т/га	0,9*	0,9*	1,0*	0,8	0,8	0,9*	0,9*	0,8
Продуктивность севооборота, т з.ед.	0,5	0,6	0,6	0,5	0,6	0,5	0,6	0,6
Минеральные соединения фосфора								
Урожайность овса, т/га	1,0*	0,9*	0,8*	0,8	0,8	1,0*	1,0*	0,8
Продуктивность севооборота, т з.ед.	0,6	0,6	0,5	0,6	0,4	0,6	0,6	0,6
Органические соединения фосфора								
Урожайность овса, т/га	0,3	0,7	0,7	0,6	-0,1	0,3	0,5	0,6
Продуктивность севооборота, т з.ед.	0,2	0,4	0,4	0,1	0,6	0,2	0,4	0,4

* - существенный ($p<0,05$).

Между содержанием в почве подвижных соединений фосфора, степенью подвижности фосфатов и урожайностью сельскохозяйственных культур наблюдали средние, высокие и очень высокие корреляционные зависимости (r=0,6-0,9), как в пахотном слое, так и в слое 0-100 см (табл. 103, 104). Однако по результатам *опыта 2*, где изучали применение фосфорных удобрений в чистом виде и их сочетание с азотными и калийными удобрениями, видно, что в почве наблюдаются достоверные корреляционные связи между урожайностью культур и содержанием в почве подвижных соединений фосфора только в пахотном слое (r=0,6). Также в данном опыте отмечаются высокие достоверные связи между урожайностью и содержанием органических соединений фосфора, отсутствуют зависимости между общим содержанием фосфора, его минеральной частью.

Таблица 103 - Корреляционные зависимости между продуктивностью севооборота (урожайностью сельскохозяйственных культур) и содержанием (запасами) в почве подвижных соединений фосфора

Показатель	Содержание, мг/кг					Запасы, т/га		
	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100	0-20	0-40	0-100
Опыт 1								
Урожайность, т/га	0,8*	0,8*	0,8*	0,3	-0,3	0,7*	0,8*	0,7*
Продуктивность севооборота, т з.ед.	0,6	0,9*	0,7*	0,2	-0,6	0,6	0,8*	0,6
Опыт 2								
Урожайность, т/га	0,6*	0,5	0,1	0,4	0,1	0,6*	0,6*	0,5
Продуктивность севооборота, т з.ед.	0,3	0,5	0,3	0,4	0,0	0,4	0,4	0,3
Опыт 3								
Урожайность, т/га	0,9*	0,9*	0,9*	0,9*	0,9*	0,9*	0,9*	0,9*
Продуктивность севооборота, т з.ед.	0,5	0,6	0,5	0,4	0,7	0,6	0,5	0,5

* - существенный ($p<0,05$).

Таблица 104 - Корреляционные зависимости между продуктивностью севооборота (урожайностью сельскохозяйственных культур) и степенью подвижности фосфатов в почве *(опыт 3)*

Показатель	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100
Урожайность овса, т/га	0,9*	0,8*	0,8*	0,7	0,8*
Продуктивность севооборота, т з.ед.	0,7	0,8*	0,6	0,4	0,6

* - существенный ($p<0,05$).

Полученные более высокие корреляционные зависимости между показателями фосфатного режима почвы и урожайностью сельскохозяйственных культур в других опытах, скорее всего, связаны с улучшением в целом всех агрохимических показателей плодородия почвы.

Корреляционные связи между урожайностью культур (продуктивностью севооборота) и валовым содержанием в почве калия, его необменной, подвижной и легкообменной формами по опытам также сильно варьировали – от очень слабых (недостоверных) до высоких (табл. 105-107). Чётких закономерностей выявить не получилось. В большей степени наличие достоверных корреляционных связей (r=0,7-1,0) между урожайностью и содержанием (запасами) валового калия, его различными формами наблюдали в опытах 1 и 3, где изучали органические системы, органоминеральные и минеральные системы удобрений, включающие все 3 элемента питания NPK. Здесь установлены прямые высокие корреляционные зависимости между урожайностью и валовыми запасами калия, его

подвижной и легкообменной формами в слое 0-40 см. В опыте 2, где изучали односторонне применение азотных, фосфорных и калийных удобрений и их сочетаний наблюдали не достоверные корреляционные связи слабой силы.

Таблица 105 - Корреляционные зависимости между продуктивностью севооборота (урожайностью сельскохозяйственных культур) и содержанием (запасами) в почве валового калия, его различными соединениями *(опыт 1)*

Показатель	Содержание, мг/кг					Запасы, т/га (кг/га)		
	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100	0-20	0-40	0-100
Валовое содержание								
Урожайность овса, т/га	0,4	-0,2	-0,3	-0,5	-0,8*	0,5	0,9*	0,2
Продуктивность севооборота, т з.ед.	0,5	-0,3	-0,3	-0,6	-0,7*	0,6	0,9*	0,1
Необменные соединения								
Урожайность овса, т/га	0,7*	0,5	-0,6	-0,5	-0,4	0,7*	0,6	-0,2
Продуктивность севооборота, т з.ед.	0,6	0,4	-0,5	-0,4	-0,4	0,6	0,5	-0,2
Подвижные соединения								
Урожайность овса, т/га	0,8*	0,5	-0,3	-0,2	-0,6	0,8*	0,8*	0,5
Продуктивность севооборота, т з.ед.	0,9*	0,6	-0,2	-0,3	-0,5	0,8*	0,8*	0,5
Легкообменные соединения								
Урожайность овса, т/га	0,7*	0,7*	0,1	-0,3	-0,7*	0,7*	0,7*	0,6
Продуктивность севооборота, т з.ед.	0,8*	0,8*	0,2	-0,1	-0,5	0,7*	0,8*	0,7*

* - существенный (p<0,05).

Таблица 106 - Корреляционные зависимости между продуктивностью севооборота (урожайностью сельскохозяйственных культур) и содержанием (запасами) в почве валового калия, его различными соединениями *(опыт 2)*

Показатель	Содержание, мг/кг					Запасы, т/га (кг/га)		
	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100	0-20	0-40	0-100
Валовое содержание								
Урожайность, т/га	-0,4	-0,4	-0,3	-0,2	-0,2	-0,4	-0,5	-0,4
Продуктивность севооборота, тыс. к.ед.	-0,1	-0,3	-0,5	-0,4	-0,4	-0,1	-0,3	-0,4
Необменные соединения								
Урожайность, т/га	-0,2	-0,3	-0,4	-0,3	-0,1	-0,2	-0,3	-0,4
Продуктивность севооборота, тыс. к.ед.	-0,2	-0,3	-0,7*	-0,5	-0,4	-0,2	-0,3	-0,7*
Подвижные соединения								
Урожайность, т/га	-0,2	0,1	-0,1	0,2	0,5	-0,2	0,0	0,0
Продуктивность севооборота, тыс. к.ед.	0,2	0,4	0,2	0,2	0,5	0,3	0,3	0,4
Легкообменные соединения								
Урожайность, т/га	0,0	0,3	0,4	0,4	0,2	0,0	0,1	0,1
Продуктивность севооборота, тыс. к.ед.	0,3	0,5	0,3	0,5	0,4	0,3	0,4	0,4

* - существенный (p<0,05).

Таблица 107 - Корреляционные зависимости между продуктивностью севооборота (урожайностью сельскохозяйственных культур) и содержанием (запасами) в почве (0-20 см) валового калия, его различными соединениями *(опыт 3)*

Показатель	Урожайность овса, т/га	Продуктивность севооборота, тыс. к.ед.
Содержание		
Валовое	0,8*	0,3
Необменные соединения	0,9*	0,5
Подвижные соединения	0,9*	0,4
Легкообменные соединения	0,9*	0,6
Запасы		
Валовые	0,9*	0,4
Необменные соединения	0,8*	0,4
Подвижные соединения	0,9*	0,3
Легкообменные соединения	0,9*	0,6

* - существенный ($p<0,05$).

Установлены достоверные обратные корреляционные связи между продуктивностью севооборотов (урожайностью культур) и показателем pH_{KCL}, содержанием в пахотном слое обменного кальция, магния, степенью насыщенности почв основаниями (r=-0,7-0,9) (табл. 108). Полученные результаты связаны с тем что, несмотря на существенное подкисление почвы, уменьшение содержания обменного кальция, степени насыщенности почв основаниями в результате длительного применения минеральных удобрений, как в чистом виде, так и сочетании с органическими, они обеспечивают получение максимальной урожайности культур.

Корреляционный анализ показал отсутствие достоверных взаимосвязей между урожайностью сельскохозяйственных культур (продуктивностью севооборота) и экофизиологическими параметрами микробиологического сообщества почвы (табл. 109).

Таблица 108 - Корреляционные зависимости между продуктивностью севооборота (урожайностью культур) и физико-химическими свойствами почвы

Показатель	Содержание, мг/кг				
	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100
Опыт 1					
Продуктивность севооборота, т.з.ед.					
pH_{KCL}	-0,5	-0,2	-0,2	-0,4	-0,5
Нг, смоль(экв)/кг	0,6	0,6	0,7*	0,7*	0,7*
S, смоль(экв)/кг	-0,6	-0,3	0,5	0,4	0,5
V, %	-0,8*	-0,5	-0,3	-0,5	-0,5
Обменный Ca^{2+}, смоль(экв)/кг	-0,7*	0,4	0,5	0,7*	0,6
Обменный Mg^{2+} , смоль(экв)/кг	0,1	0,2	0,7*	0,8*	0,8*
Урожайность овса, т/га					
pH_{KCL}	-0,5	-0,3	-0,2	-0,4	-0,4
Нг, смоль(экв)/кг	0,6	0,6*	0,6	0,8*	0,7*
S, смоль(экв)/кг	-0,6	-0,4	0,2	0,2	0,0
V, %	-0,8*	-0,6	-0,4	-0,7*	-0,6
Обменный Ca^{2+}, смоль(экв)/кг	-0,9*	-0,1	0,0	0,9*	0,6
Обменный Mg^{2+} , смоль(экв)/кг	-0,4	0,1	0,3	0,6	0,5
Опыт 2					
Продуктивность севооборота, т.з.ед.					
pH_{KCL}	-0,7*	-0,5	-0,5	-0,7*	-0,7*
Нг, смоль(экв)/кг	0,8*	0,6*	0,5	0,4	0,7*
S, смоль(экв)/кг	-0,5	-0,1	0,0	-0,1	-0,4
V, %	-0,7*	-0,5	-0,4	-0,3	-0,7*
Обменный Ca^{2+}, смоль(экв)/кг	-0,2	0,0	-0,1	-0,3	-0,3
Обменный Mg^{2+} , смоль(экв)/кг	0,2	-0,1	0,1	0,2	0,0
Урожайность, т/га					
pH_{KCL}	0,4	0,3	0,4	0,3	0,4
Нг, смоль(экв)/кг	-0,3	-0,3	-0,4	-0,2	-0,3
S, смоль(экв)/кг	0,3	0,1	0,0	-0,3	0,2
V, %	0,3	0,4	0,4	0,0	0,3
Обменный Ca^{2+}, смоль(экв)/кг	0,0	0,0	0,1	-0,2	-0,1
Обменный Mg^{2+} , смоль(экв)/кг	0,2	0,1	-0,2	0,1	0,1
Опыт 3					
Продуктивность севооборота, т.з.ед.					
pH_{KCL}	-0,6	-0,6	-0,6	-0,6	-0,9*
Нг, смоль(экв)/кг	0,8*	0,5	0,2	-0,2	0,6
S, смоль(экв)/кг	0,5	-0,3	-0,5	-0,1	-0,3
V, %	-0,6	-0,5	-0,7	-0,4	-0,5
Обменный Ca^{2+}, смоль(экв)/кг	-0,7	-0,7	-0,7	-0,6	-0,2
Обменный Mg^{2+} , смоль(экв)/кг	-0,8*	-0,5	-0,8*	-0,6	0,3
Урожайность овса, т/га					
pH_{KCL}	-0,8*	-0,7	-0,7	-0,7	-0,9*
Нг, смоль(экв)/кг	0,9*	0,7	0,3	-0,2	0,8*
S, смоль(экв)/кг	0,4	-0,5	-0,7	-0,3	-0,4
V, %	-0,9*	-0,7	-0,8*	-0,6	-0,7
Обменный Ca^{2+}, смоль(экв)/кг	-0,7	-0,9*	-0,8*	-0,8*	-0,4
Обменный Mg^{2+} , смоль(экв)/кг	-0,8*	-0,7	-0,9*	-0,6	0,1

* - существенный ($p<0,05$).

Таблица 109 - Корреляционные зависимости между продуктивностью севооборота (урожайностью сельскохозяйственных культур) и микробиологическими показателями

Показатель	Опыт 1		Опыт 2		Опыт 3	
	У**	П	У	П	У	П
БД	0,0	-0,5	-0,5	0,4	0,5	0,3
СИД, $С_{мик}$	-0,3	-0,1	-0,2	0,5	-0,6	-0,5
qCO_2	0,4	0,0	0,1	-0,3	0,6	0,6

* - существенный (р<0,05),** - У – урожайность, т/га; П – продуктивность севооборота, т з. ед.

Для расчёта множественной корреляция между продуктивностью севооборота (Y) и агрохимическими свойствами почвы по всем трём опытам были выбраны – содержание $С_{орг}$ (X1), минерального азота (X2), подвижного фосфора (X3) и калия (X4). При проведении парной корреляции между факторами содержание фактор «содержание $С_{орг}$» (X1) был исключен в связи более высокой теснотой связи с другими факторами, чем результативным признаком (прил. 18). Оценка значимости коэффициентов регрессии показала, что при факторе «подвижный фосфор» (X3) коэффициент регрессии является не существенным и его следует исключить из уравнения (прил. 19). Остальные факторы можно включить в множественное уравнение регрессии (прил. 20):

Продуктивность, т з.ед. (Y)=2,28+0,013*Nмин (мг/кг) + 0,003*K_2O (мг/кг)

Уравнение регрессии значимо (Fф>Fт).

Таким образом, результаты исследований показали, что применение на дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве органической системы удобрений (насыщенность пашни навоз 10 и 20 т/га в год) обеспечило увеличение продуктивности полевых культур в севообороте в среднем за пять ротаций на 15-20%, минеральной (эквивалентно навозу) и органоминеральной систем удобрений на 23-30 %. На яровой пшенице минеральная система удобрений была более эффективна, чем органическая или органоминеральная. На картофеле минеральная и органоминеральная

системы удобрений по эффективности были равнозначны и обеспечивали прибавку урожая на 15-20 % выше, чем органическая система. Яровой ячмень был наименее отзывчивым среди культур на применение удобрений, прибавки урожайности не зависели от системы удобрений и не превышали в среднем за 5 ротаций 13 %, что связано с размещением по хорошему предшественнику в севообороте - клеверу.

Изучение применения азотных, фосфорных, калийных удобрений, их соотношения и доз показало, что 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 $(NPK)_{30-60}$, пшенице - $(NPK)_{60}$, ячмене - $(NPK)_{30}$, урожайность культур возросла на 21-56%. Наибольшая продуктивность севооборота получена при внесении $(NPK)_{60}$. Применение суперфосфата и калия хлористого в чистом виде не оказало существенного влияния на продуктивность севооборота.

Внесение ОСВ в дозе 40 т/га 1 раз в ротацию севооборота достоверно повысило урожайность зерновых культур на 0,5-0,7, сена клевера на 0,8-1,1 т/га и не уступило действию навоза КРС в эквивалентной дозе. Продуктивность севооборота при внесении ОСВ возросла на 27 %.

Наиболее отзывчивыми на применение удобрений в полевых севооборотах были яровая пшеница и картофель. Урожайность сена клевера лугового зависела от развития и урожая покровной культуры.

Возделывание сельскохозяйственных культур в полевом севообороте без применения удобрений в течение 35-50 лет привело к потере из почвы 3,5-5,5 т органического углерода, 1,5-2,0 т азота, 0,6-0,9 т фосфора и 2,0-3,0 т калия. Наличие в севообороте пропашной культуры – картофеля увеличивало потери органического углерода из почвы в 1,4-1,6, азота – в 1,2-1,4, фосфора – в 1,2-1,5 и калия в 1,3 раза.

Нулевой или положительный баланс в почве по органическому углероду в полевом восьмипольном севообороте сложился при применении органической и органоминеральной систем удобрения. Положительный баланс по азоту (с учетом двух полей клевера) и калию сформировался при насыщенности пашни навозом 20 т/га в год, NPK экв. 20 т навоза, навозом 10 т/га в год + NPK экв. навозу и навозом 20 т/га в год + NPK экв. навозу. По фосфору складывался нулевой или положительный баланс при применении всех изученных систем удобрения.

Изучение азотных, фосфорных, калийных удобрений, их соотношения и доз показало, что в полевом восьмипольном севообороте баланс по азоту 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. Положительный баланс по углероду сложился при использовании высоких доз $(NPK)_{120\text{-}150}$.

Применение ОСВ (насыщенность 5,7 т/га в год) обеспечило баланс близкий к нулевому по органическому углероду и положительный по фосфору. Баланс по азоту близкий к нулевому получен при внесении ОСВ в сочетании с минеральными удобрениями. Баланс по калию сложился отрицательный как при использовании ОСВ в чистом виде, так и по фону NPK.

Отмечено снижение коэффициентов использования элементов питания из удобрений при увеличении их доз.

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 минерального азота (в слое 0-40 см и 0-100 см), запасами подвижного фосфора (в слое 0-20 см). Достоверных корреляционных связей не выявлено между продуктивностью культур и биологическими свойствами почвы.

10 ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ДЛИТЕЛЬНОГО ПРИМЕНЕНИЯ УДОБРЕНИЙ

Научный интерес к вопросам безопасности применения удобрений, мелиорантов, средств защиты растений с точки зрения сохранения «здоровья» почвы и получения экологически чистой сельскохозяйственной продукции всегда остаётся актуальным. В наших исследованиях проводили определение в почве валового содержания и подвижных форм (ААБ pH 4,8, 1м HCL) кадмия, свинца и цинка, относящихся к первому классу опасности, кобальта, никеля и меди, относящихся ко второму классу опасности и марганца, относящегося к третьему классу опасности.

Валовое содержание Cd в дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве злаково-разнотравного луга в слое 0-20 см составило 0,4±0,1, Pb 9,3±1,2, Zn 30,2±1,8, Cu 23,5±8,8, Co 13,6±2,1, Ni 51,3±3,8 и Mn 437±98 мг/кг (табл. 110). Элементы по валовому количеству образовали следующий убывающий ряд: Mn>Ni>Zn>Cu>Co>Pb>Cd.

Валовое содержание Ni, Zn, Cu, Co и Pb в почве с глубиной возрастает в 1,1-1,8 раза, Cd распределено по почвенному профилю относительно равномерно 0,3-0,4 мг/кг. Для Mn максимальное валовое количество отмечено в верхнем слое 0-20 см, с глубиной наблюдали его уменьшение на 5-20 %.

Содержание Cd, Pb, Cu и Mn в почве соответствует кларкам представленным в таблице 111, количество Zn –ниже указанных значений, а Co и Ni - выше. Валовая концентрация Cd, Pb, Zn, Cu, Co и Mn была значительно ниже установленных значений ПДК. Валовая концентрация Ni в целинной почве выше установленных значений ПДК (40 мг/кг – для кислых почв (суглинистых и глинистых) с pH KCl<5,5), что может быть связано с высоким фоновым значением или загрязнением окружающей среды (Ильин, 2012; Мамонтов и др., 2017). Территория опытного поля Пермского НИИСХ находится под влиянием ветров, дующих с Осенцовского промышленного узла, в итоге объекты окружающей среды – почва и растительность могут быть загрязнены токсичными веществами.

Таблица 110 - Содержание тяжёлых металлов в целинной и пахотной дерново-подзолистой почве, мг/кг

Слой, см	Содержание, мг/кг						
	Cd	Pb	Zn	Cu	Co	Ni	Mn
Злаково-разнотравный луг							
ААБ pH 4,8							
0-20	0,1±0,0	0,7±0,1	1,0±0,2	0,5±0,1	нпо	1,2±0,2	88±25
20-40	0,1±0,0	0,7±0,1	0,8±0,2	0,7±0,2	нпо	1,2±0,2	48±10
40-60	0,1±0,0	0,6±0,1	0,6±0,2	2,0±0,4	нпо	1,4±0,3	36±7
60-80	0,1±0,0	0,6±0,1	0,4±0,1	2,0±0,4	нпо	1,3±0,2	32±8
80-100	0,1±0,0	0,7±0,2	0,4±0,1	1,9±0,3	нпо	1,3±0,2	34±5
ПДК*	-	6,0	23,0	3,0	5,0	4,0	60
1М HCL							
0-20	0,3±0,1	3,7±0,5	3,6±0,2	4,9±1,2	2,8±0,3	4,1±0,5	276±28
20-40	0,2±0,1	2,8±0,4	3,0±0,6	5,8±0,9	1,8±0,2	3,1±0,8	160±23
40-60	0,2±0,1	2,5±0,5	3,7±0,4	10,0±2,1	1,4±0,8	3,7±0,4	121±52
60-80	0,2±0,1	2,7±0,3	2,9±0,5	10,0±1,5	1,4±0,4	3,4±0,4	106±33
80-100	0,3±0,1	2,7±0,3	3,1±0,5	10,3±1,2	1,5±0,2	4,2±0,5	119±12
ПДК**	1,0	60,0	60,0	50,0	12,0	36,0	600,0
Валовое содержание							
0-20	0,4±0,1	9,3±1,2	30,2±1,8	23,5±8,8	13,6±2,1	51,3±3,8	437±98
20-40	0,3±0,1	9,8±1,1	33,6±1,6	23,3±6,4	15,1±1,9	64,6±3,0	402±95
40-60	0,3±0,1	9,5±1,2	33,5±2,1	42,1±6,8	15,6±1,9	73,6±4,4	423±96
60-80	0,3±0,1	12,3±1,4	34,1±1,5	40,0±3,5	15,2±2,1	71,9±5,0	372±81
80-100	0,4±0,1	10,1±0,9	31,8±1,4	37,8±3,5	14,2±2,2	70,4±6,5	352±21
ПДК*	1,0	65,0	110,0	66,0	-	40,0	1500,0
Полевой севооборот (без удобрений)***							
ААБ pH 4,8							
0-20	0,2±0,1	0,6±0,2	1,2±0,2	0,4±0,0	нпо	1,6±0,3	125±36
20-40	0,2±0,1	0,7±0,1	0,7±0,2	0,6±0,2	нпо	1,4±0,3	64±49
40-60	0,1±0,1	0,8±0,3	0,5±0,1	0,9±0,1	нпо	1,3±0,1	38±10
60-80	0,1±0,1	0,7±0,1	0,5±0,1	1,0±0,2	нпо	1,6±0,4	46±17
80-100	0,1±0,1	0,7±0,2	0,5±0,1	1,1±0,4	нпо	1,7±0,6	48±20
ПДК*	-	6,0	23,0	3,0	5,0	4,0	60
1М HCL							
0-20	0,3±0,0	4,6±0,3	5,0±0,3	5,5±0,6	2,9±0,1	6,1±1,0	273±88
20-40	0,3±0,1	4,0±0,1	3,9±0,4	5,8±0,4	2,2±0,6	5,2±2,8	169±122
40-60	0,3±0,1	3,6±0,5	3,6±0,4	7,1±1,2	1,8±0,1	4,3±1,1	123±42
60-80	0,3±0,1	3,7±0,6	3,9±0,6	7,6±1,7	1,9±0,4	5,5±2,0	147±68
80-100	0,3±0,1	4,3±0,7	3,7±0,5	8,1±2,0	1,9±0,4	6,0±2,7	149±80
ПДК**	1,0	60,0	60,0	50,0	12,0	36,0	600,0
Валовое содержание							
0-20	0,4±0,1	10,7±0,6	32,0±2,5	20,0±3,6	13,6±1,6	45,7±1,5	557±82
20-40	0,3±0,1	11,2±1,7	32,4±2,0	26,5±5,9	13,7±1,4	54,8±3,7	397±49
40-60	0,3±0,1	10,5±1,3	32,9±2,4	31,4±4,8	13,5±1,5	61,4±2,5	360±8
60-80	0,4±0,1	10,6±1,8	32,9±3,1	32,5±5,2	14,0±1,6	66,8±11,7	387±19
80-100	0,4±0,1	10,0±0,6	32,8±2,2	33,8±4,9	14,4±1,7	68,2±10,2	390±19
ПДК*	1,0	65,0	110,0	66,0	-	40,0	1500,0

* - СанПиН 1.2.3685-21, ** - Чулджиян Х. (1988), *** - усредненные данные по опытам 1-3 (табл.116-118).

Таблица 111 - Содержание тяжёлых металлов в почвах, мг/кг

Элемент	Валовое содержание (кларк) по А.П. Виноградову (1957)	Валовое содержание (кларк) по A. Kabata-Pendias (2011)	Пределы колебаний валового содержания (Bowen, 1966; Самофалова, 2009)	Содержание подвижных форм (Самофалова, 2009)	Пределы колебаний содержания подвижных форм (Самофалова, 2009)
Cd	0,5	0,4	0,01-0,7	0,06	0,01-0,5
Pb	10	27	2-200	4	0,05-46
Zn	50	70	10-300	10	0,01-200
Cu	20	39	2-100	3	0,02-19,2
Co	8	11	1-40	1	0,001-15,4
Ni	29	29	5-5000	18	0,1-403
Mn	850	488	100-4000	110	15-170

Основными источниками техногенного Ni являются предприятия нефтепереработки и нефтехимии, машиностроения, и металлообрабатывающие (Васильев, Лобанова, 2015). На ООО «ЛУКОЙЛ-Пермнефтеоргсинтез» за год перерабатывается свыше 12 млн. т. нефти (Якуцени, 2005; Филимонова и др., 2020), что сопровождается ежегодным рассеиванием в окружающую среду огромного количества Ni – 400 т (Якуцени, 2005). По данным Т.П. Голдыревой (2005) в период с 1960 по 2002 гг. в щитовидной железе взрослого населения г. Перми произошло увеличение содержания Ni в 56 раз.

«Актуальную» подвижность ТМ характеризует их концентрация в ацетатно-аммонийной вытяжке (ААБ pH 4,8). Содержание подвижных соединений (ААБ pH 4,8) Cd, Pb, Zn, Cu, Ni и Mn в целинной дерново-подзолистой почве (0-20 см) составило 0,1±0,0, 0,7±0,1, 1,0±0,2, 0,5±0,1, 1,2±0,2 и 88±25 мг/кг, соответственно.

Количество подвижных соединений Cd, Pb и Ni по профилю почвы варьировало не значительно, Cu увеличивалось с глубиной в 1,4-4,0 раза, Mn уменьшалось в 1,8-2,8 раза. Концентрация подвижной формы (ААБ pH 4,8) Co в почве по всему метровому слою была ниже предела обнаружения. В верхнем слое почвы отмечено превышение ПДК по содержанию подвижной

формы марганца. В работе Ю.Н. Водяницкого (2009) отмечается, что марганец выступает как фаза-носитель никеля.

Потенциальный запас подвижных соединений металлов в почве характеризуют кислоторастворимая форма тяжелых металлов, извлекаемая 1М HCI. Содержание кислоторастворимой формы Cd, Pb, Zn, Cu, Co, Ni и Mn в верхнем слое почвы составило 0,3±0,1, 3,7±0,5, 3,6±0,2, 4,9±1,2, 2,8±0,3, 4,1±0,5, 276±28 мг/кг, соответственно. Количество кислоторастворимой формы Pb, Co и Mn с глубиной в метровом слое почвы уменьшается, оно было в 1,3-2,6 раза ниже, чем в верхнем слое. Содержание кислоторастворимых подвижных соединений Cu с глубиной увеличивается в 1,2-2,1 раза. Концентрация Cd, Zn и Ni, извлечённых 1М HCI, варьировала в метровом слое почвы в пределах 0,2-0,3, 2,9-3,7 и 3,1-4,2 мг/кг, не выявлено чётких закономерностей в их изменении по профилю.

Проект нормативов предельно допустимого содержания в почве кислоторастворимых форм (потенциально доступных для растений) элементов в свое время был незавершен. Несмотря на это, он нашел применение в практике экологических работ, однако эти нормативы не являются официально утвержденными (Ильин, 1991). Концентрация подвижных кислоторастворимых соединений всех изученных элементов была значительно ниже значений ПДК.

В пахотной почве (севооборот, без удобрений) в сравнении с целинным аналогом отмечено более низкое валовое содержание меди и её доступных форм для растений, изменения отмечены в метровом слое почвы. В результате длительного сельскохозяйственного использования пашни запасы валовой меди в метровом слое уменьшились с 480 (луг) до 380 кг/га, подвижной формы (ААБ pH 4,8) с 20 до 10 кг/га, кислоторастворимой формы (1М HCL) со 120 до 80 кг/га.

Валовая концентрация Cd, Zn и Pb в пахотной почве в сравнении с целинной существенно не изменилась, валовое содержание Ni и Co было ниже в отдельных слоях почвы на 10-20%. Отмечено другое распределение

валового содержания марганца: наблюдали увеличение на 10-25% в слоях 0-20 и 80-100 см, снижение на 15 % в слое 40-60 см.

В пахотной почве выявлено увеличение (на 15-65 %) содержания кислоторастворимой формы Cd, Zn, Pb, Co и Ni, изменение наблюдали в метровом слое почвы. Отмечено более высокое содержание подвижных соединений (ААБ pH 4,8) Cd, Zn, Ni и Mn. В верхнем слое (0-20 см) наблюдали увеличение на 25-45%. Изменения в более глубоких слоях зависели от конкретного элемента, отмечено увеличение содержания ТМ на 15-45% или значения сохранились на уровне целинного аналога. Полученные результаты по увеличению подвижных форм отдельных элементов могут быть связаны с минерализацией органического вещества, снижением количества его легкодоступной фракции, изменением в физико-химических свойствах почвы, механической обработкой почвы или генетической неоднородностью почвенного покрова.

В пахотной почве (севооборот, без удобрений), также как и в почве злаково-разнотравного луга, наблюдали превышение ПДК по валовому содержанию никеля и подвижной форме марганца.

Для оценки безопасности длительного применения различных систем удобрений в *опыте 1* в 2019 году после шести ротаций севооборота был проведен анализ почвенных образцов на содержание подвижной (ААБ pH 4,8) и кислоторастворимой (1М HCL) форм Cd, Pb, Zn, Cu, Co, Ni и Mn по фазам развития растений яровой пшеницы (табл. 112).

Содержание подвижной и кислоторастворимой форм Cd, Pb и Zn в пахотном слое почвы контрольного варианта опыта по фазам вегетации яровой пшеницы изменялось незначительно, количество Cu, Co, Ni и Mn уменьшалось от фазы кущения к фазе полной спелости.

Таблица 112 - Содержание тяжелых металлов в почве по фазам развития яровой пшеницы при длительном применении органической, минеральной и органоминеральной систем удобрения, мг/кг, 0-20 см (VII ротация, 2019 г.) *(опыт 1)*

Вариант	Cd		Pb		Zn		Cu		Co		Ni		Mn		Z_c	
	1*	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Кущение																
Без удобрений	0,4	0,5	2,6	5,2	1,3	7,9	0,3	4,2	нпо**	2,1	1,0	6,0	17	196	-	-
Навоз 10т/га	0,3	0,5	2,3	5,2	1,8	8,8	0,4	5,1	нпо	2,4	0,7	6,0	15	247	1,7	1,7
NPK экв. 10 т навоза	0,5	0,5	2,2	5,0	1,7	7,9	0,4	4,6	нпо	2,0	1,2	6,0	22	201	2,4	1,1
Навоз 5 т+NPK экв.	0,5	0,5	2,3	4,9	1,7	8,3	0,4	4,7	нпо	2,1	0,8	6,0	13	210	1,9	1,2
Навоз 10 т + NPK экв.	0,5	0,5	2,1	4,8	1,8	8,3	0,4	4,6	нпо	2,1	0,9	6,0	17	208	2,0	1,2
$НСР_{05}$	0,1	Fф<Fт	0,3	Fф<Fт	0,1	0,4	Fф<Fт	0,3	-	0,2	0,3	Fф<Fт	Fф<Fт	21	-	-
Колошение																
Без удобрений	0,4	0,5	2,2	4,7	1,8	6,9	0,4	3,9	нпо	1,6	1,0	5,5	16	154	-	-
Навоз 10т/га	0,4	0,5	2,2	4,8	1,5	7,8	0,5	4,7	нпо	1,8	0,7	6,0	9	187	1,3	1,8
NPK экв. 10 т навоза	0,4	0,5	2,8	4,7	1,5	7,3	0,4	4,1	нпо	1,8	1,2	6,9	20	195	1,7	1,8
Навоз 5 т+NPK экв.	0,4	0,5	3,0	4,7	1,7	8,1	нпо	4,7	нпо	1,8	1,1	6,0	21	193	1,8	1,8
Навоз 10 т + NPK экв.	0,4	0,6	3,0	4,7	1,8	8,1	нпо	4,2	нпо	1,7	1,2	5,8	23	183	2,0	1,8
$НСР_{05}$	Fф<Fт	Fф<Fт	0,3	Fф<Fт	Fф<Fт	0,5	Fф<Fт	0,2	-	Fф<Fт	0,3	Fф<Fт	6	21	-	-
Полная спелость																
Без удобрений	0,5	0,5	3,0	4,8	1,7	7,9	нпо	3,8	нпо	1,5	0,9	5,1	9	149	-	-
Навоз 10 т/га	0,5	0,5	3,3	4,7	1,8	8,7	нпо	4,6	нпо	1,7	0,8	5,6	7	189	1,2	1,8
Навоз 20 т/га	0,5	0,5	3,2	4,8	1,9	9,0	нпо	5,0	нпо	2,0	0,6	5,9	7	216	1,2	2,4
NPK экв. 10 т навоза	0,5	0,5	3,2	4,5	1,5	7,4	нпо	4,0	нпо	1,5	1,0	5,4	11	163	1,4	1,2
NPK экв. 20 т навоза	0,5	0,5	3,2	4,8	2,0	9,5	нпо	4,0	нпо	1,8	1,0	6,6	16	213	2,1	2,2
Навоз 5 т+NPK экв.	0,5	0,5	2,8	4,8	1,8	9,2	нпо	4,3	нпо	1,8	0,8	5,8	10	188	1,2	1,9
Навоз 10 т + NPK экв.	0,5	0,5	3,3	4,7	2,1	9,1	нпо	4,5	нпо	1,8	0,9	6,1	12	192	1,7	2,0
Навоз 20 т + NPK экв.	0,5	0,5	3,1	5,0	2,3	9,5	нпо	4,3	нпо	2,0	0,8	6,2	16	224	2,2	2,4
$НСР_{05}$	$F_ф<F_т$	Fф<Fт	$F_ф<F_т$	$F_ф<F_т$	0,3	0,9	-	0,4	-	0,2	Fф<Fт	Fф<Fт	7	32	-	-
ПДК	-	1	6	60	23	60	3	50	5	12	4	36	60	600	-	-

* - 1 - вытяжка ААБ pH 4,8; 2 – вытяжка 1М HCL, ** - ниже предела обнаружения.

Исследования показали, что изменение содержания ТМ в почве зависело от применяемой системы удобрения и фазы развития растений. При использовании органической системы удобрения в отдельные фазы развития растений наблюдали увеличение в почве концентрации подвижной и/или кислоторастворимой форм Zn, Cu, Co и Mn в 1,1-1,4 раза, минеральной - Zn, Cu, Co, Mn, Ni, Pb и Cd в 1,1-1,8 раза. При этом причины увеличения количества ТМ (микроэлементов), характер и механизмы их сорбции и десорбции в почве при разных системах удобрения могут существенно отличаться и зависеть от химического состава удобрений, изменения физико-химических свойств почвы, количества легкодоступного органического вещества и интенсивности процессов его минерализации, активности микроорганизмов и т.д. (Шихова Л.Н., 2005; Лыкова и др., 2014; Храмцов и др., 2021; Курбаков Д.Н. и др., 2022).

При использовании органической системы удобрения отмечено уменьшение в почве подвижной формы Cd, Pb и Ni на 10-30 %, данные изменения наблюдали в фазу кущения.

В фазу полной спелости отбор образцов проводили по всем изучаемым вариантам. Исследования показали, что изменения в содержании некоторых ТМ в почве на момент уборки культуры зависели от насыщенности пашни навозом и NPK. В обоих вариантах с органической системой удобрений отмечено увеличение содержания в почве кислоторастворимой формы Cu и Co. При этом концентрация кислоторастворимой формы данных элементов в почве была на 10-20 % выше при насыщенности пашни навозом 20 т/га в год, чем при насыщенности 10 т/га в год. Содержание подвижной и/или кислоторастворимой форм Zn, Mn и Co на момент уборки культуры в пахотном слое почвы при внесении NPK эквивалентно 10 т/га в год навоза соответствовало уровню контрольного варианта, при внесении NPK эквивалентно 20 т/га в год навоза было выше в 1,2-1,8 раза.

Изменения в содержании подвижной и кислоторастворимой форм изученных ТМ в почве при использовании органоминеральной системы

удобрения были близки вариантам с минеральной системой. Исключение составила медь. Концентрация кислоторастворимой формы Cu в почве была достоверна выше контрольного варианта на 10-20 % во все фазы развития культуры, что характерно для вариантов с навозом.

Максимальное содержание кислоторастворимых соединений Cu наблюдали при применении органической системы удобрений, её количество в почве приблизилось к целинному аналогу.

Концентрация в почве кислоторастворимой формы Cd не зависела от применяемых систем удобрений.

Содержание подвижной формы Cu и Co в вытяжке ААБ pH 4,8 в почве в некоторые фазы роста растений было ниже предела обнаружения прибора, что возможно связано с избыточным увлажнением почвы, с большим количеством выпавших осадков в период исследований.

Длительное применение органических и минеральных удобрений не привело к загрязнению почвы тяжелыми металлами – содержание всех изученных элементов было значительно ниже ПДК.

В изученных почвенных образцах также было ниже ПДК содержание подвижных соединений Mn (ААБ pH 4,8), что может быть связано с гидротермическими условиями вегетационного периода. В работе Ю.Н. Водяницкого с соавторами (2016) отмечается возможность высокого (от 50 до 200%) варьирования подвижных соединений ТМ (ААБ pH 4,8) на одних и тех же участках в зависимости от гидротермических условий сезона, сроков отбора образцов, вариантов их хранения и подготовки к анализу. Первостепенное значение в определении подвижных форм элементов имеет фактор влажности почвы, контролирующий физические, физико-химические, химические и биологические механизмы изменения подвижности по типу нелинейной функции с экстремумом (максимумом). По данным М.Г. Опекуновой (2011) содержание подвижных соединений Mn в почве с 1999 по 2010 гг. варьировало от 20 до 74 мг/кг почвы. Значительная временная

вариабельность содержания подвижных соединений Mn отмечена и в работе Л.Н. Шиховой (2005) – от 12 до 116 мг/кг.

Важным показателем является содержание тяжелых металлов в произведенной продукции. Нами было изучено влияние систем удобрения на содержание ТМ в яровой пшенице. Во все фазы вегетации из изучаемых элементов в растениях обнаружили только цинк и марганец (табл. 113). Содержание остальных элементов было ниже предела обнаружения. Вероятно, сказались неблагоприятные погодные условия, такие как избыток дождей и нехватка тепла, в сырую погоду процесс перехода ТМ из почвы в растения замедляется.

Таблица 113 - Влияние систем удобрений на содержание цинка и марганца в надземной и корневой массе яровой пшеницы, мг/кг (VII ротация, 2019 г.) *(опыт 1)*

Вариант	Кущение				Колошение				Полная спелость					
	стебли		корни		стебли		корни		зерно		солома		корни	
	Zn	Mn	Zn	Mn	Zn	Mn	Zn	Mn	Zn	Mn	Zn	Mn	Zn	Mn
Без удобрений (контроль)	72	50	66	87	51	нпо	63	139	31	нпо	26	50	40	179
Навоз 10 т/га в год	55	44	85	150	48	нпо	86	291	35	нпо	нпо	51	27	169
NPK экв. 10 т/га в год навоза	87	69	63	212	31	нпо	105	179	24	нпо	нпо	55	нпо	169
Навоз 5 т/га+ NPK экв. навозу	65	45	56	126	50	нпо	32	172	45	нпо	30	43	28	136
Навоз 10 т/га+ NPK экв. навозу	78	47	98	120	44	нпо	42	165	47	нпо	нпо	46	нпо	115
$НСР_{05}$	19	7	10	72	Fф<Fт	-	8	64	Fф<Fт	-	Fф<Fт	Fф<Fт	-	Fф<Fт
ПДК или МДУ*	-	-	-	-	-	-	-	-	50	-	50	-	-	-

* - МДУ – максимально-допустимый уровень элемента в кормах (соломе, зерне, зернофураже) для сельскохозяйственных животных.

Установлено, что изменения содержания Zn и Mn в растениях в фазу кущения и колошения зависели от применяемой системы удобрения. Однако на момент уборки достоверных изменений количества Zn и Mn в зерне, соломе и корнях по вариантам опыта не установлено. Наибольшее содержание цинка в зерне (47 мг/кг) отмечено при внесении навоза 10 т/га + NPK эквивалентно навозу. Длительное применение различных систем удобрения не привело к накоплению в зерне цинка выше установленных

нормативов ПДК (СанПиН 2.3.2.1078-01) или МДУ (Временный максимально-допустимый…, 1987) и полученный урожай может быть использован, как на продовольственные, так и кормовые цели. Содержание марганца в продукции не нормируется.

В *опыте 2* определение подвижной и кислоторастворимой форм ТМ (ААБ pH 4,8, 1М HCL) в почве проводили в начале шестой ротации севооборота в 2018-2019 гг. в посевах озимой ржи (табл. 114). Исследования показали, что содержание ТМ в почве зависело от дозы вносимых минеральных удобрений. Достоверное увеличение содержания кислоторастворимой формы Cd и Pb наблюдали при внесении NPK 120 кг и выше д.в. каждого элемента/га, Zn, Co, Ni и Mn – при применении NPK 60 кг и выше д.в. каждого элемента/га. Концентрация кислоторастворимых соединений ТМ в зависимости от элемента, фазы развития растений (срока отбора почвы) увеличилась относительно контрольного варианта в 1,1-1,9 раза.

Внесение минеральных удобрений NPK 90 кг и выше д.в. каждого элемента/га оказало влияние на содержание в почве подвижной формы Zn, Ni, Cu и Mn. Отмечено увеличение в отдельные фазы роста растений концентрации подвижной формы Zn в почве в 1,2-1,3 раза, Ni – в 1,4-1,6 раза, Mn – в 1,6-2,4 раза и Cu – в 3-4 раза.

Следует отметить, что чаще всего достоверные изменения в содержании ТМ в почве наблюдали при отборе почвенных образцов перед посевом озимой ржи или на момент уборки в фазу полной спелости. В фазу кущения и колошения разница по количеству ТМ в почве между изучаемыми вариантами в большей степени была не достоверна, что связано с потреблением растениями и более высокими интенсивными биохимическими процессами в почве в данные фазы развития растений.

Содержание подвижной и кислоторастворимой форм (ААБ pH 4,8, 1М HCL) изученных тяжелых металлов в пахотном (0-20 см) слое во все фазы развития озимой ржи не превышало ПДК.

Таблица 114 - Содержание тяжёлых металлов в почве по фазам развития растений озимой ржи при длительном внесении минеральных удобрений, мг/кг (VI ротация, 2018-2019 гг.) *(опыт 2)*

Вариант	Cd		Pb		Zn		Cu		Co		Ni		Mn		Z_c	
	1*	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Перед посевом																
Без удобрений	0,4	0,5	нпо**	9,1	1,3	5,2	1,0	6,7	нпо	1,5	0,7	4,5	50	263	-	-
$(NPK)_{30}$	0,4	0,5	нпо	9,2	1,3	4,6	1,0	5,4	нпо	1,6	нпо	3,8	36	261	1,0	1,1
$(NPK)_{60}$	0,4	0,5	нпо	6,5	1,3	5,1	1,2	4,8	нпо	1,6	0,7	4,7	55	282	1,5	1,2
$(NPK)_{90}$	0,5	0,5	1,6	8,1	1,2	5,2	3,7	5,2	нпо	1,9	1,1	5,9	63	299	7,5	1,7
$(NPK)_{120}$	0,5	0,6	2,4	15,4	1,1	5,6	3,6	7,4	нпо	2,1	1,0	6,1	58	316	7,0	3,0
$(NPK)_{150}$	0,5	0,6	1,7	17,3	1,3	5,7	3,0	6,5	нпо	1,8	1,1	5,6	79	303	6,4	2,8
$НСР_{05}$	0,1	0,1	-	5,6	Фф<Фт	0,3	0,6	1,6	-	0,3	0,3	0,4	16	30	-	-
Кущение (весеннее)																
Без удобрений	0,6	0,6	нпо	4,7	1,3	5,4	нпо	4,5	нпо	1,6	нпо	4,6	18	208	-	-
$(NPK)_{60}$	0,6	0,6	нпо	4,8	1,4	5,5	нпо	4,3	нпо	1,8	0,5	4,9	31	217	1,8	1,3
$(NPK)_{90}$	0,6	0,6	нпо	5,0	1,5	5,7	нпо	4,4	нпо	1,9	0,6	5,2	34	218	2,0	1,5
$(NPK)_{150}$	0,6	0,6	нпо	4,9	1,4	5,9	нпо	4,3	нпо	2,1	0,6	5,8	41	255	2,4	1,9
$НСР_{05}$	Фф<Фт	Фф<Фт	-	Фф<Фт	Фф<Фт	Фф<Фт	-	Фф<Фт	-	Фф<Фт	-	0,7	14	26	-	-
Колошение																
Без удобрений	0,6	0,6	нпо	4,7	1,2	5,8	нпо	4,6	нпо	1,9	нпо	4,8	19	216	-	--
$(NPK)_{60}$	0,6	0,6	нпо	4,2	1,2	6,0	нпо	4,4	нпо	2,1	0,4	4,9	33	250	1,7	1,3
$(NPK)_{90}$	0,4	0,5	нпо	4,2	1,4	6,4	нпо	4,5	нпо	2,0	0,6	5,6	39	240	2,2	1,4
$(NPK)_{150}$	0,4	0,4	нпо	4,4	1,5	6,6	нпо	4,4	нпо	2,3	0,6	6,1	61	280	3,5	1,9
$НСР_{05}$	Фф<Фт	Фф<Фт	-	Фф<Фт	0,2	0,4	-	Фф<Фт	-	Фф<Фт	-	0,6	18	51	-	-
Полная спелость																
Без удобрений	0,4	0,4	нпо	4,2	1,1	5,7	нпо	4,6	нпо	1,8	нпо	4,9	7	200	-	-
$(NPK)_{30}$	0,4	0,4	нпо	4,2	0,9	5,5	нпо	4,4	нпо	2,0	нпо	4,4	6	218	1,0	1,2
$(NPK)_{60}$	0,4	0,4	нпо	4,1	1,1	6,3	нпо	4,3	нпо	2,4	нпо	5,6	10	268	1,4	1,9
$(NPK)_{90}$	0,4	0,4	нпо	4,3	1,2	6,5	нпо	4,5	нпо	2,3	нпо	5,9	9	241	1,4	1,9
$(NPK)_{120}$	0,4	0,5	нпо	4,3	1,1	6,7	нпо	4,9	нпо	2,5	нпо	5,6	7	269	1,0	2,4
$(NPK)_{150}$	0,4	0,5	нпо	4,5	1,3	7,2	нпо	4,6	нпо	2,5	нпо	6,5	17	283	2,6	2,7
$НСР_{05}$	Фф<Фт	0,1	-	Фф<Фт	0,2	0,4	-	Фф<Фт	-	0,4	-	0,7	4	32	-	-
ПДК	-	1	6	60	23	60	3	50	5	12	4	36	60	600	-	-

* - 1 - вытяжка ААБ pH 4,8; 2 – вытяжка 1М HCL, ** - ниже предела обнаружения.; *** - определение не проводили.

Анализ различных частей растений озимой ржи показал, что содержание Cd, Pb, Cu, Ni и Co ниже предела обнаружения.

Содержание Zn и Mn в корнях, стеблях и листьях уменьшалось при переходе растений из вегетативной фазы в репродуктивную (табл. 115). Количество Zn в зерне озимой ржи варьировало от 11 до 35, в соломе от 7 до 19 мг/кг и не превышало ПДК для пищевых продуктов и МДУ для кормов сельскохозяйственных животных. Полученная продукция может быть использована, как на продовольственные цели, так и на кормовые. Применение удобрений повысило количество цинка в растениях озимой ржи (корни, надземная масса, зерно) в 1,1-2,6 раза.

Таблица 115 - Влияние длительного применения возрастающих доз минеральных удобрений на содержание цинка и марганца в надземной и корневой массе яровой пшеницы, мг/кг (2018-2019 гг.) *(опыт 2)*

Вариант	Кущение				Колошение				Полная спелость					
	стебли		корни		стебли		корни		зерно		солома		корни	
	Zn	Mn	Zn	Mn	Zn	Mn	Zn	Mn	Zn	Mn	Zn	Mn	Zn	Mn
Без удобрений	33	42	28	227	26	37	20	415	19	26	7	23	12	264
$(NPK)_{60}$	37	71	38	316	32	37	28	397	11	29	10	27	9	214
$(NPK)_{90}$	39	62	34	238	29	45	32	302	32	27	19	33	11	203
$(NPK)_{150}$	37	78	34	235	30	51	35	329	35	29	19	38	6	172
$НСР_{05}$	2	24	3	Фф<Фт	4	7	5	Фф<Фт	10	Фф<Фт	6	Фф<Фт	Фф<Фт	40
ПДК или МДУ	-	-	-	-	-	-	-	-	50	-	50	-	-	-

Изменения содержания Mn в растениях (стебли, корни) в фазу кущения и колошения зависели от применяемой дозы NPK. Однако на момент уборки достоверных изменений количества Mn в зерне и соломе по вариантам опыта не установлено. Содержание Mn в зерне озимой ржи варьировало от 26 до 29, в соломе от 23 до 38 мг/кг. Содержание марганца в продукции не нормируется.

В *опытах 1 и 2* в вариантах с максимальной насыщенностью (дозой) пашни удобрениями было проведено определение ТМ в метровом слое почвы.

При длительном внесении навоза 20 т/га в год + NPK эквивалентно навозу в почве относительно контрольного варианта отмечено более высокое

валовое содержание Mn и Cu (табл. 116). Валовое содержание Mn было выше в слоях почвы 0-20 и 20-40 см в 1,2-1,3 раза, Cu – в слоях 40-60 и 80-100 см в 1,2-2,2 раза.

Таблица 116 - Влияние длительного применения удобрений на содержание тяжёлых металлов в почве, мг/кг (VI ротация, 2016-2017 гг.) *(опыт 1)*

Вариант		Содержание, мг/кг								Z_c
		Cd	Pb	Zn	Cu	Co	Ni	Mn	Fe	
ААБ pH 4,8										
Без удобрений	0-20	0,1	0,5	1,0	0,3	нпо	1,7	103	12	-
	20-40	0,1	0,7	0,5	0,6	нпо	1,5	38	15	-
	40-60	0,1	0,6	0,5	0,8	нпо	1,5	31	15	-
	60-80	0,1	0,7	0,5	0,7	нпо	1,4	28	13	-
	80-100	0,1	0,5	0,5	0,9	нпо	1,5	28	15	-
Навоз 20 т + NPK экв.	0-20	0,1	0,3	2,9	0,4	нпо	2,0	135	9	3,4
	20-40	0,1	0,5	1,5	0,3	нпо	1,4	85	9	4,3
	40-60	0,1	0,7	0,5	0,6	нпо	1,5	22	16	1,2
	60-80	0,1	0,7	0,5	0,8	нпо	1,6	23	16	2,2
	80-100	0,1	0,7	0,5	1,3	нпо	1,7	21	17	1,5
$НСР_{05}$		Fф<Fт	Fф<Fт	0,5	0,4	-	0,3	28	3	-
ПДК		-	6,0	23,0	3,0	5,0	4,0	60	-	-
1M HCL										
Без удобрений	0-20	0,3	4,9	5,2	4,9	2,8	7,1	183	989	-
	20-40	0,3	4,0	3,8	5,5	1,7	4,9	87	943	-
	40-60	0,3	3,8	3,9	5,9	1,7	5,4	85	966	-
	60-80	0,2	4,2	4,3	5,9	1,6	4,6	79	1002	-
	80-100	0,3	4,6	4,2	6,1	1,6	4,7	70	1084	-
Навоз 20 т + NPK экв.	0-20	0,4	4,7	8,9	7,3	3,7	10,1	250	1078	3,4
	20-40	0,3	4,2	5,7	5,9	2,7	6,8	185	983	3,9
	40-60	0,3	3,2	3,2	5,6	2,0	5,7	95	979	1,4
	60-80	0,3	3,1	3,5	7,2	1,8	6,0	73	985	1,7
	80-100	0,3	3,1	3,6	9,1	1,7	5,3	62	1001	1,8
$НСР_{05}$		0,1	Fф<Fт	1,8	1,3	0,6	2,8	35	Fф<Fт	-
ПДК		1,0	60,0	60,0	50,0	12,0	36,0	600,0	-	-
Валовое содержание										
Без удобрений	0-20	0,4	10,6	29,6	18,3	12,8	45,4	484	11723	-
	20-40	0,4	11,5	31,5	26,1	12,7	57,1	382	16687	-
	40-60	0,4	10,1	32,1	28,2	12,1	58,9	366	16754	-
	60-80	0,5	9,7	30,5	27,8	12,6	57,1	384	16776	-
	80-100	0,4	9,6	30,9	28,9	12,8	58,5	371	16172	-
Навоз 20 т + NPK экв.	0-20	0,5	9,0	34,1	20,2	12,8	42,7	615	9423	1,8
	20-40	0,4	9,7	31,0	22,2	13,0	50,2	465	11395	1,2
	40-60	0,4	9,2	27,3	62,8	12,3	57,5	307	13353	2,2
	60-80	0,5	8,2	25,4	31,7	11,0	51,7	299	12510	1,1
	80-100	0,4	9,2	30,6	36,0	13,6	63,0	377	14939	1,4
$НСР_{05}$		Fф<Fт	Fф<Fт	Fф<Fт	7,0	Fф<Fт	Fф<Fт	75	951	-
ПДК		1,0	65,0	110,0	66,0	-	40,0	1500,0	-	-

Длительное внесение удобрений в большей степени повлияло на подвижность ТМ. Отмечено увеличение концентрации подвижной и/или кислоторастворимой форм Cd, Ni - в слое почвы 0-20 см (в 1,2-1,4 раза), Zn, Co и Mn – в слоях 0-20 и 20-40 см (в 1,2-2,1 раза). Количество подвижной и/или кислоторастворимой форм Cu возросло в слоях почвы 0-20, 60-80 и 80-100 см (в 1,2-1,5 раза). Валовое содержание свинца и его форм в почве существенно не изменялось. Увеличение валового количества меди и её подвижных форм в более глубоких слоях почвы может быть связано с повышенной миграционной способностью данного элемента в условиях промывного водного режима, длительностью воздействия высоких доз удобрения. Нельзя исключать генетической неоднородности почвенного покрова.

Внесение NPK в дозе 150 кг д.в./га привело к уменьшению в метровом слое почвы количества валового Ni на 10-20%, содержания его кислоторастворимой формы в слоях 60-80 и 80-100 см (на 45-50 %) (табл. 117). При этом концентрация подвижной формы (ААБ pH 4,8) в верхнем слое почвы 0-40 см была выше, чем в контрольном варианте в 1,6-1,9 раза. Поглощение никеля почвой зависит от разных факторов, в частности, от её кислотности (pH). В кислой среде никель подвижен, легко поглощается растениями и мигрирует по профилю, при pH более 6,7 никель закрепляется почвой (Карпова, Шумилова, 2019). Поэтому существенное подкисление почвы в результате длительного внесения NPK могло привести к миграции соединений Ni за пределы метрового слоя и более интенсивному выносу растениями.

Также при внесении $(NPK)_{150}$ в почве отмечено в сравнении с контрольным вариантом уменьшение валового содержания Cu, её кислоторастворимой формы в слое 0-40 см на 10-20%, подвижной - в слое 20-40 см на 40%.

Таблица 117 - Влияние длительного применения минеральных удобрений на содержание тяжёлых металлов в почве, мг/кг (VI ротация, 2021 г.) *(опыт 2)*

Вариант		Содержание, мг/кг								Z_c
		Cd	Pb	Zn	Cu	Co	Ni	Mn	Fe	
ААБ pH 4,8										
Без удобрений	0-20	0,2	0,7	1,4	0,4	0,5	1,3	111	10	-
	20-40	0,2	0,8	0,7	0,7	нпо	1,1	40	25	-
	40-60	0,2	1,0	0,6	1,0	нпо	1,2	34	22	-
	60-80	0,2	0,8	0,6	1,0	нпо	2,1	54	16	-
	80-100	0,2	0,9	0,6	1,1	нпо	2,3	59	12	-
$(NPK)_{150}$	0-20	0,2	0,6	1,8	0,3	0,7	2,1	212	11	2,8
	20-40	0,2	0,6	1,2	0,4	0,5	2,1	136	13	5,1
	40-60	0,2	0,6	0,7	0,9	нпо	1,3	36	17	1,1
	60-80	0,2	0,6	0,7	1,1	нпо	1,5	47	15	1,2
	80-100	0,2	0,6	0,7	1,3	нпо	1,7	56	14	1,3
$НСР_{05}$		Fф<Fт	0,3	0,4	0,3	-	0,8	91	5	-
ПДК		-	6,0	23,0	3,0	5,0	4,0	60	-	-
1М HCL										
Без удобрений	0-20	0,4	4,7	4,8	5,9	3,0	5,3	314	1280	-
	20-40	0,3	3,9	3,5	6,2	2,0	2,9	130	1343	-
	40-60	0,4	3,9	3,8	7,3	1,9	3,5	126	1317	-
	60-80	0,4	3,8	4,1	8,1	2,4	7,6	191	1296	-
	80-100	0,4	3,7	3,6	8,5	2,3	8,7	208	1077	-
$(NPK)_{150}$	0-20	0,4	5,2	4,9	5,1	3,4	7,1	416	1005	0,9
	20-40	0,4	4,2	4,2	5,2	2,5	4,8	261	900	3,2
	40-60	0,3	3,4	3,2	6,6	1,7	3,1	121	874	-
	60-80	0,3	3,3	3,4	7,9	2,0	3,8	137	967	-
	80-100	0,4	3,2	3,8	8,8	2,1	4,7	155	1053	1,1
$НСР_{05}$		Fф<Fт	Fф<Fт	Fф<Fт	0,8	0,4	3,7	95	231	-
ПДК		1,0	60,0	60,0	50,0	12,0	36,0	600,0	-	-
Валовое содержание										
Без удобрений	0-20	0,4	11,3	33,9	23,7	15,3	47,2	629	11578	-
	20-40	0,4	12,5	34,4	31,9	15,1	56,3	364	16336	-
	40-60	0,4	11,8	35,3	36,2	14,7	62,9	361	18205	-
	60-80	0,4	12,5	35,8	37,1	15,4	77,7	405	16119	-
	80-100	0,4	9,9	34,8	36,3	15,7	76,3	395	14207	-
$(NPK)_{150}$	0-20	0,4	11,8	31,7	18,9	13,4	39,6	618	9504	1,0
	20-40	0,4	12,1	32,3	25,2	14,9	51,3	543	13307	1,5
	40-60	0,4	10,8	34,8	33,9	14,4	63,2	374	15729	1,0
	60-80	0,4	9,6	32,2	33,6	13,8	61,5	357	14695	1,0
	80-100	0,4	10,7	35,2	37,6	15,2	68,1	435	15139	1,2
$НСР_{05}$		Fф<Fт	Fф<Fт	Fф<Fт	4,6	Fф<Fт	5,0	124	1528	-
ПДК		1,0	65,0	110,0	66,0	-	40,0	1500,0	-	-

Наблюдали рост количества подвижной и/или кислоторастворимой форм Zn, Co и Mn, изменения затронули верхний слой почвы 0-40 см. Отмечено увеличение валового содержания Mn в слое почвы 20-40 см в 1,5

раза. Валовое количество кадмия и его форм в почве существенно не изменялось.

В *опыте 3* изучили влияние на накопление ТМ нетрадиционного органического удобрения - осадков городских сточных вод. ОСВ содержат достаточно высокое количество тяжелых металлов. Поэтому в почве, где регулярно вносят ОСВ, необходим постоянный контроль за содержанием ТМ.

Для нормирования поступления ТМ в почву при внесении ОСВ разработаны специальные ограничения на их содержание – ГОСТ Р 17.4.3.07 – 2001. ОСВ, которые применяли в опыте в IV-VI ротациях соответствовали данным требованиям. Данные по содержанию ТМ в ОСВ представлены в приложении 1.

Длительное внесение ОСВ привело к увеличению в почве валового содержания Cd, Pb, Zn, Co, Ni и Cu, их подвижной и кислоторастворимой форм (табл. 118). Накопление происходило в основном в слое 0-40 см, их количество возросло в 1,1-3,3 раза. Увеличение содержания ТМ в более глубоких слоях отмечено для подвижной формы Cu и кислоторастворимой формы Ni.

Отмечено снижение подвижности в почве марганца. Наблюдали уменьшение в почве на 20-45 % его подвижной (в слое 0-40 см) и кислоторастворимой форм (в подпахотном и более глубоких слоях почвы). Валовое количество марганца в результате длительного внесения ОСВ не изменилось.

Для оценки безопасности регулярного применения ОСВ было проведено в пятой ротации севооборота (2007-2013 гг.) определение содержания некоторых ТМ в конечной продукции полевых культур (табл. 119, 120).

При внесении ОСВ в чистом пару V ротации (2007 г.) в зерне озимой ржи достоверно увеличилось содержание Zn и Cu, в зерне яровой пшеницы -

отмечены тенденции накопления Zn и Cd. В зерне обеих культур на 15 % уменьшилось количество Pb (на уровне тенденции).

Таблица 118 - Влияние длительного применения ОСВ на содержание тяжёлых металлов в почве, мг/кг (V ротация, 2013 г.) *(опыт 3)*

Вариант		Содержание, мг/кг								Z_c
		Cd	Pb	Zn	Cu	Co	Ni	Mn	Fe	
ААБ pH 4,8										
Без удобрений	0-20	0,2	0,5	1,3	0,4	нпо	1,8	162	20	-
	20-40	0,2	0,5	0,9	0,4	нпо	1,7	114	21	-
	40-60	0,2	0,6	0,4	0,9	нпо	1,3	48	18	-
	60-80	0,1	0,7	0,4	1,2	нпо	1,4	55	17	-
	80-100	0,2	0,7	0,5	1,5	нпо	1,3	58	17	-
ОСВ	0-20	0,5	0,9	4,4	1,1	нпо	2,8	128	25	8,1
	20-40	0,4	0,6	1,6	0,7	нпо	1,8	75	19	4,1
	40-60	0,1	0,9	0,5	1,3	нпо	1,4	42	18	2,1
	60-80	0,1	0,7	0,6	1,6	нпо	1,5	52	18	2,1
	80-100	0,2	0,9	0,8	1,7	нпо	1,5	50	17	2,0
$НСР_{05}$		0,2	0,3	0,5	0,2	-	0,9	28	4	-
ПДК		-	6,0	23,0	3,0	5,0	4,0	60	-	-
1М HCL										
Без удобрений	0-20	0,3	4,3	5,1	5,7	2,9	5,9	322	1002	-
	20-40	0,3	4,0	4,3	5,9	2,8	7,8	292	1120	-
	40-60	0,3	3,0	3,2	8,0	1,8	4,0	159	1034	-
	60-80	0,3	3,1	3,3	8,8	1,9	4,4	171	1058	-
	80-100	0,3	4,7	3,4	9,6	1,8	4,6	168	1040	-
ОСВ	0-20	0,6	5,5	12,5	12,9	3,2	8,7	317	1128	5,5
	20-40	0,4	4,0	6,1	7,7	2,5	6,2	160	996	2,3
	40-60	0,3	3,4	3,4	8,7	1,6	4,1	92	932	1,5
	60-80	0,3	3,3	3,9	10,0	1,9	5,4	111	1029	1,8
	80-100	0,4	4,0	4,3	10,2	2,1	6,3	112	1133	2,1
$НСР_{05}$		0,2	0,9	1,8	3,4	0,3	1,5	54	Fф<Fт	-
ПДК		1,0	60,0	60,0	50,0	12,0	36,0	600,0	-	-
Валовое содержание										
Без удобрений	0-20	0,4	10,3	32,4	18,0	12,8	44,7	559	10153	-
	20-40	0,4	9,5	31,4	21,5	13,2	51,1	447	11514	-
	40-60	0,4	9,6	31,4	29,9	13,7	62,3	352	13577	-
	60-80	0,5	9,7	32,4	32,5	14,1	65,7	371	14689	-
	80-100	0,4	10,6	32,7	36,4	14,8	69,9	403	14494	-
ОСВ	0-20	0,7	21,0	46,0	25,6	13,5	48,1	548	11473	3,8
	20-40	0,4	10,8	37,0	22,9	13,8	54,5	439	12733	1,5
	40-60	0,4	9,8	34,5	31,0	14,1	65,1	363	15759	1,3
	60-80	0,4	9,5	33,0	35,9	13,8	65,1	399	17675	1,2
	80-100	0,4	9,1	33,1	35,7	14,3	68,9	353	15480	1,1
$НСР_{05}$		0,2	4,5	5,2	5,4	0,6	3,4	Fф<Fт	1007	-
ПДК		1,0	65,0	110,0	66,0	-	40,0	1500,0	-	-

Таблица 119 - Содержание тяжелых металлов в растениях зерновых культур при длительном применении ОСВ в качестве удобрения, мг/кг в.с.в. (V ротация) *(опыт 3)*

Вариант	Озимая рожь				Яровая пшеница				Ячмень				Овёс			
	Cd	Pb	Zn	Cu	Cd	Pb	Zn	Cu	Cd	Pb	Zn	Cu	Cd	Pb	Zn	Cu
Без удобрений	0,04 0,03	0,36 0,68	24,3 9,4	3,4 4,9	0,08 0,05	0,34 0,70	37,4 10,0	7,0 5,8	0,02 0,05	0,19 0,23	19,5 11,2	4,8 2,13	0,04 0,12	0,03 0,09	21,9 25,9	4,3 3,7
ОСВ	0,04 0,03	0,30 0,72	33,3 13,1	4,4 10,7	0,09 0,05	0,29 0,70	38,3 27,1	6,9 11,7	0,01 0,15	0,17 0,20	17,7 37,7	3,9 2,30	0,04 0,12	0,03 0,10	22,5 28,5	5,0 4,5
$НСР_{05}$	Fф<Fт	0,10 Fф<Fт	2,8 1,9	1,0 1,1	0,02 Fф<Fт	0,10 Fф<Fт	3,5 4,3	1,0 1,7	0,02 0,05	Fф<Fт	6,57 10,1	Fф<Fт	Fф<Fт	Fф<Fт	Fф<Fт 2,1	Fф<Fт 0,8
ПДК МДУ	0,1 0,3	0,5 5,0	50 50	10 30	0,1 0,3	0,5 5,0	50 50	10 30	0,1 0,3	0,5 5,0	50 50	10 30	0,1 0,3	0,5 5,0	50 50	10 30

Над чертой – содержание ТМ в зерне, под чертой – в соломе.

Таблица 120 - Содержание тяжелых металлов в зелёной массе клевера при длительном применении ОСВ в качестве удобрений, мг/кг в.с.в. (V ротация) *(опыт 3)*

Вариант	Клевер луговой 1 г.п.				Клевер луговой 2 г.п.			
	Cd	Pb	Zn	Cu	Cd	Pb	Zn	Cu
Без удобрений	0,07	0,83	30,00	16,50	0,10	0,92	31,50	14,65
ОСВ	0,09	0,67	46,25	18,00	0,12	0,75	44,00	16,75
$НСР_{05}$	0,01	0,13	7,1	1,05	0,01	0,15	6,5	1,35
МДУ	0,3	5,0	50	30	0,3	5,0	50	30

Известно, что поглощение Pb растениями происходит в довольно пассивной форме, здесь хорошо действует система инактивации Pb корневой системой (Овчаренко, 1997; Минеев и др., 2003). Поэтому даже увеличение Pb в почве (до определённых границ) может существенно не повлиять на повышение содержание элемента в растении. Кроме того возможен эффект «биологического разведения», заключающийся в распределении токсичных элементов в большем объеме полученного урожая. Следовательно, применяя ОСВ с примесями ТМ необходимо стремиться к созданию оптимальных условий для роста растений. Содержание ТМ в зерне ячменя было ниже, чем в контрольном варианте в 1,1-2,1 раза, в зерне овса сохранилось на уровне контроля.

В соломе всех зерновых культур существенно возросло содержание Zn и Cu (в 1,1-3,4 и 1,1-2,1 раза, соответственно). Следует также отметить, что в соломе ячменя достоверно увеличилось содержание Cd с 0,05 до 0,15 мг/кг.

Кормовые культуры в большей степени подвержены накоплению ТМ, чем зерновые. Внесение ОСВ привело к увеличению содержания в растениях клевера 1 и 2 г.п. Cd, Zn и Cu относительно контрольного варианта в 1,1-1,5 раза. Количество Pb уменьшилось почти на 20 %.

Содержание ТМ (Cd, Pb, Zn и Cu) в зерне и соломе озимой ржи, яровой пшеницы, ячменя, овса и зелёной массе клевера при регулярном внесении ОСВ находилось в пределах установленных ПДК и МДУ.

Для оценки степени загрязнения продукции также был рассчитан дополнительный показатель – коэффициент биологического накопления ($К_б$):

$К_б = К_р/К_п$, где

$К_р$ – концентрация элемента в растении;

$К_п$ – концентрация элемента в почве.

При расчёте $К_б$ использовали содержание в почве подвижных ТМ.

В варианте с регулярным внесением ОСВ 40 т/га получены более низкие $К_б$, чем в контрольном варианте, по всем изученным ТМ. В зерне полевых культур $К_б$ был ниже относительно контрольного варианта в 1,4-5,9,

в зелёной массе клевера в 1,5-4,3 раза (табл. 121). Полученные результаты свидетельствуют об эффективности защитной системы растений, предотвращающей поступление ТМ в биомассу, при данном уровне загрязнения.

Для культур севооборота наиболее высокие $К_б$ отмечены по Zn и Cu, что связано с участием данных элементов в жизненно важных функциях организма.

Расчет хозяйственного выноса и баланса Cd, Pb, Zn и Cu показал, что при внесении ОСВ повысился в 1,4 – 1,7 раза вынос Zn и Cu, как за счет повышения урожайности культур, так и содержания данных элементов в растениях. Zn и Cu являются микроэлементами (табл. 122). По данным Д.М. Хомякова (1991) ОСВ могут обеспечить бездефицитный баланс данных микроэлементов в севообороте. Как показывают результаты наших исследований, внесение ОСВ в дозе 40 т/га раз в ротацию севооборота обеспечило положительный баланс по Cu, он составил 949 г/га или 0,32 мг/кг почвы. По Zn сложился отрицательный баланс – минус 150 г/га или минус 0,05 мг/кг почвы, что в первую очередь связано с высоким потреблением данного элемента сельскохозяйственными культурами (по Zn вынос с продукцией растениеводства был в несколько раз выше, чем по Cu).

Считается, что химические элементы Cd и Pb не имеют определенного функционального значения для растений (Алексеев, 1987; Дабахов и др., 2005). Однако роль этих элементов выяснена не до конца. В некоторых работах отмечается положительное действие свинца на рост и развитие растений (Убугунов, Доржонова, 2010; Арышева и др., 2013; Елькина, 2015) и кадмия на всхожесть семян (Мельничук, 1990).

Вынос Cd при внесении ОСВ увеличился в 1,6 раза. Кадмий обладает высокой аккумулятивной способностью, легко перемещается из корней в надземные органы, в больших количествах проникает в репродуктивные органы, и, являясь химическим аналогом цинка, способен замещать его в сложных метаболических процессах.

Таблица 121 - Коэффициенты биологического накопления тяжелых металлов в растениях, мг/кг *(опыт 3)*

Вариант	Озимая рожь (2008 г.)				Яровая пшеница (2009 г.)				Клевер луговой 1 г.п. (2010 г.)				Клевер луговой 2 г.п. (2011 г.)				Ячмень (2012 г.)				Овёс (2013 г.)			
	Cd	Pb	Zn	Cu	Cd	Pb	Zn	Cu	Cd	Pb	Zn	Cu	Cd	Pb	Zn	Cu	Cd	Pb	Zn	Cu	Cd	Pb	Zn	Cu
Без удобрений	0,44 / 0,33	1,20 / 2,27	20,25 / 7,83	8,50 / 12,25	0,89 / 0,56	1,13 / 2,33	31,17 / 8,33	17,50 / 14,50	0,78	2,77	25,00	41,25	1,11	3,07	26,25	36,63	0,20 / 0,50	0,63 / 0,77	10,26 / 5,89	24,00 / 10,65	0,40 / 1,20	0,10 / 0,30	11,53 / 13,63	21,50 / 18,50
ОСВ	0,13 / 0,09	0,43 / 1,03	4,63 / 1,82	6,29 / 15,29	0,28 / 0,16	0,41 / 1,00	5,32 / 3,76	9,86 / 16,71	0,28	0,96	6,42	25,71	0,38	1,07	6,11	23,90	0,04 / 0,58	0,21 / 0,25	2,68 / 5,71	5,57 / 3,29	0,15 / 0,46	0,04 / 0,13	3,41 / 4,32	7,14 / 6,43

Над чертой – коэффициенты накопления в зерне, под чертой – в соломе

Таблица 122 - Баланс тяжёлых металлов в V ротации полевого семипольного севооборота (2007-2013 гг.) при использовании ОСВ, г/га *(опыт 3)*

Вариант	Внесено с ОСВ				Хозяйственный вынос											
					озимая рожь (зерно + солома)				яровая пшеница (зерно + солома)				клевер 1 г.п.			
	Cd	Pb	Zn	Cu	Cd	Pb	Zn	Cu	Cd	Pb	Zn	Cu	Cd	Pb	Zn	Cu
Без удобрений	–	–	–	–	0,2	3,6	93	27	0,2	1,8	78	21	0,3	3,9	142	78
ОСВ 40 т/га	116	279	877	1258	0,2	3,5	137	52	0,3	2,2	142	41	0,5	3,6	250	97

Продолжение таблицы 122

Вариант	Хозяйственный вынос												Баланс, +/–			
	клевер 2 г.п.				ячмень (зерно + солома)				овёс (зерно+солома)							
	Cd	Pb	Zn	Cu	Cd	Pb	Zn	Cu	Cd	Pb	Zn	Cu	Cd	Pb	Zn	Cu
Без удобрений	0,4	3,8	129	60	0,2	1,2	92	21	0,2	0,2	61	10	-1,5	-14,5	-595	-218
ОСВ	0,6	3,6	208	79	0,5	1,3	192	21	0,3	0,3	97	18	113	264	-150	949

Вынос Pb сохранился на уровне контрольного варианта (14,5 г/га). По Cd и Pb сложился положительный баланс (113 или 0,04 и 264 г/га или 0,09 мг/кг почвы).

Систематическое применение ОСВ по фону минеральных удобрений (I-V ротации) привело к увеличению кислоторастворимой формы Cd в почве выше ПДК (табл. 123). Увеличение содержания Cd в почве соответственно привело к его накоплению и в растительной продукции (табл. 124).

Таблица 123 - Содержание кислоторастворимой формы (1М HCL) ТМ в пахотном слое почве в посевах яровой пшеницы, мг/кг *(опыт 3)*

Вариант	Cd	Pb	Zn	Cu	Z_c
Без удобрений	0,29	1,60	4,80	4,50	–
Навоз	0,29	1,10	4,00	3,20	0,0
ОСВ	0,87	2,20	16,40	10,70	7,4
NPK – фон	0,81	2,90	15,20	10,00	7,0
Фон + навоз	0,17	1,70	5,50	3,20	1,2
Фон + ОСВ	1,06	3,00	16,10	13,30	8,8
$НСР_{05}$	0,3	0,5	3,6	1,4	-
ПДК (вытяжка 1М HCL)	1	60	60	50	-

Таблица 124 - Содержание тяжелых металлов в зерне яровой пшеницы, мг/кг *(опыт 3)*

Вариант	Cd	Pb	Zn	Cu
Без удобрений	0,08	0,34	37,50	7,00
Навоз	0,08	0,29	33,30	7,00
ОСВ	0,09	0,29	38,25	6,90
NPK – фон	0,08	0,34	33,30	6,60
Фон + навоз	0,08	0,22	33,30	4,75
Фон + ОСВ	0,10	0,27	39,00	6,50
$НСР_{05}$	0,02	0,1	3,5	1,0
ПДК	0,1	0,5	50	10
МДУ	0,3	5,0	50	30

На фоне минеральных удобрений в варианте с систематическим внесением ОСВ отмечено накопление Cd в зерне яровой пшеницы до 0,10 мг/кг. Содержание Cd достигло уровня ПДК, но было ниже, чем МДУ для кормов, т.е. данную продукцию можно использовать только на зернофураж. Кадмий обладает высокой аккумулятивной способностью, легко перемещается из корней в надземные органы, в больших количествах проникает в репродуктивные органы, и, являясь химическим аналогом цинка,

способен замещать его в сложных метаболических процессах. Уже в контрольном варианте содержание кадмия в зерне яровой пшеницы составило 0,08 мг/кг, тогда как его ПДК равно 0,10 мг/кг. Считается, что Cd даже при низком содержании в почве приводит к накоплению его в кормах и продуктах питания выше ПДК, особенно на кислых дерново-подзолистых почвах (Химия тяжелых металлов…, 1985).

Для оценки степени загрязнения почвенного покрова несколькими ТМ используют суммарный показатель загрязнения - Z_c (СанПиН 1.2.3685-21).

Суммарный показатель загрязнения (Z_c), рассчитывали по формуле:

$$Z_c = \sum_{i=1}^{n} K_c - (n-1),$$

$$K_c = \frac{C_a}{C_t},$$

где K_c – коэффициент концентрации;

n – число элементов с $K_c > 1,0$;

C_a –концентрация элемента в варианте;

C_t – концентрация элемента в контроле.

Уровень загрязнения считается низким, если Z_c находится в пределах 0-16; средним (умеренно опасным) – 16-32, высоким (опасным) – 32-132; очень высоким (чрезвычайно опасным) – >128.

Расчеты показали, что показатель суммарного загрязнения почвы ТМ в *опытах 1-3* варьировал от 1,1 до 8,8 (в зависимости от формы элемента, слоя почвы, фазы развития растений), что свидетельствует о наиболее слабом загрязнении почвы и считается допустимым. Максимальные значения Z_c отмечены при длительном внесении ОСВ в чистом виде и по фону NPK.

Для исследуемой пахотной дерново-подзолистой почвы характерна низкая обеспеченность цинком (< 2,0 мг/кг) и средняя медью (0,21-0,50 мг/кг) (Методические указания по проведению…2003). Обеспеченность почвы марганцем варьировала от низкой (< 10 мг/кг) до высокой (> 20 мг/кг). Применение ОСВ способствовало переходу почвы по обеспеченности цинком в группу «среднее содержание», медью – «высокое содержание».

Выявлены корреляционные зависимости между содержанием ТМ в почве и её агрохимическими свойствами (табл. 125). Полученные корреляционные зависимости свидетельствуют, что причины изменения содержания ТМ в почве, механизмы сорбции и десорбции при использовании разных видов и доз удобрений существенно отличаются и зависят от показателей кислотности почвы, степени насыщенности почв основаниями, содержания органического вещества, различных соединений фосфора, калия, эффектов синергизма и антагонизма.

Установлено, что от содержания органического углерода в почве зависело изменение подвижной и/или кислоторастворимой форм Zn, Cu, Co, Ni и Mn (r=0,6-0,9). Показатели кислотности почвы, степень насыщенности почв основаниями содержание обменного кальция в почве достоверно коррелировали с количеством подвижной и/или кислоторастворимой форм Zn, Ni и Mn. Содержание общего фосфора в почве и его различные соединения были взаимосвязаны с количеством подвижной и/или кислоторастворимой форм Pb, Zn, Co, Ni и Mn.

Для цинка также установлена прямая корреляционная связь с валовым содержанием калия и его подвижной формой (r=0,7-0,9). Для кадмия (ААБ pH 4,8; 1M HCL) выявлена достоверная обратная корреляционная связь только с органофосфатами (r=-0,7).

Таким образом, длительное экстенсивное возделывание сельскохозяйственных культур в севообороте (без удобрений) способствовало в первую очередь повышению подвижности тяжелых металлов в почве. Отмечено увеличение на 15-65 % содержания кислоторастворимых и/или подвижных форм Cd, Pb, Zn, Ni, Co и Mn. Изменения отмечены в метровом слое почвы. Это может быть связано с минерализацией органического вещества, снижением количества его легкодоступной фракции, изменением в физико-химических свойствах почвы и механической обработкой почвы. Валовое содержание тяжёлых металлов изменилось в меньшей степени.

Таблица 125 - Корреляционные зависимости содержания тяжёлых металлов (мг/кг) в почве от её агрохимических свойств (0-20 см) *(опыт 3)*

Показатель	$C_{орг.}$, %	pH_{KCl}	Нг	S	V, %	Ca^{2+}	Mg^{2+}	$P_{общ}$	$P_{мин}$	$P_{орг}$	$P_{подв}$	Ca-P_I	Ca-P_{II}	Al-P	Fe-P	Ca-P_{III}	$K_{вал}$	K_2O подв.
			смоль(экв)/кг			смоль(экв)/кг		мг/кг										
Опыт 1																		
Подвижные формы (ААБ pH4,8)																		
Cd	-0,3	0,2	-0,2	0,2	0,3	0,3	0,1	-0,3	-0,3	-0,3	-0,5	-0,5	0,0	-0,3	-0,3	-0,5	-0,4	-0,3
Pb	0,3	0,2	-0,1	0,1	0,1	-0,2	-0,5	0,0	-0,1	0,2	0,1	0,2	0,6*	0,4	0,4	0,0	0,1	0,2
Zn	0,8*	0,0	0,1	-0,2	-0,5	-0,7*	-0,2	0,7*	0,6*	0,7*	0,8*	0,7*	0,2	0,6*	0,4	-0,2	0,7*	0,8*
Ni	-0,5	-0,9*	0,8*	-0,7*	-0,6*	-0,3	0,1	-0,2	-0,3	-0,1	-0,3	-0,5	-0,3	0,1	0,0	0,1	-0,1	0,1
Mn	0,4	-0,8*	0,9*	-0,9*	-0,9*	-0,9*	-0,1	0,6*	0,5	0,7*	0,6*	0,3	-0,3	0,4	0,5	0,1	0,5	0,8*
Кислоторастворимые формы (1М HCL)																		
Cd	-0,5	-0,1	-0,1	0,2	0,3	0,5	0,5	-0,6*	-0,4	-0,8*	-0,6*	-0,5	-0,1	-0,4	-0,6	0,1	-0,3	-0,5
Pb	0,5	0,1	0,0	-0,1	-0,3	-0,5	-0,1	0,5	0,4	0,5	0,6*	0,5	0,1	0,5	0,3	-0,2	0,4	0,5
Zn	0,7*	0,1	0,1	-0,2	-0,4	-0,6*	-0,1	0,7*	0,7*	0,6*	0,6*	0,6*	0,2	0,3	0,3	-0,5	0,3	0,7*
Cu	0,6*	0,5	-0,5	0,6*	0,5	0,2	-0,2	0,3	0,4	0,2	0,3	0,5	0,4	-0,2	0,1	-0,2	0,1	0,1
Co	0,9*	0,3	-0,2	0,0	-0,2	-0,5	-0,2	0,8*	0,7*	0,7*	0,7*	0,8*	0,2	0,2	0,4	-0,3	0,5	0,7*
Ni	0,6*	-0,3	0,4	-0,5	-0,6*	-0,8*	-0,2	0,7*	0,6*	0,7*	0,6*	0,5	0,1	0,3	0,5	-0,4	0,3	0,8*
Mn	0,9*	0,2	0,0	-0,2	-0,3	-0,7*	-0,4	0,8*	0,7*	0,8*	0,8*	0,8*	0,3	0,2	0,6*	-0,3	0,4	0,8*
Опыт 2																		
Подвижные формы (ААБ pH4,8)																		
Cd	0,5	-0,4	0,5	-0,2	-0,5	0,1	0,3	0,3	0,4	-0,7*	0,5	0,5	0,4	0,0	0,5	0,1	0,2	0,6
Zn	0,8*	-0,9*	0,9*	-0,9*	-0,9*	-0,7*	0,1	0,7*	0,6	-0,3	0,5	0,5	0,6	0,7*	0,1	0,3	0,8*	0,8*
Mn	0,6	-0,6	0,9*	-0,5	-0,9*	-0,6	-0,2	0,7*	0,7*	-0,3	0,7*	0,6	0,6	0,9*	0,3	0,5	0,4	0,7*
Кислоторастворимые формы (1М HCL)																		
Cd	0,5	-0,4	0,4	-0,5	-0,2	-0,4	-0,2	0,4	0,3	-0,7*	0,4	0,3	0,3	0,5	0,6	0,8*	0,5	0,2
Pb	0,6	-0,4	0,7*	-0,4	-0,6	-0,1	0,2	0,9*	0,8*	-0,5	0,8*	0,7*	0,8*	0,8*	0,1	0,7*	0,6	0,6
Zn	0,9*	-0,9*	0,9*	-0,7*	-0,9*	-0,4	-0,1	0,9*	0,9*	-0,7*	0,9*	0,9*	0,9*	0,7*	0,5	0,7*	0,8*	0,9*
Cu	0,5	-0,2	0,1	-0,3	0,0	0,1	0,0	0,5	0,5	-0,5	0,3	0,4	0,6	0,3	-0,2	0,6	0,6	0,2
Co	0,9*	-0,6	0,6	-0,5	-0,5	-0,2	-0,1	0,8*	0,8*	-0,9*	0,9*	0,9*	0,9*	0,5	0,8*	0,7*	0,6	0,8*
Ni	0,9*	-0,9*	0,9*	-0,8*	-0,9*	-0,6	0,0	0,8*	0,8*	-0,6*	0,7*	0,8*	0,7*	0,6	0,4	0,5	0,8*	0,9*
Mn	0,8*	-0,8*	0,8*	-0,5	-0,7*	-0,3	-0,3	0,8*	0,8*	-0,8*	0,9*	0,9*	0,8*	0,7*	0,8*	0,7*	0,5	0,8*

* - существенный ($p<0,05$).

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 марганца по профилю. Отмечено более низкое валовое содержание меди и её доступных форм для растений. Запасы валовой меди в метровом слое в результате длительного сельскохозяйственного использования пашни уменьшились с 480 (луг) до 380 кг/га, подвижной формы (ААБ pH 4,8) с 20 до 10 кг/га, кислоторастворимой формы (1M HCL) 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. Причины изменения содержания тяжелых металлов в почве, механизмы их сорбции и десорбции в почве при разных системах удобрения отличаются и зависят от химического состава удобрений, доз агрохимикатов, изменения физико-химических свойств почвы, количества легкодоступного органического вещества и интенсивности процессов его минерализации, активности микроорганизмов.

Следует отметить, что 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.

Максимальное влияние на накопление тяжёлых металлов в почве наблюдали при длительном внесении нетрадиционного органического удобрения – осадков сточных вод. Длительное внесение 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 марганца.

Показатель суммарного загрязнения почвы тяжелыми металлами при длительном внесении удобрений Z_c варьировал в пределах 1,1-8,8, (в зависимости от формы элемента, слоя почвы, фазы развития растений), что свидетельствует о низком уровне загрязнении почвы и считается допустимым. Максимальные значения Z_c отмечены при длительном внесении ОСВ в чистом виде и по фону NPK.

Длительное применение органических (навоз КРС, ОСВ) и минеральных удобрений не привело к загрязнению почвы тяжелыми металлами – содержание изученных элементов было ниже ПДК. Исключение составило валовое содержание Ni и концентрация подвижных соединений Mn. Превышение ПДК по данным элементам наблюдали, как пахотной, так и целинной почве. Высокое валовое количество Ni в почве может быть обусловлено атмосферным загрязнением почвы, геохимическими особенностями исследуемой почвы. Концентрация подвижных соединений Mn в почве по годам исследований сильно варьировала и в отдельных случаях наблюдали превышение допустимых нормативов, что возможно связано с погодными условиями.

Увеличение содержания тяжёлых металлов в почве при длительном внесении ОСВ привело к их накоплению в растениях. Наибольшее влияние отмечено на первых культурах севооборота (озимая рожь, яровая пшеница), что связано с более высоким уровнем содержания подвижных форм тяжёлых металлов в почве в начале севооборота после внесения ОСВ. Количество Pb в растениях не зависело от увеличения его содержания в почве. Отмечено снижение концентрации свинца в растениях озимой ржи, яровой пшенице и клевере луговом на 15-20 %. Содержание тяжёлых металлов в полученной продукции (зерно, солома, зелёная масса) всех сельскохозяйственных культур в севообороте при регулярном внесении ОСВ находилось в пределах установленных нормативов для продовольственных и кормовых целей.

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». Внесение ОСВ в дозе 40 т/га раз в ротацию севооборота обеспечило положительный баланс по меди (949 г/га или 0,32 мг/кг почвы). Запасы валового содержания меди, её доступных для растений форм в метровом слое почвы приблизились к уровню целинного аналога.

Применение ОСВ по фону NPK увеличивало в почве и соответственно в растительной продукции содержание Cd выше ПДК.

Таким образом, комплексные исследования проведенные в длительных стационарных опытах Пермского НИИСХ, анализ данных полученных за период их проведения (1969-2022 гг.), сравнение с целинным аналогом позволили определить характер, направленность и интенсивность трансформации почвенного плодородия пахотных почв региона. Оценка охватывала количественные и качественные изменения (в слое 0-20 или 0-100 см) ОВ почвы, азотного, фосфатного, калийного режимов, физико-химических свойств, экофизиологических параметров и структуры микробиологических сообществ, содержания тяжелых металлов. Выявлено, что длительное экстенсивное (без удобрений) сельскохозяйственное использование дерново-подзолистой почвы (более 35-50 лет) приводит к уменьшению в слое 0-20 см общего содержания (запасов) органического углерода, азота, фосфора, калия, снижению степени обогащённости органического вещества азотом, отмечаются тенденции ухудшения показателей кислотности почвы, уменьшения суммы поглощённых оснований, содержания обменных соединений кальция. Антропогенное воздействие на почву нарушает сложившееся равновесие между различными соединениями элементов питания в почве, изменения отмечены в метровом

слое почвы. Полученные результаты связаны с выносом NPK из почвы сельскохозяйственными растениями, минерализацией и потерей ОВ, изменением показателей кислотности почвы, механической обработкой, припахиванием нижележащих горизонтов.

Применение удобрений оказывает существенное влияние на трансформацию основных параметров почвенного плодородия. Интенсивность воздействия, изменения во времени (35-50 лет) и по профилю почвы зависят от длительности внесения удобрения, системы, вида, насыщенности (дозы) и соотношения NPK.

Сравнение полученных результатов в пахотных дерново-подзолистых почвах с целинным аналогом показало, что сохранение почвенных ресурсов, как национального достояния страны и уникального стратегического ресурса возможно при использовании органоминеральной системы удобрения с высокой насыщенностью «навоз 10 и 20 т/га в год + NPK эквивалентно навозу» с учетом наличия в севообороте двух полей клевера.

Для сохранения и повышения плодородия дерново-подзолистых тяжелосуглинистых почв возможно использование нетрадиционного органического удобрения - осадков сточных вод (насыщенность 5,7 т /га в год). Применение данного удобрения обеспечивает сохранение основных параметров плодородия почвы, кроме калийного режима. Необходимо дополнительное внесение калийных удобрений. Положительное влияние ОСВ на показатели плодородия почвы существенно возрастает на фоне NPK, однако при этом возможно загрязнение почвы и растениеводческой продукции кадмием.

Сравнение органической, минеральной и органоминеральной систем удобрения показало, что наибольшая окупаемость 1 кг д.в. удобрений 1 кг основной продукции (5,3-5,4 кг з.ед.) получена при внесении NPK эквивалентно 10 т навоза и навоза 5 т/га + NPK эквивалентно навозу ($N_{35}P_{25}K_{50}$ в год). В сравнении с целинным аналогом применение данных

систем удобрения способствует поддержанию только фосфатного режима почвы.

Изучение применения азотных, фосфорных, калийных удобрений, их соотношения и доз показало, что наибольшая окупаемость 1 кг д.в. удобрений 1 кг основной продукции (8,9 кг з.ед.) получена при внесении азотных удобрений в чистом виде N_{90}. Однако при длительном применении азотных удобрений в чистом виде происходит существенное ухудшение параметров почвенного плодородия, и со временем может наступить критический момент, ведущий к необратимым последствиям.

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 $P_{подв}$ в пахотном слое почвы контрольных вариантов практически не изменялось, $K_{подв}$ уменьшилось на 18-42% от исходного уровня. При этом основные потери $K_{подв}$ 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 $C_{орг}$ 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}, P_{90}, K_{90}, $(PK)_{90}$, $(NK)_{90}$, $(NP)_{90}$, $(NPK)_{90}$) 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 $C_{орг}$ 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 $С_{мик}$. 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.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Авдонин, Н.С. Влияние удобрений на свойства дерново-подзолистых почв / Н.С. Авдонин, Н.П. Аренс, Л.Н. Степанова // Почвоведение. - 1960. - № 9. - С. 25 - 34.

2. Авдонин, Н.С. Научные основы применения удобрений / Н.С. Авдонин. - М.: Колос, 1972. - 320 с.

3. Автономова, И.Н. Микробные комплексы и их функционирование при применении органических удобрений на серой лесной почве Верхневолжья / И. Н. Автономова, М. К. Зинченко, И. М. Щукин // Владимирский земледелец. – 2022. – № 4(102). – С. 4-8. – DOI 10.24412/2225-2584-2022-4-4-8. – EDN HKEGTE.

4. Агроклиматические ресурсы Пермской области/Под общей редакцией Е.В. Григорчук. Л.: Гидрометеоиздат, 1979. - 156 с.

5. Агрохимические методы исследования почв. М.: «Наука», 1975. – 656с.

6. Аканова, Н.И. Агроэкологическая и энергетическая эффективность сочетания известкования с минеральными удобрениями / Н.И. Аканова: Автореф. дис....докт. биол. наук.- М., 2001. - 36с.

7. Акманаева, Ю.А. Влияние видов севооборота и системы удобрения на калийный режим дерново-мелкоподзолистой среднесуглинистой почвы / Ю. А. Акманаева // Пермский аграрный вестник. – 2019. – № 4(28). –С. 25-32.

8. Алексеев, Ю. В. Тяжелые металлы в почвах и растениях / Ю. В. Алексеев. – Ленинград : Агропромиздат. Ленинградское отделение, 1987. – 142 с. – EDN SGUQRR.

9. Алексеенко, В.А. Экологическая геохимия / В.А. Алексеенко. - М.: Лотос, 2000. - 627 с.

10. Алехина, Н.Д. Физиология растений / Н.Д. Алехина, Ю.В. Балконин, В.Ф. Гавриленко. – М.: Академия, 2005. – 640 с.

11. Алферов, А.А. Ассоциативный азот, урожай и устойчивость агроэкосистемы / А.А. Алферов. – Москва:Российская академия наук, 2020. – 184 с. – ISBN 978-5-907036-87-1. – DOI 10.25680/VNIIA.2019.21.92.152.

12. Ананьева, Н.Д. Микробиологические аспекты самоочищения и устойчивости почв / Н. Д. Ананьева. – Москва : Наука, 2003. – 223 с. – ISBN 5-02-006451-3. – EDN QKVLFV.

13. Ананьева, Н.Д. Особенности определения углерода микробной биомассы почвы методом субстрат-индуцированного дыхания / Н. Д. Ананьева, Е. А. Сусьян, Е. Г. Гавриленко // Почвоведение. – 2011. – № 11. – С. 1327-1333. – EDN OJGUFP.

14. Ананьева, Н.Д. Углерод микробной биомассы и микробное продуцирование двуокиси углерода дерново-подзолистыми почвами постагрогенных биогеоценозов и коренных ельников Южной тайги (Костромская область) / Н.Д. Ананьева, Е.А. Сусьян, И.М. Рыжова Е.О. Бочарникова, Е.В. Стольникова // Почвоведение. – 2009. – № 9. – С. 1108-1116. – EDN KWIGLR.

15. Андреева, И.В. Динамика накопления и распределения никеля в растениях овса / И.В. Андреева, В.В. Говорина, Б.А. Ягодин, О.Т. Досимова // Агрохимия. -2000.- № 4.- С. 68-71.

16. Андрианов, С.Н. Формирование фосфатного режима дерново-подзолистой почвы в разных системах удобрений / С.Н.Андрианов. – М.: ВНИИА, 2004. – 296 с.

17. Анспок, П.И. О внесении фосфорно-калийных удобрений в запас / П.И. Анспок // Агрохимия. – 1988 - №8. - С. 31-37.

18. Анспок, П.И. Справочник агрохимика Нечерноземной полосы/ П.И. Анспок, Ю.К. Штиканс, Р.Р. Визла; – Л.: Колос, 1981. – 328 с.

19. Аргунова, В.А. Исследование форм и миграции фосфора в подзолистых почвах/ В.А. Аргунова:Автореф. дис. … канд. с.-х.н., 1974.–18с.

20. Арышева, С.П. Изучение миграционной способности Pb в системе почва-растение и его фитотоксичность в почвах разного типа / С. П.

Арышева, В. С. Анисимов, Н. И. Санжарова // Агрохимия. – 2013. – № 1. – С. 85-94. – EDN PLCCRR.

21. Афанасьев, Р.А. Динамика подвижных форм фосфора и калия в почвах длительных опытов / Р.А. Афанасьев, Г.Е. Мёрзлая // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. - 2013. - №3. - С. 30-33.

22. Бадмаев, А.Б. Влияние осадков городских сточных вод на биологическую активность аллювиальной дерновой почвы / А.Б. Бадмаев, С.Г. Дорошкевич // Агрохимия.-2006.- № 1.- С. 62-66.

23. Байбеков, Р.Ф. Агроэкологическое состояние почв при длительном применении удобрений / Р. Ф. Байбеков ; Р.Ф. Байбеков. – Москва : ЦИНАО, 2003. – 185 с. – ISBN 5-9238-0027-6. – EDN QKVMDH.

24. Бакина, Л.Г. Природа почвенной кислотности дерново-подзолистых почв разного гранулометрического состава и ее изменение при известковании / Л.Г. Бакина // Агрохимия. – 2015. – № 5. – С. 3-13.

25. Батура, И.Н. Фосфатно-калийный режим и минералогический состав дерново-подзолистых почв разного уровня окультуренности : специальность 06.01.04 "Агрохимия" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата биологических наук / Батура Инна Николаевна. – Москва, 2006. – 22 с. – EDN NJZWOB.

26. Безносиков, В.А. Эколого-агрохимические основы оптимизации азотного питания растений на подзолистых почвах Европейского Северо-Востока России/ В.А. Безносиков: автореф. дисс. доктора биол. наук.- Пермь. ПСХА, 2000. - 37 с.

27. Беляев, Г.Н. Калийные удобрения из калийных солей Верхнекамского месторождения и их эффективность / Г.Н. Беляев. - Пермь: Перм. кн. изд-во, 2005. - 304 с.

28. Благодатская, Е.В. Активность и биомасса почвенных микроорганизмов в изменяющихся условиях окружающей среды / Е. В. Благодатская, М. В. Семенов, А. В. Якушев. – Москва : Общество с

ограниченной ответственностью Товарищество научных изданий КМК, 2016. – 243 с. – ISBN 978-5-9908165-6-5. – EDN YHSKKF.

29. Благодатская, Е.В. Характеристика состояния микробного сообщества по величине метаболического коэффициента / Е.В. Благодатская, Н.Д. Ананьева, Т. Н. Мякшина // Почвоведение. – 1995. – № 2. – С. 205-210.

30. Блэк, К.А. Растение и почва / К.А. Блэк. - М.: Колос, 1973. – 526 с.

31. Бобрицкая, М.А. Влияние удобрений на содержание различных фракций в дерново-подзолистых и тёмно-серых лесных почвах / М.А. Бобрицкая, Т.А. Бойко // Агрохимия. - 1977. - №4. - С.10-16.

32. Богдевич, И.М Изменение обеспеченности фосфором пахотных и луговых почв Беларуси / И. М. Богдевич, Ю. В. Путятин, И. С. Станилевич, О. Л. Ломонос // Почвоведение и агрохимия. – 2019. – № 2(63). – С. 68-78. – EDN EYIERT.

33. Бойко, А. Н. Влияние длительного применения удобрений на соотношение эколого-трофических групп микроорганизмов различных по типу азотного питания / А.Н. Бойко, М.Л. Сидоренко, Р.В. Тимошинов // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2018. – № 9(167). – С. 40-46. – EDN YPLRBR.

34. Бойко, В.С. Фосфатный режим длительно орошаемой лугово-черноземной почвы в лесостепи Западной Сибири / В.С. Бойко, С.П. Гавар, Е.Н. Морозова, А. Ю. Тимохин // Агрохимия. – 2015. – № 3. – С. 10-16.

35. Бойцова, Л.В. Влияние различных систем удобрений на секвестрацию органического углерода в дерново-глеевой почве / Л.В. Бойцова, С.В. Непримерова, Е.Г. Зинчук // Проблемы агрохимии и экологии. – 2019. – № 4. – С. 15-20. – DOI 10.26178/AE.2019.28.73.003.

36. Борисоник, З.Б. Ячмень яровой / З.Б. Борисоник. - М.: Колос, 1974. – 255 с.

37. Бортник, Т.Ю. Агрохимические основы воспроизводства плодородия дерново-подзолистых почв и повышения продуктивности агроценозов в Вятско-Камской земледельческой провинции : специальность

06.01.04 "Агрохимия" : диссертация на соискание ученой степени доктора сельскохозяйственных наук / Бортник Татьяна Юрьевна. – Москва, 2019. – 370 с. – EDN HHDFKV.

38. Бостубаева, М.Б. Применение иловых осадков сточных вод в качестве органического удобрения для улучшения химического состава и повышения плодородия почвы / М.Б. Бостубаева, А.П. Науанова // 3i: Intellect, Idea, Innovation - интеллект, идея, инновация. – 2022. – № 2. – С. 28-35. – DOI 10.52269/22266070_2022_2_28. – EDN NVPNJS.

39. Будажапов, Л.В. Статистики и кинетика изменения азотного фонда почвы и урожая зерновых культур под воздействием азота медленнодействующего удобрения / Л.В. Будажапов, А.С. Билтуев, А.К. Уланов // Вестник Бурятского государственного университета. Биология, география. – 2018. – № 1. – С. 54-61. – DOI 10.18101/2587-7143-2018-1-54-61. – EDN XRSMQP.

40. Бутенко, М. С. Влияние вермикомпоста на азотный режим агросерой почвы и урожайность зерновых культур / М.С. Бутенко, О.А. Ульянова // Агрохимия. – 2019. – № 1. – С. 11-18. – DOI 10.1134/S0002188119010034. – EDN YVTROP.

41. Варламова, Л. Д. Влияние доз ОСВ на показатели почвы при удобрении зерновых культур / Л. Д. Варламова, В. И. Титова, М. Н. Грибова // Агрохимический вестник. – 2009. – № 4. – С. 19-21. – EDN LLZYKX.

42. 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.

43. 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 // . – 2019. – № 2. – С. 9-13. – DOI 10.26178/AE.2019.28.95.002. – EDN DORPOH.

44. Васильев, А.А. Эколого-геохимическая оценка почвенного покрова Г. Перми: тяжелые металлы и мышьяк / А.А. Васильев, Е.С. Лобанова // Пермский аграрный вестник. – 2015. – № 1(9). – С. 34-49. – EDN TNCFUZ.

45. Виноградов, А. П. Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах / А. П. Виноградов. – Москва : Издательство Академии Наук СССР, 1957. – EDN FNVBLO.

46. Виноградов, Д. В. Применение удобрительных смесей на основе осадков сточных вод и цеолита в агроценозах масличных культур / Д. В. Виноградов, М. П. Макарова, Т. В. Зубкова // Теоретическая и прикладная экология. – 2023. – № 1. – С. 93-100. – DOI 10.25750/1995-4301-2023-1-093-100. – EDN KWVMHJ.

47. Вихрева, В. А. Сортовая устойчивость мягкой яровой пшеницы к токсичному действию ионов водорода / В. А. Вихрева, Т. Б. Лебедева, Т. В. Клейменова // Агрохимия. – 2009. – № 5. – С. 69-74. – EDN KAVJJZ.

48. Водяницкий, Ю. Н. Загрязнение почв тяжелыми металлами / Ю.Н. Водяницкий, Д.В. Ладонин, А.Т. Савичев. - Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова. – Москва : Типография Россельхозакадемии, 2012. – 304 с. – ISBN 978-5-85941-456-7. – EDN OUKMFX.

49. Водяницкий, Ю. Н. Минералогия и геохимия марганца (обзор литературы) / Ю. Н. Водяницкий // Почвоведение. – 2009. – № 10. – С. 1256-1265. – EDN KWISZL.

50. Водяницкий, Ю. Н. Хлорорганические соединения и биогеохимический цикл хлора в почвах (обзор) / Ю. Н. Водяницкий, М. И. Макаров // Почвоведение. – 2017. – № 9. – С. 1065-1073. – DOI 10.7868/S0032180X17090118.

51. Водяницкий, Ю.Н. Учет геохимических особенностей территории и погодных условий при нормировании тяжелых металлов в почвах / Ю. Н. Водяницкий // Агрохимия. – 2014. – № 2. – С. 66-72. – EDN RYBIQD.

52. Водяницкий, Ю.Н. Факторы изменчивости содержания подвижных форм тяжелых металлов в почве / Ю. Н. Водяницкий, А. В. Смагин, А. С. Яковлев // Экологический Вестник Северного Кавказа. – 2016. – Т. 12. – № 1. – С. 27-38. – EDN VKFKEJ.

53. Волкова, В.А. Влияние длительного применения минеральных удобрений и соломы на содержание тяжелых металлов в почве и зерне ячменя / В. А. Волкова, Н. А. Воронкова, В. Д. Дороненко, Н. Ф. Балабанова // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. – 2019. – № 2(22). – С. 152-160. – EDN XILZNZ.

54. Волынкина, О.В. Баланс питательных веществ на посевах сельскохозяйственных культур / О. В. Волынкина // Плодородие. – 2020. – № 4(115). – С. 13-16. – DOI 10.25680/S19948603.2020.115.04. – EDN GZIUNO.

55. Воробьёв, В.А. Агроэкологические аспекты природно-антропогенной трансформации калийного состояния дерново-подзолистых почв Северо-Запада России : специальность 06.01.04 "Агрохимия" : диссертация на соискание ученой степени доктора сельскохозяйственных наук / Воробьев Вячеслав Анатольевич. – Брянск, 2016. – 272 с. – EDN XDRKER.

56. Воробьёва, Р.П. Использование осадков сточных вод / Р.П. Воробьёва, А.С. Давыдов, Л.С. Новикова, Е.А. Пивень, А.В. Шуравилин // Агрохимический вестник.- 2000.- № 6.- С. 36-37.

57. Воробьева, Р.П. Осадки сточных вод удобряют поля / Р.П. Воробьева, А.С. Давыдов, А.П. Кротов // Аграрный журнал.- 2001.- № 6.- С. 30-31.

58. Временный максимально-допустимый уровень (МДУ) некоторых химических элементов и госсипола в кормах для сельскохозяйственных животных и кормовых добавках». М.: Госагропром СССР, ГУ ветеринарии, 1987. - 5 с.

59. Гавриленко, Е.Г. Пространственное варьирование содержания углерода микробной биомассы и микробного дыхания почв Южного

Подмосковья / Е. Г. Гавриленко, Е. А. Сусьян, Н. Д. Ананьева, О. А. Макаров // Почвоведение. – 2011. – № 10. – С. 1231-1245. – EDN OFRKVH.

60. Гаврилова, А.Ю. Урожайность многолетних трав и плодородие дерново-подзолистой почвы при длительном внесении минеральных удобрений / А. Ю. Гаврилова, А. М. Конова // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. – 2021. – № 2(54). – С. 71-77. – DOI 10.18286/1816-4501-2021-2-71-77. – EDN ASMCCC.

61. Гамзиков, Г. П. Влияние биомассы растений на азотный режим серой лесной почвы и продуктивность полевых культур / Г. П. Гамзиков, С. З. Сулейменов // Российская сельскохозяйственная наука. – 2020. – № 4. – С. 32-36. – DOI 10.31857/S2500262720040080. – EDN YBDCAS.

62. Гамзиков, Г.П. Агрохимия азота в агроценозах / Г.П. Гамзиков. – Новосибирск: Рос. акад. с.-х. наук, Сиб. отд-ние. Новосиб. гос. аграр. ун-т, 2013.– 790 с.

63. Гамзиков, Г.П. Азот в земледелии Западной Сибири / Г.П. Гамзиков. – М.: Наука, 1981. – 265 с.

64. Гамзиков, Г.П. Влияние длительного применения удобрений на продуктивность полевых культур и агрохимические свойства дерново-подзолистой почвы (к 70-летию Нарымского стационара) / Г.П. Гамзиков, Ю.Н. Анкудович // Агрохимия. – 2018. – № 1. – С. 17-29. – DOI 10.7868/S0002188118010027. – EDN YLCIWB.

65. Гамзиков, Г.П. Влияние длительного систематического применения удобрений на органическое вещество почв / Г. П. Гамзиков, М. Н. Кулагина // Почвоведение. – 1990. – № 11. – С. 57-67. – EDN XSOIQX.

66. Гамзиков, Г.П. Состояние и перспективы исследований в длительных стационарных опытах с удобрениями в Сибири / Г.П. Гамзиков // Плодородие. – 2016. – № 5(92). – С. 6-9. – EDN WWRVWF.

67. Гапешин, Д.И. Интенсивность микробного дыхания и денитрификации в пахотной дерново-подзолистой почве разной степени

смытости / Д.И. Гапешин, Л.А. Поздняков, В. В. Демидов // Агрохимический вестник. – 2022. – № 2. – С. 53-57. – DOI 10.24412/1029-2551-2022-2-010.

68. Гасанова, Е. С. Изменение элементного состава гуминовых кислот чернозема выщелоченного под влиянием удобрений и мелиоранта на примере культур топинамбура и озимой пшеницы / Е. С. Гасанова, Н. Г. Мязин, К.Е. Стекольников // Агрохимия. – 2018. – № 11. – С. 27-32. – DOI 10.1134/S0002188118110042. – EDN VMAWOU.

69. Гаузе, Г.Ф. Определитель актиномицетов. Роды *Streptomyces, Streptoverticillium, Chainia* / Г.Ф. Гаузе, Т.П. Преображенская, М.А. Свешникова, Л.П. Терехова, Т.С. Максимова. - М.: Наука. 1983. 248 с.

70. Гинзбург, К.Е. Фосфор основных типов почв СССР / К.Е. Гинзбург. - М.: Наука,1981.–244с.

71. Гладких, Д. П. Влияние ОСВ на питательный режим дерново-подзолистой почвы и урожайность / Д. П. Гладких // Агрохимический вестник. – 2009. – № 1. – С. 38-40. – EDN LLVBIR.

72. Гладкова, К.Ф. Действие длительного внесения удобрений на накопление в дерново-подзолистой почве запасов усвояемых фосфора и калия / К.Ф. Гладкова // Фосфорные удобрения и питание растений. – М.: Изд-во с. х. лит-ры, журналов и плакатов, 1963. – С. 75-88.

73. Глазовская, М. А. Общие закономерности накопления и возобновления запасов элементов-органогенов в дерново-подзолистых почвах хвойно-широколиственных лесов / М. А. Глазовская, П. П. Кречетов, О.В. Черницова // Почвоведение. – 2004. – № 12. – С. 1430-1439.

74. Голдырева, Т.П. Эндемический зоб в Пермском регионе: патогенез, морфология, клинические особенности, терапия : специальность 14.01.02 "Эндокринология" : диссертация на соискание ученой степени доктора медицинских наук / Голдырева Татьяна Петровна. – Санкт-Петербург, 2005. – 236 с. – EDN NQCEVN.

75. Гомонова, Н. Ф. Динамика гумусного состояния и азотного режима дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы при длительном применении

удобрений / Н. Ф. Гомонова, В. Г. Минеев // Агрохимия. – 2012. – № 6. – С. 23-31. – EDN PBAKSP.

76. Гомонова, Н. Ф. Эколого-агрохимические функции удобрений при их длительном применении (50 лет) в агроценозе на дерново-подзолистой почве : специальность 06.01.04 "Агрохимия" : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора биологических наук / Гомонова Нина Федоровна. – Москва, 2010. – 48 с. – EDN QHAYXT.

77. Гомонова, Н.Ф. Результаты длительного применения различных видов и сочетаний удобрений на дерново-подзолистых почвах / Н. Ф. Гомонова, И. Н. Скворцова, Г. М. Зенова // Почвоведение. – 2007. – № 4. – С. 498-504. – EDN IAQVZJ.

78. Госсе, Д. Д. Влияние удобрений на динамику содержания тяжелых металлов в системе почва-растение на дерново-подзолистых почвах : специальность 06.01.04 "Агрохимия" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата биологических наук / Госсе Дмитрий Дмитриевич. – Москва, 2008. – 29 с. – EDN NKMVYJ.

79. Гулякин, И.В. Влияние удобрений на фосфатный режим дерново-подзолистой почвы / И.В. Гулякин, Ю.К. Чуприков // Агрохимия. - 1973. - №8. - С. 15–23.

80. Дабахов, М.В. Тяжелые металлы: экотоксикология и проблемы нормирования / М. В. Дабахов, Е. В. Дабахова, В. И. Титова ; М. В. Дабахов, Е. В. Дабахова, В. И. Титова. – Н. Новгород : Нижегор. ГСХА, 2005. – 164 с. – ISBN 5-85152-446-4. – EDN QLKJXZ.

81. Денисов, Е.П. Эффективность почвенной реутилизации осадков городских сточных вод / Е.П. Денисов, И.П. Бурлака, Д.В. Сураев, Н.П. Скачков // Экология и промышленность России. - 2007. - № 2. - С. 12-14.

82. Дербенева, Л. В. Фосфатный и калийный режим дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы при длительном применении удобрений в Предуралье : специальность 06.01.04 "Агрохимия" : автореферат

диссертации на соискание ученой степени кандидата сельскохозяйственных наук / Дербенева Людмила Васильевна. – Москва, 1994. – 19 с.

83. Дзюин, А.Г. Изменения запасов минерального азота в дерново-подзолистой суглинистой почве / А. Г. Дзюин // Агрохимический вестник. – 2019. – № 6. – С. 30-33. – DOI 10.24411/0235-2516-2019-10086.

84. Дзюин, А.Г. Исследование плодородия почвы и продуктивности восьмипольного севооборота в многолетнем опыте / А.Г. Дзюин, Г. П. Дзюин // Агрохимия. – 2018. – № 2. – С. 22-33. – DOI 10.7868/S0002188118020023. – EDN VZSAQX.

85. Дзюин, А.Г. Фосфатный режим дерново-подзолистых почв Северо-Восточной зоны Нечерноземья / А.Г. Дзюин. – Ижевск : Ижевская государственная сельскохозяйственная академия, 2020. – 207 с. – ISBN 978-5-6043914-2-6.

86. Дзюин, Г.П. Биологизация земледелия в Северо-Восточной зоне Нечерноземья / Г. П. Дзюин, А. Г. Дзюин. – Ижевск : Удмуртский научно-исследовательский институт сельского хозяйства, 2014. – 202 с.

87. Дзюин, Г.П. Коэффициенты использования азота, фосфора и калия из минеральных удобрений, навоза и почвы культурами севооборота / Г. П. Дзюин, А.Г. Дзюин // Международный журнал экспериментального образования. – 2016. – № 5-1. – С. 83-90. – EDN VTQVQV.

88. Дмитриев, Н.Н. Систематическое применение удобрений как фактор стабилизации плодородия серых лесных почв и продуктивности зерновых культур в зернопаровом севообороте / Н. Н. Дмитриев, Г. П. Гамзиков // Агрохимия. – 2015. – № 2. – С. 3-12. – EDN TNUGYR.

89. Добровольская, Т.Г. Роль микроорганизмов в экологических функциях почв / Т. Г. Добровольская, Д. Г. Звягинцев, И. Ю. Чернов [и др.] // Почвоведение. – 2015. – № 9. – С. 1087. – DOI 10.7868/S0032180X15090038. – EDN UDEUQV.

90. Добровольский, Г.В. Почвы в биосфере и жизни человека / Г. В. Добровольский, Г. С. Куст, И. Ю. Чернов [и др.]. – Москва : Московский государственный университет леса, 2012. – 584 с. – ISBN 978-5-8135-0575-1.

91. Доклад продовольственной и сельскохозяйственной организаций Объединенных Наций «Состояние знаний о биоразнообразии почв» [Электронный ресурс]. – https://www.fao. org/biotech/biotech-news/ru/ (дата обращения 12.12.2021)

92. Донских, И.Н. Влияние высоких доз органических удобрений на фракционный состав фосфатов в дерново-подзолистых почвах / И.Н. Донских, Л.А. Копылова // Агрохимия. - 1982. - № 4. - С. 55-63.

93. Доспехов, Б.А. Методика полевого опыта / Б.А. Доспехов. - М.: Колос, 1985. - 352с.

94. Дубовик, Д.В. Влияние минеральных удобрений на содержание тяжелых металлов в почве на склонах / Д. В. Дубовик, Е. В. Дубовик // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. – 2016. – № 4. – С. 60-62. – EDN WLAQUP.

95. Дуйшембиев, Н.Д. Коэффициенты использования элементов питания растениями в севообороте, при длительном применении удобрений / Н. Д. Дуйшембиев, М.А. Ахматбеков, К. Б. Мамбетов [и др.] // Вестник Кыргызского национального аграрного университета им. К.И. Скрябина. – 2018. – № 2(47). – С. 51-58. – EDN UOSXJJ.

96. Дьяков, В.П. Изменение свойств дерново-подзолистых почв тяжелого механического состава Среднего Предуралья при окультуривании : специальность 03.02.13 "Почвоведение" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата сельскохозяйственных наук / Дьяков Валерий Павлович. – г. Пермь, 1971. – 25 с. – EDN UYTNXX.

97. Дьяконова, К.В. Оценка почв по содержанию и качеству гумуса для производственных моделей почвенного плодородия / К.В. Дьяконова, Н.А. Титова, Б.М. Когут, Н.Х. Исмагилова. - М.: Агропромиздат, 1990. - 27 с.

98. Егоров, В.Е. Влияние обработки и удобрений на содержание органического вещества и азота в среднесуглинистой дерново-подзолистой почве в условиях севооборота / В.Е. Егоров, А.М. Лыков, В.Ф. Ульянов // Известия ТСХА. - 1972. - № 2. - С.20-27.

99. Егоров, В.С. Последействие разных систем удобрения на процессы несимбиотической азотфиксации и денитрификации на дерново-подзолистой почве / В. С. Егоров // Проблемы агрохимии и экологии. – 2008. – № 1. – С. 13-16. – EDN JXDAQD.

100. Елькина, Г.Я. Поведение свинца в системе почва-растение в условиях европейского Северо-Востока / Г. Я. Елькина // Агрохимия. – 2015. – № 8. – С. 73-80. – EDN UCWHZX.

101. Еремченко, О.З. Почвы и техногенные поверхностные образования урбанизированных территорий Пермского Прикамья / О. З. Еремченко, И. Е. Шестаков, Н. В. Москвина. – Пермь : Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2016. – 252 с. – ISBN 978-5-7944-2753-0. – EDN ALOFZZ.

102. Ерофеева, Т.В. Влияние осадка сточных вод на биологическую активность почв в посевах сельскохозяйственных культур / Т. В. Ерофеева, Л. А. Антипкина // Теория и практика адаптивной селекции растений : Материалы Национальной научно-практической конференции, с. Июльское, 20 июля 2022 года. – Ижевск: Ижевская государственная сельскохозяйственная академия, 2022. – С. 130-133. – EDN IXNTDF.

103. Ефимова, Л.А. Экологические аспекты применения удобрений на черноземе типичном юго-западной части Центрально-Черноземного региона / Л. А. Ефимова, Т. С. Морозова, С. Д. Лицуков // . – 2017. – № 1(13). – С. 81-88. – EDN YULSGP.

104. Ефремова, Т.В. Агроэкологическое обоснование использования осадка сточных вод в качестве биоорганического удобрения при возделывании сельскохозяйственных культур / Т. В. Ерофеева, М. М.

Крючков, Т. А. Масина, Д. В. Виноградов // АгроЭкоИнфо. – 2021. – № 3(45). – DOI 10.51419/20213327. – EDN RCHDJS.

105. Жукова, Л.А. Еще раз о применении ОСВ / Л.А. Жукова, А.Ф. Пехлецкая, А.Ф. Сулима, Г.А. Русаков, З.Д. Ихласова // Химизация сельского хозяйства. - 1992.- № 1.- С. 10-14.

106. Жукова, Л.М. Изменение свойств основных типов почв и превращение в них калия при длительном применении удобрений / Л.М. Жукова // Агрохимия. – 1967. – № 7. – С. 13–18.

107. Завалин, А.А. Азотное питание и продуктивность сортов яровой пшеницы /А.А. Завалин. – М.: Агроконсалт, 2003. – 152 с.

108. Завалин, А.А. Современное состояние проблемы азота в мировом земледелии / А.А. Завалин, Г. Г. Благовещенская, Н. Я. Шмырева [и др.] // Агрохимия. – 2015. – № 5. – С. 83-95. – EDN TSNBQR.

109. Завалин, А.А. Циклы, баланс азота и устойчивость агроэкосистемы при применении органических удобрений (эксперименты с 15N) / А. А. Завалин, О. А. Соколов, Н. Я. Шмырева [и др.] // Почвоведение. – 2022. – № 1. – С. 68-76. – DOI 10.31857/S0032180X22010130.

110. Завалин, А.А. Экология азотфиксации / А.А. Завалин, О.А. Соколов, Н.Я. Шмырева. – М.: Изд-во РАН, 2019. – 252 с.

111. Заварзин, Г.А. Введение в природоведческую микробиологию / Г.А. Заварзин, Н.Н. Колотилова. - М.: Книжный дом “Университет”. 2001. - 256 с.

112. Заварзин, Г.А. Почва как главный источник углекислоты и резервуар органического углерода на территории России / Г.А. Заварзин, В.Н. Кудеяров // Вестник Российской академии наук. – 2006. – Т. 76. – № 1. – С. 14-24. – EDN HSYMIZ.

113. Заварзина, А.Г. Гуминовые вещества – гипотезы и реальность (обзор) / А. Г. Заварзина, Н. Н. Данченко, В. В. Демин [и др.] // Почвоведение. – 2021. – № 12. – С. 1449-1480. – DOI 10.31857/S0032180X21120169.

114. Заварзина, А.Г. Сравнение свойств препаратов гуминовых кислот, выделенных из почв щелочной экстракцией в присутствии и отсутствии кислорода / А. Г. Заварзина, Е. Г. Кравченко, А. И. Константинов [и др.] // Почвоведение. – 2019. – № 8. – С. 910-922. – DOI 10.1134/S0032180X19080161.

115. Завьялова, Н. Е. Влияние возрастающих доз полного минерального удобрения на органическое вещество и азотный режим дерново-подзолистой почвы Предуралья / Н. Е. Завьялова, А. И. Косолапова, А. Н. Сторожева // Агрохимия. – 2014. – № 6. – С. 20-28. – EDN SHANMJ.

116. Завьялова, Н. Е. Влияние минеральных удобрений на урожайность и качество сельскохозяйственных культур в длительном стационарном опыте в климатических условиях Предуралья / Н. Е. Завьялова, Д. Г. Шишков // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. – 2020. – № 5. – С. 5-17. – DOI 10.26897/0021-342X-2020-5-5-17. – EDN FLTQEI.

117. Завьялова, Н. Е. Гумусное состояние дерново-подзолистых почв Предуралья при различном землепользовании и длительном применении удобрений и извести : специальность 06.01.04 "Агрохимия" : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора биологических наук / Завьялова Нина Егоровна. – Москва, 2007. – 44 с.

118. Завьялова, Н. Е. Углеродпротекторная емкость дерново-подзолистой почвы естественных и агроэкосистем Предуралья / Н. Е. Завьялова // Почвоведение. – 2022. – № 8. – С. 1046-1055. – DOI 10.31857/S0032180X22080160. – EDN AOKTSG.

119. Завьялова, Н.Е. Влияние различных типов землепользования на прокариотные сообщества и стабилизацию органического вещества дерново-подзолистой почвы / Н. Е. Завьялова, И. Г. Широких, М. Т. Васбиева, Д. С. Фомин // Почвоведение. – 2021. – № 2. – С. 232-239. – DOI 10.31857/S0032180X21020167.

120. Завьялова, Н.Е. Влияние севооборотов и бессменных посевов на агрохимические свойства и азотный режим дерново-подзолистой почвы Предуралья / Н. Е. Завьялова, Д. С. Фомин, И. С. Тетерлев // Агрохимия. – 2019. – № 1. – С. 5-10. – DOI 10.1134/S0002188119010162. – EDN YVTROH.

121. Завьялова, Н.Е. Гумусное состояние и азотный фонд дерново-подзолистой почвы Предуралья в условиях интенсивного землепользования / Н.Е. Завьялова, А. И. Косолапова, И. Д. Соснина // Агрохимия. – 2004. – № 9. – С. 21-25.

122. Завьялова, Н.Е. Органическое вещество дерново-подзолистых почв Предуралья / Н. Е. Завьялова. – Пермь : Издательство "От и До", 2014. – 328 с. – ISBN 978-5-4367-0143-1. – EDN UINIUZ.

123. Замятин, С.А. Влияние культур севооборота на среднегодовое поступление растительных остатков за ротацию севооборотов / С.А. Замятин, В.М. Изместьев // Вестник Марийского государственного университета. Серия: Сельскохозяйственные науки. Экономические науки. – 2016. – Т. 2. – № 1(5). – С. 18-22.

124. Заришняк, А.С. Фосфатный режим чернозема оподзоленного при длительном применении удобрений / А. С. Заришняк, В. В. Иванина, Т. В. Колибабчук // Агрохимия. – 2014. – № 4. – С. 20-26. – EDN SEEJEP.

125. Захаров, В.Н. Влияние длительного применения бесподстилочного навоза на загрязнение почвы и грунтовых вод нитратами / В.Н. Захаров // Почвоведение. – 1993. - № 12. – С. 123-125.

126. Захаров, Н.Г. Последействие осадков сточных вод на урожайность культур и продуктивность зернотравяного севооборота в зависимости от систем основной обработки почвы / Н.Г. Захаров // Состояние и перспективы агрохимических исследований в Географической сети опытов с удобрениями. Сборник международной научно-методической конференции участников Геосети России и стран СНГ (10-11 июня 2010 г.). - М.: ВНИИА, 2010.- С. 195-197.

127. Звягинцев, Д.Г. Биология почв. Учебник / Д.Г. Звягинцев, И. П. Бабьева, Г. М. Зенова. – Москва : Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, 2005. – 445 с. – ISBN 5-211-04983-7. – EDN RBBHHL.

128. Звягинцев, Д.Г. Строение и функционирование комплекса почвенных микроорганизмов // Структурно-функциональная роль почв и почвенной биоты в биосфере / Г. В. Добровольский, И. П. Бабьева, Л. Г. Богатырев [и др.] ; Российская академия наук, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова. Институт почвоведения. – Москва : Академический научно-издательский, производственно-полиграфический и книгораспространительский центр Российской академии наук "Издательство "Наука", 2003. – С. 102–114. – ISBN 5-02-002832-0. – EDN QKVTHL.

129. Звягинцев, Д.Г. Экология актиномицетов / Д.Г. Звягинцев, Г.М. Зенова. - М: ГЕОС, 2001. - 257с.

130. Зезин, Н.Н. Баланс гумуса в полевых севооборотах / Н.Н. Зезин, П.А. Постников, М. А. Намятов // Пермский аграрный вестник. – 2019. – № 2(26). – С. 57-64. – EDN DWCCHI.

131. Зинченко, М. К. Мониторинг численности бактериальной микрофлоры в агроэкосистемах серой лесной почвы / М. К. Зинченко // Достижения науки и техники АПК. – 2019. – Т. 33. – № 12. – С. 10-14. – DOI 10.24411/0235-2451-2019-11202. – EDN ETZATZ.

132. Зинченко, М.К. Влияние систем удобрений на структуру и изменение отдельных физиологических групп микроорганизмов в серой лесной почве Владимирского ополья / М. К. Зинченко, Т. С. Бибик, Л. Г. Стоянова // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 12-3. – С. 552-557. – EDN TCXCQR.

133. Зинченко, М.К. Система биологических показателей при оценке экологического состояния серой лесной почвы на примере стационарного опыта / М. К. Зинченко // Владимирский земледелец. – 2022. – № 1(99). – С. 9-15. – DOI 10.24412/2225-2584-2022-1-9-15. – EDN TZELGB.

134. Золкина, Е. И. Влияние длительного применения удобрений на плодородие дерново-подзолистой почвы и продуктивность культур / Е.И. Золкина // Плодородие. – 2019. – № 5(110). – С. 20-23. – DOI 10.25680/S19948603.2019.110.06. – EDN YMSACD.

135. Иванов, А. И. Почвенно-агрохимическое обоснование системы удобрения на хорошо окультуренных дерново-подзолистых почвах Северо-Запада России : специальность 06.01.04 "Агрохимия" : диссертация на соискание ученой степени доктора сельскохозяйственных наук / Иванов Алексей Иванович. – Санкт-Петербург, 2000. – 295 с. – EDN QDLFDV.

136. Иванов, А.И. Агроэкологические последствия длительного применения дефицитных систем удобрения на хорошо окультуренных дерново-подзолистых почвах / А. И. Иванов, Ж. А. Иванова, В. А. Воробьев, Н. А. Цыганова // Агрохимия. – 2016. – № 4. – С. 10-17. – EDN VXJAOR.

137. Иванов, А.И. Современные деградационные процессы в хорошо окультуренных дерново-подзолистых почвах / А. И. Иванов, В. А. Воробьев, Ж. А. Иванова // Проблемы агрохимии и экологии. – 2015. – № 3. – С. 15-19.

138. Иванов, А.Л. Развитие учения о гумусе и почвенном органическом веществе: от Тюрина и Ваксмана до наших дней / А. Л. Иванов, Б. М. Когут, В. М. Семенов [и др.] // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. – 2017. – № 90. – С. 3-38. – DOI 10.19047/0136-1694-2017-90-3-38. – EDN ZTBWRZ.

139. Иванов, И.А. О возможности использования осадка городских сточных вод в качестве органического удобрения / И.А. Иванов, В.Ф. Иванова, Е.И. Кравчук, Т.И. Качнова, Д.Л. Лебедев // Агрохимия.- 1996.- № 3.- С. 25-31.

140. Ильин, В. Б. Тяжелые металлы и неметаллы в системе почва-растение : монография / В. Б. Ильин ; отв. ред. А. И. Сысо ; Российская акад. наук, Сибирское отд-ние, Ин-т почвоведения и агрохимии. – Новосибирск : Изд-во Сибирского отд-ния Российской акад. наук, 2012. – ISBN 978-5-7692-1229-1. – EDN QLDFYP.

141. Ильинский, А.В. Исследование транслокации тяжелых металлов в растениях овса при использовании минеральных удобрений / А. В. Ильинский // Евразийский союз ученых. – 2020. – № 1-3(70). – С. 34-36. – DOI 10.31618/ESU.2413-9335.2020.3.70.546. – EDN IUGMDF.

142. Ильющенков, В.В. Азотное, фосфатное и калийное состояние хорошо окультуренных дерново-подзолистых почв Северо-Запада России и его изменение при длительном использовании минеральных систем удобрения : специальность 06.01.04 "Агрохимия" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата сельскохозяйственных наук / Ильющенков Виктор Валентинович. – Великие Луки, 2000. – 20 с. – EDN ZKNVLJ.

143. Кайгородов А.Т. 50 лет агрохимической службе Пермского края/ А.Т. Кайгородов // Пермь, 2014. - 52 с.

144. Кайгородов, А. Т. Современное состояние почвенного плодородия пахотных земель Пермского края / А. Т. Кайгородов, Н. И. Пискунова // Достижения науки и техники АПК. – 2017. – Т. 31, № 4. – С. 22-26. – EDN YOSHTR.

145. Калинин, А.И. Агроэкологические свойства дерново-подзолистых почв и продуктивность растений / А.И. Калинин. - Киров, 2004. – 220 с.

146. Карпинский, Н.П. Фосфатный уровень почвы / Н.П. Карпинский, В.Б. Замятина // Почвоведение. - 1958. - № 11. - С. 27-39.

147. Карпова, А. Ю. Сорбционная способность дерново-подзолистой почвы по отношению к ионам никеля / А. Ю. Карпова, М. А. Шумилова // Химическая физика и мезоскопия. – 2019. – Т. 21, № 2. – С. 262-266. – DOI 10.15350/17270529.2019.2.28. – EDN FCCYXS.

148. Карпова, Е.А. Длительное применение удобрений и тяжелые металлы в агроэкосистемах / Е. А. Карпова // Проблемы агрохимии и экологии. – 2008. – № 2. – С. 19-22. – EDN JXDAVD.

149. Карпухин, А. И. Влияние применения удобрений на содержание тяжелых металлов в почвах длительных полевых опытов / А. И. Карпухин, Н. Н. Бушуев // Агрохимия. – 2007. – № 5. – С. 76-84. – EDN IARDEH.

150. Карпухин, М. Ю. Анализ современного состояния агроландшафтов и пути повышения их секвестрационного потенциала при сельскохозяйственном использовании на среднем Урале / М. Ю. Карпухин, Ю. Л. Байкин, Э. Р. Батыршина // Вестник Курганской ГСХА. – 2021. – № 4(40). – С. 3-8. – DOI 10.52463/22274227_2021_40_3.

151. Касатиков, В. А. Агроэкологическая оценка применения осадка городских сточных вод в длительном полевом опыте / В. А. Касатиков, Н. П. Шабардина, В. А. Раскатов // Плодородие. – 2018. – № 5(104). – С. 46-49. – EDN YLGLGH.

152. Касатиков, В. А. Влияние агрохимиката на основе осадка городских сточных вод на агрохимические свойства дерново-подзолистой почвы и урожайность райграса однолетнего / В. А. Касатиков, Н. П. Шабардина // Владимирский земледелец. – 2020. – № 2(92). – С. 10-13. – DOI 10.24411/2225-2584-2020-10112. – EDN NWHAJS.

153. Касатиков, В. А. Влияние мелиоративных доз осадка городских сточных вод на азотный режим дерново-подзолистой почвыи продуктивность зерновых культур / В. А. Касатиков // Агрохимия. – 2020. – № 6. – С. 64-68. – DOI 10.31857/S0002188120060058. – EDN UKNWSS.

154. Кауричев, И.С. Водорастворимые органо-минеральные соединения почв таежно-лесной зоны / И.С. Кауричев, А.Д. Фокин, А.И. Карпухин // Докл. ТСХА. Агро-химия и почвоведение. – 1978. – Вып. 243. – С. 35-42.

155. Кидин, В. В. Использование растениями и особенности трансформации аммонийного и нитратного азота разных горизонтов дерново-подзолистой почвы / В. В. Кидин, Е. Н. Ильюк // Агрохимия. – 2006. – № 11. – С. 1-10. – EDN HVSLDJ.

156. Кидин, В. В. Потребление азота, фосфора, калия и микроэлементов растениями кукурузы из разных слоев дерново-подзолистой почвы / В. В. Кидин, Т. В. Украинская // Агрохимия. – 2016. – № 6. – С. 9-15.

157. Кидин, В.В. Агрохимия / В.В. Кидин, С.П. Торшин. - М.: Изд-во «Проспект», 2015. – 619 с.

158. Кижапкин, П.П. Методы мелиорации почв, загрязнённых кадмием / П.П. Кижапкин, А.Р. Валитова, Т.Н. Болышева, Л.А. Лебедева // Плодородие.- 2006.- № 1.-С. 36-37.

159. Кириллова, Г. Б. Изменение фосфатного режима дерново-подзолистой суглинистой почвы при сельскохозяйственном использовании / Г. Б. Кириллова, Ю. П. Жуков // Агрохимия. – 2004. – № 9. – С. 26-31. – EDN ONUDDB.

160. Клечковский, В.М. Об усвоении растениями поглощенных почвой фосфатов /В.М. Клечковский // Доклады ТСХА. 1945. №11. С. 11-14.

161. Климова, Н. В. Осадки сточных вод как нетрадиционные органические удобрения / Н. В. Климова, Т. В. Починова // Аграрная наука. – 2009. – № 1. – С. 13-16. – EDN JJVKNX.

162. Ковалевская, Н.П. Биологическая активность дерново-подзолистой почвы в длительном опыте с различными агротехническими приемами / Н. П. Ковалевская, Н. Е. Завьялова, Д. Ю. Шаравин, Д. С. Фомин // Российская сельскохозяйственная наука. – 2019. – № 3. – С. 38-41. – DOI 10.31857/S2500-26272019338-41. – EDN AGNOZY.

163. Когут, Б. М. Оценка насыщенности почвы органическим углеродом / Б. М. Когут, В. М. Семенов // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. – 2020. – № 102. – С. 103-124. – DOI 10.19047/0136-1694-2020-102-103-124. – EDN URHRGP.

164. Когут, Б. М. Эволюция доминирующих парадигм в учении о гумусе и почвенном органическом веществе / Б. М. Когут, В. М. Семенов // Агрохимия. – 2015. – № 12. – С. 3-19. – EDN VQCDQB.

165. Когут, Б.М. Дегумусирование и почвенная секвестрация углерода / Б. М. Когут, В. М. Семенов, З. С. Артемьева, Н. Н. Данченко // Агрохимия. – 2021. – № 5. – С. 3-13. – DOI 10.31857/S0002188121050070. – EDN SQOUYM.

166. Кожокина, А. Н. Влияние известкования на поглощение калия и кальция почвой и растениями / А. Н. Кожокина, Н. Г. Мязин // Инновационные решения молодых ученых в аграрной науке : Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Воронеж, 26 декабря 2018 года. – Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2019. – С. 105-112. – EDN MAQMQJ.

167. Козлова, Л.М. Оптимизация полевых севооборотов, как фактор сохранения почвенного плодородия и экологизации земледелия / Л. М. Козлова, Е. Н. Носкова, Ф. А. Попов // Теоретическая и прикладная экология. – 2020. – № 3. – С. 147-153. – DOI 10.25750/1995-4301-2020-3-147-153.

168. Козлова, Н. В. Дыхательная активность агрогенно-изменённых почв чайных плантаций в постэксплуатационный период / Н. В. Козлова, В. В. Керимзаде // Субтропическое и декоративное садоводство. – 2019. – № 69. – С. 192-200. – DOI 10.31360/2225-3068-2019-69-192-200. – EDN DDIHMN.

169. Конарбаева, Г. А. Влияние минеральных удобрений на содержание галогенов в объектах окружающей среды / Г. А. Конарбаева, В. Н. Якименко // Химия в интересах устойчивого развития. – 2015. – Т. 23. – № 4. – С. 347-353. – DOI 10.15372/KhUR20150403.

170. Конарбаева, Г. А. Изменение содержания тяжелых металлов в агроценозе при различной интенсивности применения минеральных удобрений / Г. А. Конарбаева, В. Н. Якименко // Достижения науки и техники АПК. – 2017. – Т. 31, № 10. – С. 44-48. – EDN YMEMEQ.

171. Кореньков, Д.А. Агрохимия азотных удобрений / Д.А. Кореньков. – М.: Наука, 1976. – 224 с.

172. Кореньков, Д.А. Агроэкологические аспекты применения азотных удобрений / Д.А. Кореньков. – М.: Агроконсалт, 1999. – 296 с.

173. Кореньков, Д.А. Использование растениями азота удобрений на различную глубину / Д.А. Кореньков, Е.В. Руделёв, А.В. Кузнецов // Почвоведение. – 1986. - № 2. – С. 63-68.

174. Кореньков, Д.А. О распределении минерального азота почвы и удобрений в системе почва - растения / Д.А. Кореньков, Е.В. Руделёв // Почвоведение. – 1988. - № 3. – С. 107-113.

175. Коротаев, Н.Я. Почвы Пермской области / Н.Я. Коротаев. - Пермь: кн. изд-во, 1962. - 278 с.

176. Корчагина, Ю.И. Азотный режим почв Нечернозёмья / Ю.И. Корчагина, С.А. Шафран // Химизация сельского хозяйства. – 1988. - № 4. – С. 28-30.

177. Косолапова, А.И. Влияние изменения климатических показателей в Пермском крае на урожайность зерновых культур / А. И. Косолапова, М. Т. Васбиева // Достижения науки и техники АПК. – 2011. – № 11. – С. 9-11. – EDN OJMTPF.

178. Косолапова, А.И. Эффективность длительного применения удобрений на дерново-подзолистых почвах Предуралья / А. И. Косолапова, Н. Е. Завьялова, Е. М. Митрофанова [и др.] // Агрохимия. – 2018. – № 2. – С. 42-55. – DOI 10.7868/S0002188118020047. – EDN YTEATS.

179. Красницкий, В.М. Динамика подвижного фосфора в почвах лесостепи Западной Сибири / В. М. Красницкий, А. Г. Шмидт, О. А. Матвейчик, И. А. Бобренко // Плодородие. – 2020. – № 2(113). – С. 57-60. – DOI 10.25680/S19948603.2020.113.17. – EDN EFTCXW.

180. Кудеяров, В. Н. Баланс азота, фосфора и калия в земледелии России / В. Н. Кудеяров // Агрохимия. – 2018. – № 10. – С. 3-11. – DOI 10.1134/S0002188118100101.

181. Кудеяров, В. Н. Современное состояние углеродного баланса и предельная способность почв к поглощению углерода на территории России / В. Н. Кудеяров // Почвоведение. – 2015. – № 9. – С. 1049. – DOI 10.7868/S0032180X15090087. – EDN UDEUPR.

182. Кудеяров, В.Н. Цикл азота в почве и эффективность удобрений / В.Н. Кудеяров. – М.: Наука, 1989. –216 с.

183. Кудеярова А.Ю. Фосфатогенная трансформация почв. М.:Наука,1995.-288 с.

184. Кудеярова, А. Ю. Изменения в системе химических связей гиббсита под воздействием растворов NH4H2PO4 разной концентрации / А. Ю. Кудеярова // Почвоведение. – 2016. – № 5. – С. 564-573. – DOI 10.7868/S0032180X16050105. – EDN VYLQGL.

185. Кудеярова, А. Ю. Трансформация соединений Al и Fe при зафосфачивании кислых почв как фактор, определяющий миграцию фосфора / А. Ю. Кудеярова, Т. В. Алексеева // Агрохимия. – 2012. – № 2. – С. 25-36. – EDN OWXOFL.

186. Кудреватых, И.Ю. Химические и микробиологические свойства дерново-подзолистой почвы в лесах Вологодской и Костромской областей / И. Ю. Кудреватых, Н. Д. Ананьева, С. В. Сушко, Е. А. Иванищева // Лесоведение. – 2021. – № 1. – С. 93-106. – DOI 10.31857/S002411482101006X. – EDN RLCJNB.

187. Кузьменко, Н. Н. Влияние насыщенности севооборота органическими и минеральными удобрениями на плодородие, урожайность и качество льнопродукции / Н. Н. Кузьменко // Плодородие. – 2022. – № 1(124). – С. 29-32. – DOI 10.25680/S19948603.2022.124.08. – EDN MDDSDH.

188. Кузьменко, Н. Н. Изменение показателей плодородия дерново-подзолистой почвы при использовании агротехнологий различной интенсивности в льняном севообороте / Н. Н. Кузьменко // Агрохимия. – 2018. – № 9. – С. 14-19. – DOI 10.1134/S0002188118090077. – EDN UWYVHK.

189. Кузьменко, Н. Н. Мониторинг гумуса дерново-подзолистой почвы при применении разных систем удобрений / Н. Н. Кузьменко // Успехи современной науки. – 2017. – Т. 2. – № 9. – С. 181-184. – EDN ZELBZD.

190. Кулаковская, Т.Н. Почвенно-агрохимические основы получения высоких урожаев / Т.Н. Кулаковская. - Мн.: Ураджай, 1978.- 272 с.

191. Куликова, А. Х. Влияние удобрений на содержание и баланс гумуса в черноземе выщелоченном при возделывании культур в зернопаровом севообороте / А. Х. Куликова, С. Н. Никитин, Г. В. Сайдяшева // Агрохимия. – 2017. – № 12. – С. 7-15. – DOI 10.7868/S000218811712002X. – EDN ZUCFTD.

192. Куликова, А. Х. Дифференциация севооборотов по влиянию на режим органического вещества почвы / А. Х. Куликова // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. – 2011. – № 2(14). – С. 27-33.

193. Курбаков, Д. Н. Влияние длительного применения минеральных удобрений на поступление тяжелых металлов в урожай сельскохозяйственных культур / Д. Н. Курбаков, В. К. Кузнецов, А. В. Панов // Плодородие почв России: состояние, тенденции и прогноз : Материалы международной конференции (К 100-летию со дня рождения академика ВАСХНИЛ Тамары Никандровны Кулаковской), Москва, 26–27 ноября 2019 года / Под редакцией В.Г. Сычева. – Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии имени Д.Н. Прянишникова, 2019. – С. 169-173. – DOI 10.25680/VNIIA.2019.46.23.055. – EDN UWURAQ.

194. Курбаков, Д.Н. Накопление тяжелых металлов в урожае зерновых культур при длительном применении минеральных удобрений / Д. Н. Курбаков, В. К. Кузнецов, М. С. Хлопюк, Е. В. Сидорова // Агрохимия. – 2022. – № 3. – С. 74-80. – DOI 10.31857/S000218812203005X. – EDN ZQLABO.

195. Курносова, Е. В. Антропогенное воздействие на фосфатный режим Черноземной почвы / Е. В. Курносова, Г. Е. Гришин // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. – 2013. – № 3(23). – С. 19-24. – EDN RDOLKT.

196. Кутукова, Ю.Д. Влияние мелиорантов на состояние тяжелых металлов в почвах и содержание их в растениях при использовании осадков сточных вод в качестве удобрения / Ю.Д. Кутукова, И.О. Плеханова // Агрохимия. - 2002.- № 12.- С. 68-74.

197. Лаврова, И.А. Превращение азота удобрений в системе почва - растение и повышение их эффективности: специальность 06.01.04 "Агрохимия" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата сельскохозяйственных наук / Лаврова Ирина Александровна. – Москва, 1992. – 40 с.

198. Лаврова, И.А. Трансформация азота удобрений в почве и использование его растениями / И.А. Лаврова, Д.А. Филимонов. – М.: ВНИИТЭИсельхоз, 1976. – 60 с.

199. Ладонин, Д. В. Формы соединений тяжелых металлов в техногенно-загрязненных почвах : специальность 03.02.13 "Почвоведение" : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора биологических наук / Ладонин Дмитрий Вадимович. – Москва, 2016. – 22 с. – EDN ZPYMTJ.

200. Лапа, В. В. Роль уровня почвенной кислотности и условий питания в изменении агрохимических свойств дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы / В. В. Лапа, О. Г. Кулеш // Почвоведение и агрохимия. – 2015. – № 1(54). – С. 140-150. – EDN SJBDUX.

201. Лапа, В.В. Влияние моноазотной системы удобрения на биохимический статус дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы с высоким содержанием фосфора и калия / В. В. Лапа, Н. А. Михайловская, С. А. Касьянчик, Е. Г. Мезенцева // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 5. – С. 633-640. – DOI 10.29235/1561-8323-2018-62-5-633-640. – EDN YNMIFF.

202. Лапа, В.В. Длительность последействия фосфорных и калийных удобрений на продуктивность сельскохозяйственных культур и плодородие

дерново-подзолистой супесчаной почвы / В. В. Лапа, Н. Н. Семененко, Е. Г. Мезенцева [и др.] // Почвоведение и агрохимия. – 2019. – № 2(63). – С. 56-67.

203. Лапа, В.В. Продуктивность зернотравянопропашного севооборота и плодородие дерново-подзолистой супесчаной почвы при применении различных систем удобрения / В. В. Лапа, Н. Н. Ивахненко, А. А. Бавтрук // Агрохимия. – 2009. – № 6. – С. 22-31. – EDN KMLLHD.

204. Лапа, В.В. Роль уровня почвенной кислотности и условий питания в изменении агрохимических свойств дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы / В. В. Лапа, О. Г. Кулеш // Почвоведение и агрохимия. – 2015. – № 1(54). – С. 140-150. – EDN SJBDUX.

205. Лебедев, С.Н. Влияние минеральных удобрений и известкования на миграцию кальция и магния из корнеобитаемого слоя дерново-подзолистых почв / С.Н. Лебедев: Автореф. дис....канд. биол. наук .- М., 1987. - 21с.

206. Лебедева, Л.А. Влияние минеральных удобрений при длительном применении и известкования на свойства дерново-подзолистых почв, стойкость растений, их урожай и качество/ Л.А. Лебедева: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. М., 1976. 52 с.

207. Лебедева, Т.Н. Действие биологических способов оптимизации плодородия типичного чернозема на качество почвенного органического вещества / Т. Н. Лебедева, Н. П. Масютенко, В. М. Семенов [и др.] // Агрохимия. – 2018. – № 7. – С. 12-21. – DOI 10.1134/S0002188118070086. – EDN XWMWXZ.

208. Лебедовский, И. А. Оценка содержания тяжелых металлов в черноземе выщелоченном при длительном применении удобрений / И. А. Лебедовский // Агрохимический вестник. – 2010. – № 6. – С. 13-16.

209. Липкина, Г.С. Содержание подвижных соединений калия в интенсивно удобряемых дерново-подзолистых суглинистых почвах / Г.С. Липкина // Почвоведение. 1986. № 12. С. 69–75.

210. Литвинский, В.А. Продуктивность севооборота с клеверным паром и агрохимические свойства дерново-подзолистой почвы в длительном опыте Д.Н. Прянишникова № 2 на Долгопрудной агрохимической опытной станции / В. А. Литвинский, Э. А. Муравин, В. А. Черников [и др.] // Агрохимия. – 2010. – № 9. – С. 19-30.

211. Лукин, С. В. Агроэкологическая оценка влияния органических удобрений на микроэлементный состав почв / С. В. Лукин, С. В. Селюкова // Достижения науки и техники АПК. – 2016. – Т. 30, № 12. – С. 61-65. – EDN XRYTAL.

212. Лукин, С. В. Мониторинг содержания марганца, цинка и меди в почвах и растениях Центрально-Черноземного района России / С. В. Лукин, Д. В. Жуйков // Почвоведение. – 2021. – № 1. – С. 60-69. – DOI 10.31857/S0032180X21010093. – EDN PFYNUP.

213. Лукин, С. В. Оценка содержания кадмия, свинца, ртути и мышьяка в агроценозах лесостепной зоны ЦЧО / С. В. Лукин, Н. С. Четверикова // . – 2013. – № 5. – С. 18-21. – EDN RDNRIB.

214. Лукин, С. В. Экологическая оценка содержания кобальта, никеля и хрома в лесостепных агроценозах Центрально-Черноземных областей / С. В. Лукин, Р. М. Хижняк // Агрохимия. – 2016а. – № 4. – С. 37-45.

215. Лукин, С. М. Калийное состояние дерново-подзолистой супесчаной почвы и баланс калия при длительном применении удобрений / С. М. Лукин // Агрохимия. – 2012. – № 12. – С. 5-14. – EDN PHFXRH.

216. Лукин, С. М. Круговорот и баланс углерода в агроценозах при длительном применении удобрений на дерново-подзолистых супесчаных почвах / С. М. Лукин, Е. И. Золкина, Е. В. Марчук // Проблемы агрохимии и экологии - от плодородия к качеству почвы: Материалы Всероссийской научной конференции, посвященной 90-летию выдающегося деятеля науки, классика отечественной школы агрохимии, академика РАН Василия Григорьевича Минеева, Москва, 07–08 сентября 2021 года / Под редакцией

В.А. Романенкова. – Москва: Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 2021. – С. 42-47.

217. Лукин, С. М. Сравнительная эффективность различных систем удобрения при длительном их применении в севооборотах / С. М. Лукин, Г. Е. Мерзлая // Плодородие. – 2016. – № 5(92). – С. 42-47. – EDN WWRWAB.

218. Лукин, С.М. Влияние длительного применения удобрений на продуктивность севооборота, содержание и качественный состав органического вещества почвы / С. М. Лукин, Е. И. Золкина, Е. В. Марчук // Плодородие. – 2021. – № 3(120). – С. 93-98. – DOI 10.25680/S19948603.2021.120.18. – EDN KRNLMV.

219. Лучицкая, О. А. Влияние длительного применения удобрений на содержание тяжелых металлов и калия в серой лесной почве / О. А. Лучицкая, В. И. Личко // Агрохимия. – 2005. – № 10. – С. 31-34.

220. Лучицкая, О. А. Воздействие осадков сточных вод на почву и растения / О. А. Лучицкая, С. М. Севостьянов // Агрохимия. – 2007. – № 9. – С. 80-84. – EDN IARZQN.

221. Лыков, А. М. Органическое вещество пахотных почв Нечерноземья : (Актуальность и состояние проблемы, рабочие гипотезы исслед., сопряженность агрон. и экол. функций, динамика в агроценозах, принципы моделирования и технологии воспроизводства) / А. М. Лыков, А. И. Еськов, М. Н. Новиков. ГНУ ВНИПТИОУ. – Москва:Рос. акад. с.-х. наук, 2004. – 630 с. – ISBN 5-85941-086-7. – EDN QKVXUJ.

222. Лыков, М.К. К методике расчетного определения гумусового баланса почвы в интенсивном земледелии / М.К. Лыков // Известия ТСХА, 1979. № 3. С. 21—34.

223. Лыкова, Е.А. Лабильное органическое вещество как фактор мобилизации-иммобилизации микроэлементов в почве / Е.А. Лыкова, Н. Н. Мирошниченко, О. С. Панасенко, О. П. Сябрук // Почвоведение и агрохимия. – 2013. – № 1(50). – С. 256-265. – EDN YKWEAP.

224. Лыскова, И. В. Влияние минеральных удобрений на плодородие дерново-подзолистой почвы, урожайность и качество зерновых культур / И. В. Лыскова // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. – 2017. – № 6(61). – С. 35-40. – DOI 10.30766/2072-9081.2017.61.6.35-40. – EDN YNQLRO.

225. Лыскова, И. В. Продуктивность клевера лугового на дерново-подзолистой почве при различной обеспеченности подвижным фосфором и степени кислотности / И. В. Лыскова, Т. В. Лыскова, Ф. А. Попов // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. – 2019. – Т. 20. – № 4. – С. 368-377. – DOI 10.30766/2072-9081.2019.20.4.368-377.

226. Лыскова, И.В. Влияние удобрений и извести на агрохимические показатели и фосфатный режим дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы / И. В. Лыскова, О. Н. Рылова, Н. А. Веселкова, Т. В. Лыскова // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. – 2015. – № 2(45). – С. 27-31. – DOI 10.30766/2072-9081.2015.45.2.27-32. – EDN TLURJX.

227. Лямцева, Е. Г. Калийное состояние легких дерново-подзолистых почв и его трансформация в современных условиях : специальность 06.01.04 "Агрохимия" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата сельскохозяйственных наук / Лямцева Елена Георгиевна. – Санкт-Петербург-Пушкин, 2008. – 22 с. – EDN NKNQGB.

228. Лямцева, Е.Г. Трансформация калия почвы на фоне калийдефицитных систем удобрения / Е. Г. Лямцева, А. И. Иванов // Агрохимический вестник. – 2008. – № 4. – С. 14-16. – EDN KVHCSL.

229. Мазиров, М. А. Краткий обзор результатов научных исследований в мировых длительных полевых опытах / М. А. Мазиров, В. А. Арефьева // Теоретические и технологические основы воспроизводства плодородия почв и урожайность сельскохозяйственных культур : Материалы Международной научно-практической конференции, Москва, 01 января – 31 2012 года / Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К.А. Тимирязева. – Москва: Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К.А. Тимирязева, 2012. – С. 23-31. – EDN EDSTBH.

230. Макаренко, С.В. Влияние ОСВ и других видов органических удобрений на почву / С.В. Макаренко, Н.Т. Чеботарев, Ю.И. Корнеев // Химизация сельского хозяйства.- 1991.- № 6.- С. 38-41.

231. Макаров, М. И. Фосфор органического вещества почв : специальность 03.00.27 : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора биологических наук / Макаров Михаил Иванович. – Москва, 2004. – 48 с. – EDN NHPHFR.

232. Макаров, М.И. Фосфор фульватной фракции органического вещества почв / М. И. Макаров, Н. А. Леошкина // Почвоведение. – 2009. – № 3. – С. 301-308. – EDN JWNNSJ.

233. Малахова, С.Д. Изменение основных параметров плодородия дерново-подзолистой супесчаной почвы в условиях применения возрастающих доз осадков сточных вод / С. Д. Малахова, М. В. Тютюнькова, З. С. Федорова, М. В. Чудинова // . – 2016. – № 1. – С. 6-10. – EDN WDKWCZ.

234. Мальцев, В.Т. Формирование урожая яровой пшеницы и использование азота удобрений (15N) в зависимости от глубины их размещения / В.Т. Мальцев // Агрохимия. – 1988. - №8. – С.3-7.

235. Мамонтов, В.Г. Валовое содержание микроэлементов в почвах северного административного округа г. Москвы / В. Г. Мамонтов, С. Л. Белопухов, О. Б. Рогова [и др.] // Научная жизнь. – 2017. – № 5. – С. 23-33.

236. Мамонтов, В.Г. Влияние бессменных культур и парования на термические и оптические свойства чернозема типичного / В. Г. Мамонтов, В. И. Лазарев, О. В. Рыжков, С. А. Беляева // Почвоведение. – 2023. – № 4. – С. 433-442. – DOI 10.31857/S0032180X22601153. – EDN HOCIIS.

237. Мамонтов, В.Г. Сравнительная характеристика свойств целинного, пахотного и залежного чернозема типичного Курской области / В. Г. Мамонтов, З. С. Артемьева, В. И. Лазарев [и др.] // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. – 2020. – № 101. – С. 182-201. – DOI 10.19047/0136-1694-2020-101-182-201. – EDN ADTVWD.

238. Маринова-Гарванска, С. Состав органического вещества осадков сточных вод городских очистных сооружений / С. Маринова-Гарванска Л. Петрова // Агроэкологические функции органического вещества почв и использование органических удобрений и биоресурсов в ландшафтном земледелии. Сборник международной н.-п. конференции.- М.: Россельхозакадемия – ГНУ ВНИПТИОУ, 2004.- С. 318-322.

239. Мартынович, Л.И. Влияние систематического применения удобрений на калийный режим почвы в зерносвекловичном севообороте / Л.И. Мартынович, Н.Н. Мартынович // Агрохимия. - 1992. - № 6. - С. 23–28.

240. Медведев, И.Ф. Влияние почвенно-агрохимических показателей на формирование корневой системы яровой мягкой пшеницы (Triticum aestivum L.) в различных погодных условиях на черноземах южных / И. Ф. Медведев, С. С. Деревягин, Д. И. Губарев [и др.] // Проблемы агрохимии и экологии. – 2014. – № 3. – С. 8-13.

241. Медведев, И.Ф. Динамика развития корневой системы яровой пшеницы в условиях активного проявления засух и различной обеспеченности элементами питания растений / И. Ф. Медведев, Ф. В. Сиренко, В. И. Ефимова, С. С. Деревягин // Достижения науки и техники АПК. – 2013. – № 8. – С. 6-10.

242. Межевова, А. С. Перспективы использования нетрадиционных удобрений-мелиорантов в сельском хозяйстве / А. С. Межевова, Ю. В. Берестнева, И. А. Корженко // Научно-агрономический журнал. – 2020. – № 4(111). – С. 19-22. – DOI 10.34736/FNC.2020.111.4.004.19-22. – EDN OTGGFM.

243. Мельничук, Ю.П. Влияние ионов кадмия на клеточное деление и рост растений / Ю.П. Мельничук. Киев: Наукова думка, 1990. 148 с.

244. Мельничук, Ю.П. Влияние ионов кадмия на клеточное деление и рост растений/ Ю.П.Мельничук//Киев: Наукова думка, 1990. - 148 с.

245. Менькина, Е. А. Численность эколого-трофических групп микроорганизмов в зависимости от технологии возделывания озимой

пшеницы на черноземе обыкновенном / Е. А. Менькина, Н. Н. Шаповалова, А. А. Воропаева // Юг России: экология, развитие. – 2021. – Т. 16, № 2(59). – С. 55-64. – EDN LVGCGH.

246. Мерзлая, Г. Е. Агрохимические аспекты использования осадков сточных вод для рекультивации земель различного назначения / Г. Е. Мерзлая, Р. А. Афанасьев // Агрохимия. – 2020. – № 8. – С. 70-77. – DOI 10.31857/S0002188120080050. – EDN QBEBEP.

247. Мерзлая, Г. Е. Исследование устойчивости агроценозов при длительном применении удобрений на дерново-подзолистой почве / Г. Е. Мерзлая // Почвоведение. – 2021. – № 3. – С. 355-362. – DOI 10.31857/S0032180X21030126. – EDN OYEELE.

248. Мерзлая, Г.Е. Агроэкологическая оценка использования осадка сточных вод / Г.Е. Мерзлая, Г.А. Зябкина, И.А. Нестерович, Т.П. Фомкина // Агрохимия.- 1995.- № 5.- С. 102-108.

249. Мерзлая, Г.Е. Агроэкологическая оценка нетрадиционных органических удобрений / Г.Е. Мерзлая // Экологический вестник России.- 2006.- № 4.- С. 3-14.

250. Мерзлая, Г.Е. Агроэкологическая эффективность осадков сточных вод / Г.Е. Мерзлая, Р.Л. Афанасьев // Агрохимический вестник.- 2001.- № 5.- С. 25-27.

251. Мерзлая, Г.Е. Взаимосвязь микробиологических и агрохимических показателей дерново-подзолистой почвы при длительном применении удобрений / Г. Е. Мерзлая, Н. В. Верховцева, О. М. Селиверстова [и др.] // Проблемы агрохимии и экологии. – 2012. – № 2. – С. 18-25. – EDN PASTXT.

252. Мерзлая, Г.Е. Эффективность длительного применения биологизированных систем удобрения / Г.Е. Мерзлая // Агрохимия. – 2018. – № 10. – С. 27-33. – DOI 10.1134/S0002188118100113. – EDN YMFRHN.

253. Мёрзлая, Г.Е. Эффективность длительного применения органических и минеральных удобрений на дерново-подзолистой

легкосуглинистой почве / Г. Е. Мерзлая, Г. А. Зябкина, Т. П. Фомкина [и др.] // Агрохимия. – 2012. – № 2. – С. 37-46. – EDN OWXOFV.

254. Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения. – М.: Росинформагротекс, 2003. – 240 с.

255. Методы почвенной микробиологии и биохимии [под ред. Д.Г. Звягинцева]. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1980. 224 с.

256. Минеев, В. Г. Влияние длительного действия и последействия удобрений на агрохимические свойства дерново-подзолистой почвы и иммобилизацию биогенных и токсичных элементов в агроценозе / В. Г. Минеев, Р. Р. Кинжаев, А. В. Арзамазова // Агрохимия. – 2007. – № 6. – С. 5-13. – EDN IAQCDF.

257. Минеев, В. Г. Влияние длительного применения удобрений и известкования на биологические свойства почвы / В. Г. Минеев, Н. Ф. Гомонова, Е. В. Морачевская // . – 2014. – № 1. – С. 3-9. – EDN SAHSZV.

258. Минеев, В. Г. Действие и последействие удобрения на плодородие дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы / В. Г. Минеев, Н. Ф. Гомонова // Агрохимия. – 2005. – № 1. – С. 5-13. – EDN HSANLP.

259. Минеев, В. Г. Значение фосфора в улучшении свойств дерново-подзолистой почвы при действии и последействии длительного применения минеральных удобрений / В. Г. Минеев, Н. Ф. Гомонова // Проблемы агрохимии и экологии. – 2009. – № 2. – С. 3-9. – EDN KWYONV.

260. Минеев, В. Г. Изменение свойств и калийного состояния дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы при 40-летнем применении агрохимических средств / В. Г. Минеев, Н. Ф. Гомонова, Е. В. Морачевская // Агрохимия. – 2013. – № 10. – С. 3-12. – EDN REHUPV.

261. Минеев, В. Г. Периодичность известкования при окультуривании дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы / В. Г. Минеев, Н. Ф. Гомонова // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2014. – № 1. – С. 37-41. – EDN RWZYUL.

262. Минеев, В.Г. Агрохимия. Учебник. - 2-е изд., перераб. и доп / В.Г. Минеев - М: Изд-во МГУ, КолосС, 2004. — 720 с.

263. Минеев, В.Г. Влияние фосфорных удобрений на агрохимические свойства дерново-подзолистой почвы и урожайность сельскохозяйственных культур / В. Г. Минеев, А. А. Коваленко, А. В. Ваулин, Р. А. Афанасьев // Агрохимия. – 2009. – № 10. – С. 3-10. – EDN LDTRFT.

264. Минеев, В.Г. Оценка калийного режима дерново-подзолистых почв с использованием термодинамических показателей / В.Г. Минеев, Н.Ф. Гомонова, И.Н. Черных // Вестн. сел.-хоз. науки. - 1988. - № 12. - С. 43–51.

265. Минеев, В.Г. Распределение кадмия и свинца в профиле дерново-подзолистой почвы при длительном удобрении ее осадками сточных вод / В. Г. Минеев, Е. Ю. Анциферова, Т. Н. Болышева, В. А. Касатиков // Агрохимия. – 2003. – № 1. – С. 45-49. – EDN OKXQQZ.

266. Минкина, Т. М. Состав соединений тяжелых металлов в почвах / Т. М. Минкина, О. Г. Назаренко, Г. В. Мотузова. – Ростов-на-Дону : Ростов, 2009. – 208 с. – EDN QHUYSJ.

267. Минкина, Т. М. Формы соединений тяжелых металлов в почвах степной зоны / Т. М. Минкина, Г. В. Мотузова, О. Г. Назаренко [и др.] // Почвоведение. – 2008. – № 7. – С. 810-818. – EDN JHKUEJ.

268. Митрофанова, Е. М. Влияние длительного применения минеральных удобрений и последействия извести на фосфатный режим дерново-поверхностноподзолистой почвы Предуралья / Е. М. Митрофанова // Агрохимия. – 2016. – № 7. – С. 36-43. – EDN WHGKLX.

269. Митрофанова, Е. М. Кальций и магний в дерново-подзолистых почвах Предуралья / Е. М. Митрофанова // Аграрный вестник Урала. – 2011. – № 2(81). – С. 9-11. – EDN PASYLV.

270. Митрофанова, Е. М. Содержание обменного калия в дерново-подзолистых почвах Предуралья при известковании / Е. М. Митрофанова, А. И. Косолапова // Плодородие. – 2010. – № 5(56). – С. 26-27. – EDN MXGUQH.

271. Митрофанова, Е.М. Агроэкологические аспекты снижения отрицательного влияния кислотности почв в условиях адаптивно-ландшафтного земледелия Предуралья : специальность 06.01.04 "Агрохимия" : диссертация на соискание ученой степени доктора сельскохозяйственных наук / Митрофанова Екатерина Михайловна. – Пермь, 2011. – 391 с. – EDN QFLGTR.

272. Михайлова, Л. А. Оптимизация питания ячменя, озимой ржи, картофеля и клевера и эффективность минеральных удобрений при разной окультуренности дерново-подзолистых почв Предуралья : специальность 06.01.04 "Агрохимия" : диссертация на соискание ученой степени доктора сельскохозяйственных наук / Михайлова Людмила Аркадьевна. – Пермь, 2008. – 436 с. – EDN QEHOGR.

273. Мишустин Е.Н. Ассоциации почвенных микроорганизмов / Е.Н. Мишустин. - М.: Наука, 1975. - 256 с.

274. Мишустин, Е.Н. Биологическая фиксация атмосферного азота / Е.Н. Мишустин, В.К. Шильникова. – М.: Наука, 1968. – 531 с.

275. Могилевкина, И.А. Изучение доступности растениям природного фиксированного аммония почвы / И.А. Могилевкина // Агрохимия. – 1970. - №5. – С. 53-57

276. Могилевкина, И.А. Сравнительное изучение динамики поступления в растения фиксированного и обменного аммония почвы / И.А. Могилевкина // Агрохимия. -1973. - № 10. - С. 7-13.

277. Морозова, Т. С. Влияние средств химизации на азотный режим чернозема типичного / Т. С. Морозова, В. И. Желтухина, Е. Ю. Колесниченко // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. – 2021. – № 2(30). – С. 162-166. – EDN ZAPIVM.

278. Морозова, Т. С. Оценка накопления кадмия озимой пшеницей / Т. С. Морозова, С. Д. Лицуков // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. – 2019. – № 2(22). – С. 173-181. – EDN OQKZFV.

279. Мотузова, Г.В. Соединения микроэлементов в почвах : системная организация, экологическое значение, мониторинг / Г. В. Мотузова ; Г. В. Мотузова. – Изд. 2-е. – Москва : URSS, 2009. – 166 с. – ISBN 978-5-397-00140-3. – EDN QLADIV.

280. Мудрых, Н. М. Динамика агрохимических показателей плодородия пахотных почв Пермского края / Н. М. Мудрых // Российский журнал прикладной экологии. – 2019. – № 2(18). – С. 27-31. – EDN FAIWQN.

281. Назарюк, В. М. Баланс и трансформация азота в агроэкосистемах / В. М. Назарюк. – Новосибирск : Издательство Сибирского отделения РАН, 2002. – 257 с. – ISBN 5-7692-0539-3. – EDN SRAYMP.

282. Назарюк, В. М. Изучение возможности систематического использования хлорсодержащих калийных удобрений в овощеводстве Западной Сибири / В. М. Назарюк, И. Я. Маслова // Агрохимия. – 1990. – № 7. – С. 45-52. – EDN UNVZVX.

283. Налиухин, А. Н. 80 лет географической сети полевых опытов с удобрениями / А. Н. Налиухин // Плодородие. – 2021. – № 3(120). – С. 6-8. – EDN RXTDCR.

284. Налиухин, А. Н. Азотфиксация клевера лугового при применении удобрений и известковании / А. Н. Налиухин, А. А. Рыжакова // Агрохимия. – 2021. – № 11. – С. 65-71. – DOI 10.31857/S0002188121110090.

285. Наумченко, Е. Т. Степень агрогенного воздействия на фосфатный режим луговой черноземовидной почвы / Е. Т. Наумченко, К. Ю. Разумова // Плодородие. – 2022. – № 2(125). – С. 40-43. – DOI 10.25680/S19948603.2022.125.10. – EDN SXIIOR.

286. Небольсин, А.Н. Динамика кислотности дерново-подзолистой почвы за 20-летний период / А.Н. Небольсин, З.П. Небольсина // Бюллетень ВИУА. -1985. - № 72. - С. 36-39.

287. Небольсин, А.Н. Теоретические основы известкования почв / А.Н. Небольсин, З.П. Небольсина. - СПб: ЛНИИСХ, 2005.-252с.

288. Нефедьева, В.В. Фосфатный режим светло-серой лесной легкосуглинистой почвы в условиях длительного применения удобрений / В. В. Нефедьева, Л.Д. Варламова // Проблемы агрохимии и экологии. – 2014. – № 2. – С. 29-33. – EDN SHOGFJ.

289. Никитин, Д. А. Микробиологические индикаторы экологических функций почв (обзор) / Д. А. Никитин, М. В. Семенов, Т. И. Чернов [и др.] // Почвоведение. – 2022. – № 2. – С. 228-243. – DOI 10.31857/S0032180X22020095. – EDN BJIKTJ.

290. Никитина, Л. В. Влияние длительного применения различных систем удобрения на продуктивность севооборота и калийный режим дерново-подзолистой почвы / Л. В. Никитина // Актуальные проблемы науки и образования в области естественных и сельскохозяйственных наук. – 2018а. – № 1. – С. 155-159. – EDN KKXNBK.

291. Никитина, Л. В. Действие и последействие разных систем удобрения в длительном полевом опыте на калийный режим суглинистой почвы / Л. В. Никитина // Плодородие. – 2015. – № 6(87). – С. 5-7. – EDN VEIOAR.

292. Никитина, Л. В. Исследования калийного режима разных типов почв в длительных опытах Геосети / Л. В. Никитина // Агрохимия. – 2018. – № 1. – С. 39-51. – DOI 10.7868/S0002188118010040. – EDN YLCIWT.

293. Никитина, Л. В. Минимальные уровни обменного калия в дерново-подзолистых почвах / Л. В. Никитина, И. В. Володарская // Плодородие. – 2002. – № 1(4). – С. 30-31. – EDN TTWNBF.

294. Никитишен, В. И. Баланс азота в агроэкосистемах на серых лесных почвах при длительном внесении удобрений / В. И. Никитишен, В. И. Личко // Почвоведение. – 2008. – № 4. – С. 481-493. – EDN IJKMCD.

295. Никитишен, В.И. Зависимость последействия азотного удобрения от остаточного количества нитратов в профиле серой лесной почвы / В.И. Никитишен // Агрохимия. – 1979. - № 7. – С. 8-17.

296. Никитишен, В.И. Факторы, обуславливающие последействие азотных и фосфорных удобрений / В.И. Никитишен // Плодородие. – 2004. - №2. – С.18-21.

297. Никифоренко, Л.И. Формы и подвижность фосфатов в серой оподзоленной почве в связи с длительным применением удобрений / Л.И. Никифоренко, В.Н. Лебединская // Агрохимия. – 1983. – № 10. – С. 89-96.

298. Новиков, А. А. Азот и его фракционный состав в черноземе обыкновенном Ростовской области при внесении удобрений / А. А. Новиков // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. – 2020. – № 2(38). – С. 140-150. – DOI 10.31774/2222-1816-2020-2-140-150. – EDN HFJZHW.

299. Новиков, А. А. Формирование азотного фонда основных подтипов черноземов Юга России / А. А. Новиков // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2012. – № 78. – С. 620-630. – EDN OXQXFD.

300. Новоселов, С. И. Влияние способа обработки почвы, видов севооборота и минеральных удобрений на содержание органического вещества в почве при освоении залежных земель / С. И. Новоселов, А. Н. Кузьминых // . – 2019. – № 1(8). – С. 54-57. – DOI 10.17022/qkvz-q524. – EDN XCNWSK.

301. Новоселов, С. И. Эффективность использования биологического азота в земледелии Нечерноземья / С. И. Новоселов, Е. С. Новоселова, А. А. Завалин ; Министерство образования и науки РФ, Марийский государственный университет, Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии им. Д.Н. Прянишникова Россельхозакадемии. – Йошкар-Ола : Марийский государственный университет, 2012. – 149 с. – ISBN 978-5-94808-676-7. – EDN QLCWEJ.

302. Носко Б.С., Христенко А.А. Влияние состава и свойств почв на результаты определения содержания подвижного фосфора химическими методами / Б.С. Носко, А.А. Христенко // Агрохимия. - 1996. - №4. - С.86-94.

303. Носко, Б. С. Закономерности формирования агрогенного профиля черноземов типичных лесостепи Украины после распашки целины и многолетней залежи / Б. С. Носко // Почвоведение. – 2013. – № 3. – С. 359. – DOI 10.7868/S0032180X13030052. – EDN PUXUQF.

304. Носко, Б.С. Изменение калийного фонда черноземов при распашке многолетней залежи / Б.С. Носко // Почвоведение. - 1999. - № 12. - С. 1474–1480.

305. Носов, В.В. Значение калийных удобрений для сохранения экологического равновесия / В.В. Носов // Плодородие. - 2002. - № 2. - С. 28–30.

306. Обухов, А.И. Баланс тяжелых металлов в агроценозах дерново-подзолистых почв и проблемы мониторинга / А.И. Обухов, А.А. Попова // Вест.МГУ. Сер. 17, Почвоведение.- 1992.- № 3.- С.31-39.

307. Овчаренко, М.М. Тяжелые металлы в системе почва – растения – удобрения / М.М. Овчаренко // М.: Пролетарский светоч. 1997. 290 с.

308. Окорков, В. В. Влияние длительного применения удобрений на групповой состав органического вещества серых лесных почв Ополья / В. В. Окорков // Агрохимия. – 2017. – № 10. – С. 3-15. – DOI 10.7868/S0002188117100027. – EDN ZGVYAD.

309. Окорков, В. В. Влияние систем удобрения на фосфорно-калийный режим серой лесной почвы / В. В. Окорков, Л. А. Окоркова, О. А. Фенова // Владимирский земледелец. – 2014. – № 2-3(68-69). – С. 9-14. – EDN UCTKZN.

310. Окорков, В. В. Изменение физико-химических и химических свойств серых лесных почв при длительном применении удобрений / В. В. Окорков, Л. А. Окоркова, О. А. Фенова // . – 2015. – Т. 12, № 3. – С. 14-25. – EDN UJJGOL.

311. Окорков, В. В. К вопросу о равноценности питания растений нитратным и аммонийным азотом / В. В. Окорков // Агрохимия. – 2021. – № 12. – С. 3-14. – DOI 10.31857/S0002188121120103. – EDN UQZLQH.

312. Окорков, В.В. Влияние систем удобрения в севообороте на продуктивность серых лесных почв / В. В. Окорков, О. А. Фенова, Л. А. Окоркова // Владимирский земледелец. – 2011. – № 1. – С. 15-23. – EDN NDSDWZ.

313. Окорков, В.В. Фосфорно-калийный режим серой лесной почвы Владимирского ополья при внесении удобрений / В.В. Окорков // Агрохимия. - 2002. - № 5. - С. 5–11.

314. Опекунова, М. Г. Оценка экологического состояния почв в районе воздействия горнорудных предприятий Южного Урала / М. Г. Опекунова // Ресурсный потенциал почв - основа продовольственной и экологической безопасности России : Материалы международной научной конференции, Санкт-Петербург, 01–04 марта 2011 года / Под редакцией Б.Ф. Апарина. – Санкт-Петербург: Издательство Санкт-Петербургского государственного университета, 2011. – С. 440-442. – EDN VCBOAV.

315. Опытное дело в полеводстве / Под общей ред. Г.Ф.Никитенко - М., 1982. - 190с.

316. Орлов, Д.С. Гумусовые кислоты почв и общая теория гумификации / Д.С. Орлов. - М.: Изд-во МГУ, 1990. - 325 с.

317. Орлов, Д.С. Экологические нормативы на нетрадиционные органические удобрения / Д.С. Орлов, Л.К. Садовникова, Д.В. Ладонин // Химия в сельском хозяйстве.- 1995.- № 5.- С. 35-37.

318. Основные достижения и перспективы почвенной метагеномики. – Санкт-Петербург: Общество с ограниченной ответственностью "Информ-Навигатор", 2017. – 288 с. – ISBN 978-5-906572-20-2. – EDN YIBVUF.

319. Павлихина, А. В. Формы и сорбция фосфатов в пахотных и целинных дерново-подзолистых почвах Южной части Московской области : специальность 06.53.20 : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата сельскохозяйственных наук / А. В. Павлихина. – Москва, 1971. – 18 с. – EDN ZMMWNZ.

320. Палавеев, Т. Кислотность почв и методы её устранения / Т. Палавеев, Т. Тотев // Пер.с болг. - М.: Колос, 1983. - 165с.

321. Пахненко, Е.П. Осадки сточных вод и другие нетрадиционные органические удобрения / Е.П. Пахненко. - М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. - 311 с.

322. Пегова, Н. А. Влияние систем обработки и биоресурсов на агрохимические свойства дерново-подзолистой суглинистой почвы / Н. А. Пегова // Вестник российской сельскохозяйственной науки. – 2017. – № 6. – С. 31-35. – EDN ZWGXDP.

323. Пермский край в цифрах. 2022: Краткий статистический сборник / Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Пермскому краю. -Пермь, 2022. - 195 с.

324. Петербургский, А.В. Круговорот и баланс питательных веществ в земледелии / А.В. Петербургский. - М.: Наука, 1979. - 168 с.

325. Петухов, М.П. Применение удобрений в Предуралье / М.П. Петухов, В.Н. Прокошев - Пермь: Кн. изд-во, 1964. - 334с.

326. Пинаева, А. С. Влияние осадка сточных вод на накопление Pb, Cd в системе почва-растение / А. С. Пинаева, И. В. Ельшаева // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2022. – № 4(69). – С. 113-121. – DOI 10.24412/2078-1318-2022-4-113-121. – EDN HMNUXQ.

327. Пинаева, М. И. Влияние органических и минеральных удобрений на содержание углерода органического вещества дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы / М. И. Пинаева, Ю. А. Акманаева // Пермский аграрный вестник. – 2022. – № 1(37). – С. 68-74. – DOI 10.47737/2307-2873_2022_37_68. – EDN ETUQVP.

328. Пискунов, А.С. Азот почвы и эффективность азотных удобрений на зерновых культурах в Предуралье / А.С. Пискунов. - Пермь, 1994.- 165 с.

329. Плотников, А. М. Баланс элементов питания и продуктивность зернопарового севооборота при применении минеральных удобрений / А. М.

Плотников, Г. С. Кабдунова // Проблемы агрохимии и экологии. – 2018. – № 1. – С. 38-41. – EDN YWIINO.

330. Поддымкина, Л.М. Действие культур, удобрений и севооборота на содержание гумуса и кислотность почвы / Л.М. Поддымкина, А.Ф. Сафонов, М.А. Золотарев // Плодородие. - 2007. - № 3. - С. 12 -13.

331. Подстяженок, М. А. Влияние удобрений на кислотно-основное состояние дерново-подзолистой почвы в условиях Псковской области / М. А. Подстяженок, Д. А. Чернецкая, К. М. Шевченко, Т. И. Володина // Известия Великолукской государственной сельскохозяйственной академии. – 2020. – № 4(33). – С. 11-16. – EDN GCBVPI.

332. Покровская, Е.В. Утилизация осадка сточных вод /Е.В. Покровская, Т.Н. Сергеева // Экология и промышленность России.- 2005.- № 6.- С. 23-25.

333. Покровская, С.Ф. Использование осадков городских сточных вод в сельском хозяйстве/ С.Ф. Покровская, В.А. Касатиков. - ВНИИТЭИ агропром, 1987. – 56 с.

334. Полянская, Л. М. Содержание и структура микробной биомассы как показатели экологического состояния почв / Л. М. Полянская, Д. Г. Звягинцев // Почвоведение. – 2005. – № 6. – С. 706-714. – EDN HSGAUX.

335. Полянская, Л.М. Изменение состояния микробной биомассы при окультуривании / Л.М. Полянская, С.М. Лукин, Д.Г. Звягинцев // Почвоведение. - 1997. - №2. - С.206-212.

336. Помазкина, Л.В. Азот, его превращение и баланс в почвах Средней Сибири: автореф. дис. д-ра биол. наук / Л.В. Помазкина. - СИФИБР СО РАН. Новосибирск, 1989. - 35с.

337. Помазкина, Л.В. Использование растениями и превращение меченого азота удобрений в почвах подтаёжной зоны Средней Сибири / Л.В. Помазкина // Агрохимия. - 1980. -- №4. - С. 3-8.

338. Попова, С. И. Известкование кислых почв в Предуралье / С. И. Попова, Е. М. Митрофанова, Ф. М. Зиганьшина. – Пермь : Издательство "От и До", 2013. – 252 с. – ISBN 978-5-4367-0074-8. – EDN UINGYN.

339. Постников, Д.А. Эффективность фитосанации земель сельскохозяйственного назначения при внесении осадка сточных вод / Д.А. Постников, С.В. Кузнецов, А.Ю. Щербаков // Известия ТСХА.- 2004.- № 3.- С. 67-71.

340. Постников, П. А. Влияние биологических факторов на накопление элементов питания и на урожайность зерновых / П. А. Постников, В. В. Попова, Е. Л. Тиханская // Агрохимический вестник. – 2020. – № 2. – С. 32-36. – DOI 10.24411/1029-2551-2020-10019. – EDN LBTAMS.

341. Постников, П. А. Продуктивность клевера в полевых севооборотах / П. А. Постников, В. В. Попова // Пермский аграрный вестник. – 2014. – № 2(6). – С. 29-34.

342. Постников, П.А. Урожайность культур, вынос и баланс элементов питания в зернотравяном севообороте / П. А. Постников, В. В. Попова, Е. Ф. Данько, О. В. Васина // Плодородие. – 2022. – № 3(126). – С. 16-19. – DOI 10.25680/S19948603.2022.126.04. – EDN URSFJO.

343. Потанин, В. Г. Патент № 2733728 C1 Российская Федерация, МПК A01G 7/00. Способ оценки урожайности яровой пшеницы в зависимости от погодных условий : № 2019112540 : заявл. 24.04.2019 : опубл. 06.10.2020 / В. Г. Потанин. – EDN BLEDXH.

344. Практикум по микробиологии [под ред. А.И. Нетрусова]. М.: Академия, 2005. 603 с.

345. Приходько, В. Е. Базальное дыхание и состав микробной биомассы целинных, агро- и лесомелиорированных полупустынных почв Северного Прикаспия / В. Е. Приходько, М. Л. Сиземская // Почвоведение. – 2015. – № 8. – С. 974. – DOI 10.7868/S0032180X15080043. – EDN TZMCRJ.

346. Прокошев, В. В. Известкование дерново-подзолистых почв как фактор эффективности калийных удобрений : автореферат диссертации на

соискание ученой степени кандидата сельскохозяйственных наук / В. В. Прокошев. – Москва, 1962. – 22 с. – EDN WXXEJI.

347. Прокошев, В.В. Калий и калийные удобрения / В.В. Прокошев, И.П. Дерюгин. - М.: Ледум, 2000. - 185 с.

348. Прокошев, В.Н. Повышение плодородия песчаных и супесчаных почв дерново-подзолистого типа / В.Н. Прокошев. - М.: Изд-во АН СССР, 1952. - 444с.

349. Прянишников, Д.Н. Избранные труды / Д.Н. Прянишников. – М.: «Наука», 1976. – 591 с.

350. Прянишников, Д.Н. О влиянии реакции почвы на рост растений / Д.Н. Прянишников // Удобрение и урожай. – 1931.– № 1. – С. 53–60.

351. Пугаев, С. В. Особенности аккумуляции тяжелых металлов продуктивной частью сельскохозяйственных растений в различных агроэкологических условиях республики Мордовия / С. В. Пугаев // Агрохимия. – 2020. – № 12. – С. 71-80. – DOI 10.31857/S000218812012008X.

352. Пухальская, Н.В. Особенности калийного питания сельскохозяйственных растений в оптимальных и неблагоприятных условиях:монография / Н.В. Пухальская, В. Г. Сычев, А. А. Собачкин, Н. И. Павлова ; Российская академия сельскохозяйственных наук, Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии им. Д. Н. Прянишникова. – Москва : Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии им. Д.Н. Прянишникова, 2009. – 192 с. – ISBN 978-5-9238-0102-6.

353. Пчёлкин, В.У. Почвенный калий и калийные удобрения / В.У. Пчёлкин. - М.: «Колос», 1966.-336 с.

354. Пьянкова, Н. М. Оценка действия азотных удобрений и биологического азота клевера лугового на яровой пшенице в Предуралье : специальность 06.01.04 "Агрохимия" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата сельскохозяйственных наук / Пьянкова Наталья Михайловна. – Пермь, 2007. – 18 с.

355. Решецкий, Н.П. Экологические проблемы использования осадков сточных вод в качестве удобрения / Н.П. Решецкий // Агроэкологические функции органического вещества почв и использование органических удобрений и биоресурсов в ландшафтном земледелии. Сборник межд. н.-п. конференции.- М.: Россельхозакадемия–ГНУ ВНИПТИОУ, 2004.- С. 313-315.

356. Рогова, О. Б. Сорбционная способность серой лесной почвы в отношении фосфора в зависимости от системы удобрения / О. Б. Рогова, Н. А. Колобова, А. Л. Иванов // Почвоведение. – 2018. – № 5. – С. 573-579. – DOI 10.7868/S0032180X18050064. – EDN XNSGCT.

357. Роева, Т. А. Влияние азотных и калийных удобрений на азотный режим агротемно-серой почвы вишневого сада / Т. А. Роева, Е. В. Леоничева, Л. И. Леонтьева // Плодородие. – 2022. – № 4(127). – С. 12-15. – DOI 10.25680/S19948603.2022.127.04. – EDN WJZGYP.

358. Романенков, В.А. Эффективность использования азота в длительных и краткосрочных опытах агрохимслужбы и Геосети Российской Федерации / В.А. Романенков, М. В. Беличенко, О. В. Рухович [и др.] // Агрохимия. – 2020. – № 12. – С. 28-37. – DOI 10.31857/S0002188120120091.

359. Савич, В.И. Комплексная оценка состояния калия в почве / В. И. Савич, И. Г. Платонов, Ю. А. Духанин [и др.] // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. – 2006. – № 3. – С. 15-28. – EDN HVJGLF.

360. Савоськина, О.А. Технологические приемы стабилизации содержания гумуса в дерново-подзолистой почве / О. А. Савоськина, А. В. Шитикова, А. В. Константинович [и др.] // Плодородие. – 2022. – № 6(129). – С. 49-52. – DOI 10.25680/S19948603.2022.129.13. – EDN NGDOQK.

361. Садовникова, Л.К. Содержание тяжелых металлов в активных илах, применяемых в качестве органических удобрений / Л.К. Садовникова, С.И. Решетников, Д.В. Ладонин // Почвоведение.- 1993.- № 5- С. 29-33.

362. Сазонов, С.Н. Естественное восстановление микробиологических свойств дерново-подзолистой почвы в условиях залежи / С. Н. Сазонов, Н. А.

Манучарова, М. В. Горленко, М. М. Умаров // Почвоведение. – 2005. – № 5. – С. 575-580. – EDN HSCAUR.

363. Сайфуллина, Л.Б. Фракционный состав азота на черноземе южном в условиях длительного применения минеральных удобрений / Л. Б. Сайфуллина, М. П. Чуб, В. В. Пронько [и др.] // Плодородие. – 2017. – № 5(98). – С. 12-16. – EDN ZNOKZR.

364. Самофалова, И.А. Агрогенетическая оценка почв России : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям 110100 "Агрохимия и агропочвоведение" и 110400 "Агрономия" / И. А. Самофалова. – Пермь : Пермская государственная сельскохозяйственная академия имени академика Д.Н. Прянишникова, 2011. – 166 с. – ISBN 978-5-94279-114-8. – EDN QLCMOT.

365. Самофалова, И. А. Влияние минеральных удобрений на показатели устойчивости микробоценоза в почвах, загрязненных свинцом / И. А. Самофалова // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2011. – № 12(131). – С. 346-348. – EDN OWSMLH.

366. Самофалова, И. А. Химический состав почв и почвообразующих пород : учебное пособие для студентов, обучающихся по специальностям 110101 "Агрохимия и агропочвоведение" и 110102 "Агроэкология" / И. А. Самофалова. – Пермь : Пермская государственная сельскохозяйственная академия имени академика Д.Н. Прянишникова, 2009. – 130 с. – ISBN 978-5-94279-074-5. – EDN QKZYBX.

367. СанПиН 1.2.3685-21 "Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания" (https://docs.cntd.ru/document/573500115#6560IO).

368. СанПиН 2.3.2.1078-01. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов.

369. Сапожников, Н.А. Трансформация азота в дерново-подзолистых почвах разной степени окультуренности и поступление азота в растения /

Н.А. Сапожников, Т.К. Ливанова, И.П. Русинова и др. // Проблемы почвоведения.- М.: Наука, 1978.- С. 114-120.

370. Селивановская, С.Ю. Микробная биомасса и биологическая активность серых лесных почв при внесении осадков городских сточных вод / С.Ю. Селивановская, В.З. Латыпова, С.Н. Киямова, Ф.К. Алимова // Почвоведение.- 2001.- № 2.- С. 227-233.

371. Семендяева, Н. В. Влияние длительного применения удобрений на свойства дерново-подзолистой почвы таежной зоны Западной Сибири / Н. В. Семендяева // Агрохимия. – 2010. – № 3. – С. 3-11. – EDN MCIPXJ.

372. Семенов, В. М. Образование "экстра" - азота в удобряемых почвах и его роль в питании растений / В. М. Семенов // Агрохимия. – 1999. – № 8. – С. 5-13. – EDN YFRYNV.

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

374. Семенов, В. М. Функции углерода в минерализационно-иммобилизационном обороте азота в почве / В. М. Семенов // Агрохимия. – 2020. – № 6. – С. 78-96. – DOI 10.31857/S0002188120060101. – EDN IUSCVO.

375. Семенов, В.М. Минерализуемость органического вещества и углерод- секвестрирующая емкость почв зонального ряда / В. М. Семенов, Л. А. Иванникова, Т. В. Кузнецова [и др.] // Почвоведение. – 2008. – № 7. – С. 819-832. – EDN JHKUET.

376. Семёнов, В.М. Определение содержания и скорости обновления азота активной фазы почвы в опыте с ^{15}N-меченным удобрением / В.М. Семёнов, Т.В. Кузнецова, В.Н. Кудеяров // Почвоведение. – 1999. - № 4. – С. 512-520.

377. Семерджян, А.К. Осадки сточных вод очистных сооружений Г. Краснодара как удобрение для сельскохозяйственных угодий / А. К. Семерджян, В. И. Орехова, Л. Н. Кондратенко, Г. С. Варакин // Плодородие.

– 2022. – № 4(127). – С. 88-89. – DOI 10.25680/S19948603.2022.127.22. – EDN MDOMCF.

378. Середина, В.П. Геохимические особенности поведения калия в почвах / В. П. Середина // Вестник Томского государственного университета. Биология. – 2007. – № 1(1). – С. 106-118. – EDN KGCTJX.

379. Симонова, О. А. Содержание тяжелых металлов (Zn, Cu, Mn, Fe) в агропочвах Нечерноземной зоны России в условиях применения минеральных удобрений (на примере Г. Кирова) / О. А. Симонова, М. В. Симонов, Е. В. Товстик // Экобиотех. – 2019. – Т. 2, № 3. – С. 302-306. – DOI 10.31163/2618-964X-2019-2-3-302-306. – EDN IIIJMR.

380. Синеговская, В. Т. Влияние длительного применения удобрений в посевах пшеницы на почвенную микрофлору луговой черноземовидной почвы / В. Т. Синеговская, Е. В. Банецкая // Вестник российской сельскохозяйственной науки. – 2021. – № 3. – С. 44-49. – DOI 10.30850/vrsn/2021/3/44-49. – EDN UPMJAC.

381. Синявский, И.В. Агрохимические и экологические аспекты плодородия черноземов лесостепного Зауралья : специальность 06.01.04 "Агрохимия" : диссертация на соискание ученой степени доктора биологических наук / Синявский Игорь Васильевич. – Челябинск, 2002. – 385 с. – EDN VNSKHP.

382. Синявский, И.В. Состояние плодородия почв и экологическаяустойчивость агроландшафтов Челябинской области / И. В. Синявский // Агропродовольственная политика России. – 2015. – № 1(37). – С. 2-7. – EDN TNZBUL.

383. Скируха, А. Ч. Корневые и пожнивные остатки полевых культур в севообороте как резерв повышения содержания основных элементов минерального питания в почве / А. Ч. Скируха, Л. Н. Грибанов, А. А. Усеня // Земледелие и селекция в Беларуси. – 2017. – № 53. – С. 13-19. – EDN XUTRLV.

384. Смирнов, П.М. Использование азота почвы и удобрений сельскохозяйственными культурами / П.М. Смирнов, Н.И. Дегтярева // Известия ТСХА. – 1973. – №3. – С. 71–79.

385. Смирнов, П.М. Проблемы азота в земледелии и результаты исследований с N15 / П. М. Смирнов // Агрохимия. –1977. – № 1. – С. 3–25.

386. Соколов, А. В. Агрохимия фосфора / А. В. Соколов. - М.: Изд-во Академии наук СССР, 1950. - 152 с.

387. Соколов, О. А. Экологическая безопасность и устойчивое развитие / О. А. Соколов, В. А. Черников. – Пущино : Пущинский Научный центр РАН, 1999. – 164 с. – EDN YLQAVW.

388. Соколов, О.А. Методология оценки азотного питания сельскохозяйственных культур / О.А.Соколов, В.М. Семенов // Агрохимия. – 1994. – № 9. – С. 137–149.

389. Соколов, О.А. Потоки азота в агрофитоценозе на эродированных почвах / О.А.Соколов, А.А. Завалин, В.Г. Сычев, Н.Я. Шмырева, Л.Н. Цуриков. – М.:ВНИИА. – 2015. – 96 с.

390. Сорока, А.В. Использование осадков сточных вод городских очистных сооружений при возделывании кукурузы / А. В. Сорока, А. С. Антонюк, Н. Ф. Терлецкая, А. Н. Гапонюк // Земледелие и селекция в Беларуси. – 2020. – № 56. – С. 160-167. – EDN LXCNBJ.

391. Способ определения валовых форм азота, фосфора и калия из одной навески пробы почвы. Патент Беларуси. №17070. 2013 (Способ определения валовых форм азота, фосфора и калия из одной навески пробы почвы)

392. Справочник агронома-эколога: учебное пособие /Титова В.И., Бусоргин В.Г., Варламова Л.Д., Дабахова Е.В., Ветчинников А.А., Саков А.П., Орлов П.В. – Нижний Новгород, - 2012. – 76 с.

393. Старых, С.Э. Изучение влияния длительного применения удобрений на органическое вещество дерново-подзолистой почвы методом ИК-спектроскопии / С. Э. Старых, А. Н. Куприянов, С. Л. Белопухов, М. А. Мазиров // Агрохимический вестник. – 2019. – № 2. – С. 17-22. – DOI 10.24411/0235-2516-2019-109999021. – EDN ZFALQT.

394. Стратегия использования осадков сточных вод и компостов на их основе в агрикультуре/Под редакцией Н.З. Милащенко // ВИУА им. Д.Н. Прянишникова. М.: Агроконсалт, 2002. 140 с.

395. Стулин, А. Ф. Продуктивность кукурузы в условиях длительного применения удобрений и содержание тяжелых металлов в почве и растениях / А. Ф. Стулин // . – 2017. – № 1. – С. 3-9. – EDN ZNEDIB.

396. Сулейманов, С.З. Азотный фонд почв Западной Сибири в зависимости от агротехнических приёмов и систематического применения удобрений / С.З. Сулейманов // Вестник науки КазТУ им. С.Сейфуллина. – 2011. № 2 (69). – С. 29-34.

397. Сусьян, Е.А. Влияние многолетнего применения разных форм азотных удобрений на уровень дыхания микробного сообщества и углеродно-азотный режим серой лесной почвы / Е. А. Сусьян, Н. Д. Ананьева, А. В. Трошин [и др.] // Агрохимия. – 2008. – № 6. – С. 5-12. – EDN IPKSPN.

398. Суховеева, О. Э. Поступление органического углерода в почву с послеуборочными остатками сельскохозяйственных культур / О. Э. Суховеева // Почвоведение. – 2022. – № 6. – С. 737-746. – DOI 10.31857/S0032180X22060120. – EDN BEBVWH.

399. Сушко, С. В. Эмиссия CO_2, микробная биомасса и базальное дыхание чернозема при различном землепользовании / С. В. Сушко, Н. Д. Ананьева, К. В. Иващенко, В. Н. Кудеяров // Почвоведение. – 2019. – № 9. – С. 1081-1091. – DOI 10.1134/S0032180X19090090. – EDN TBLUMU.

400. Сычев, В. Г. Калийный режим суглинистых дерново-подзолистых почв / В. Г. Сычев, Л. В. Никитина // Таврический вестник аграрной науки. – 2021. – № 2(26). – С. 233-243. – DOI 10.33952/2542-0720-2021-2-26-233-243.

401. Сычев, В. Г. Основные ресурсы урожайности сельскохозяйственных культур и их взаимосвязь / В. Г. Сычев. – Москва : ЦИНАО, 2003. – 228 с. – ISBN 5-85941-014-X. – EDN RZYLJN.

402. Сычев, В. Г. Приёмы оптимизации фосфатного режима почв в агротехнологиях / В. Г. Сычев, Н. А. Кирпичников ; Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии им. Д.Н. Прянишникова РАСХН. – Москва : Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии имени Д.Н. Прянишникова, 2009. – 176 с. – ISBN 978-5-9238-0096-8. – EDN QLAPRP.

403. Сычев, В. Г. Применение минеральных удобрений и их эффективность в различных зонах России / В. Г. Сычев, С. А. Шафран, И. В. Ильюшенко // Плодородие. – 2022. – № 3(126). – С. 3-6. – DOI 10.25680/S19948603.2022.126.01. – EDN UNJKHI.

404. Сычев, В. Г. Роль азота в интенсификации продукционного процесса сельскохозяйственных культур / В. Г. Сычев, О. А. Соколов, Н. Я. Шмырева. – Москва : Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии имени Д.Н. Прянишникова, 2009. – 424 с. – ISBN 978-5-9238-0107-1.

405. Сычев, В.Г. Биологическая активность почвы и урожайность яровой пшеницы при использовании органических и минеральных удобрений / В. Г. Сычев, Г. Е. Мерзлая, С. П. Волошин, И. В. Понкратенкова // Плодородие. – 2016. – № 6(93). – С. 2-4. – EDN XBGZIB.

406. Сычев, В.Г. Влияние длительного применения различных систем удобрения на органопрофиль основных зональных типов почв сообщение 1. Дерново-подзолистые почвы / В. Г. Сычев, Л. К. Шевцова, М. В. Беличенко [и др.] // Плодородие. – 2019. – № 2(107). – С. 3-7. – DOI 10.25680/S19948603.2019.107.01.

407. Сычев, В.Г. Влияние систем удобрения на содержание почвенного органического углерода и урожайность сельскохозяйственных культур: результаты длительных полевых опытов Географической сети России / В. Г. Сычев, А. Н. Налиухин, Л. К. Шевцова [и др.] // Почвоведение. – 2020. – № 12. – С. 1521-1536. – DOI 10.31857/S0032180X20120138.

408. Сычев, В.Г. Плодородие почв России и пути его регулирования / В.Г. Сычев, С.А. Шафран, С.Б. Виноградова // Агрохимия. 2020. № 6. С. 3-13. DOI 10.31857/S0002188120060125.

409. Сычев, В.Г. Современные направления исследований и результаты длительных полевых опытов Геосети / В.Г. Сычев, В. А. Романенков, Л. К. Шевцова, О. В. Рухович // Плодородие. – 2014. – № 5(80). – С. 2-5. – EDN SXJOYL.

410. Сычёв, В.Г. Углерод-секвестрирующая оценка различных систем удобрения и определение эмиссии N2O в длительном полевом опыте / В. Г. Сычев, А. Н. Налиухин, А. В. Ерегин [и др.] // Плодородие. – 2022. – № 6(129). – С. 73-77. – DOI 10.25680/S19948603.2022.129.19. – EDN SPOIUC.

411. Сычевский, М. Е. Динамика содержания подвижных форм ряда тяжелых металлов в почвах Крыма под влиянием 45-летнего применения минеральных удобрений / М. Е. Сычевский, А. Л. Винник, Ю. В. Святюк // Агроекологічний журнал. – 2012. – № 3. – С. 111-114. – EDN RUVJUH.

412. Танин, К.А. Баланс хлора, серы и калия в многолетнем опыте с формами калийных удобрений / К.А. Танин // Агрохимия. – 1965. – № 12. – С.43-50.

413. Тарвис, Т.В. Процессы иммобилизации - минерализации азота удобрений в подзолистых почвах / Т.В. Тарвис // Тез. докл. V делегатского съезда Всесоюз. общ-ва почвоведов. - Минск, 1977. - С. 53-54.

414. Терехова, В.А. Микробиологические показатели агродерново-подзолистых почв разной гумусированности при внесении тяжелых металлов и углеродсодержащих препаратов / В. А. Терехова, Е. В. Прудникова, С. А.

Кулачкова [и др.] // Почвоведение. – 2021. – № 3. – С. 372-384. – DOI 10.31857/S0032180X21030151. – EDN JDQEDU.

415. Тиньгаев, А.В. Оценка влияния осадка сточных вод на урожай зерна и микробиологическую активность почвы / А.В. Тиньгаев // Агрохимический вестник. – 2010. - №4. – С.38-40.

416. Титова, В. И. Методы оценки функционирования микробоценоза почвы, участвующего в трансформации органического вещества : научно-методическое пособие / В. И. Титова, А. В. Козлов ; Титова В. И., Козлов А. В. ; Нижегородская гос. с.-х. акад., Каф. агрохимии и агроэкологии. – Нижний Новгород : Нижегородская гос. с.-х. акад., 2012. – 63 с. – ISBN 978-5-903180-67-7. – EDN QLCOND.

417. Титова, В. И. Фосфор в земледелие Нижегородской области / В. И. Титова ; Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия. – Нижний Новгород : Волго-Вятская академия государственной службы, 2005. – 219 с. – ISBN 5-85152-428-6. – EDN QKXBKJ.

418.Ториков, В.Е. Влияние системы удобрения на агроэкологические свойства почвы, урожайность, содержание сырой клейковины, аминокислотного и элементного состава в зерне мягкой озимой пшеницы / В. Е.Ториков, О. В. Мельникова, В. В. Мамеев [и др.] // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. – 2016. – № 1(46). – С. 8-20. – EDN VRRIDD.

419. Трофимов, С. Н. Фосфатное состояние и изменение плодородия дерново-подзолистой почвы в длительных полевых опытах / С. Н. Трофимов, А. А. Коваленко // Агрохимия. – 2017. – № 8. – С. 3-15. – DOI 10.7868/S0002188117080014. – EDN ZAXONJ.

420. Туровский, И.С. Обработка осадков сточных вод / И.С. Туровский.- М.: Стройиздат, 1988.- 258 с.

421. Турчин, Ф.В. Азотное питание растений и применение азотных удобрений. Избранные труды / Ф.В. Турчин. – М.: Колос, 1972. – 336 с.

422. Турчин, Ф.В. Превращение азотных удобрений в почве и усвоение их растениями / Ф.В. Турчин // Агрохимия. – 1964. - № 3. – С. 3-19.

423. Тютюнов, С. И. Динамика подвижного калия в черноземе типичном в связи с различным уровнем интенсивности использования пашни / С. И. Тютюнов, А. П. Карабутов, В. Д. Соловиченко // Земледелие. – 2017. – № 8. – С. 7-10. – EDN YLVPYG.

424. Тютюнькова, М.В. Биологическая активность дерново-подзолистой супесчаной почвы в условиях применения нетрадиционных удобрений / М. В. Тютюнькова, Ю. В. Леонова, Т. А. Спасская, О. И. Сюняева // АгроЭкоИнфо. – 2019. – № 3(37). – С. 8. – EDN OCMRNX.

425. Тяжелые металлы в системе почва – растения – удобрения / Под общей редакцией М.М. Овчаренко. - М., 1997- 290 с.

426. Убугунов, В. Л. Оценка фитотоксичности свинца в дерново-подбуре / В. Л. Убугунов, В. О. Доржонова // Вестник Томского государственного университета. – 2010. – № 338. – С. 207-211. – EDN NBVGRV.

427. Убугунов, Л. Л. Содержание подвижных минеральных соединений фосфора в каштановых почвах Северной Монголии при использовании разных форм фосфорита / Л. Л. Убугунов, Б. Энхтуяа, М. Г. Меркушева // Почвоведение. – 2015. – № 6. – С. 731. – DOI 10.7868/S0032180X15060118. – EDN TXUIHR.

428. Убугунов, Л.Л. Калийный фонд аллювиальных почв Байкальского региона / Л.Л. Убугунов, В.И. Убугунова // Почвоведение. - 1999. - № 4. - С. 530–536.

429. Фадькин, Г. Н. Длительное применение различных форм азотных удобрений на серой лесной тяжелосуглинистой почве / Г. Н. Фадькин // Проблемы механизации агрохимического обслуживания сельского хозяйства. – 2012. – № 3. – С. 64-66.

430. Федосеев, А.П. Погода и эффективность удобрений / А.П. Федосеев. – Ленинград: Гидрометеоиздат, 1985. – 144 с.

431. Филимонова, И.В. Нефтяная промышленность России: региональная и организационная структура добычи, переработки и экспорта / И.В. Филимонова, В. Ю. Немов, М. В. Мишенин, И. В. Проворная // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2020. – № 4-5(173). – С. 53-63. – EDN EWFNZY.

432. Филон И.И., Шеларь И.А. Содержание калия в черноземе типичном при сельскохозяйственном освоении и длительном применении минеральных удобрений / И.И. Филон, И.А. Шеларь // Агрохимия. - 1999. - № 1. - С. 21–27.

433. Фокин, А.Д. Исследование процессов трансформации, взаимодействия и переноса органических веществ, железа и фосфора в подзолистой почве/ А.Д. Фокин: Автореф. дис. ... докт. биол. н. – М.,1975. – 28 с.

434. Фокин, А.Д. Состав органического вещества, состояние полуторных окислов и фосфатов в водах, дренирующих подзолистые почвы / А.Д. Фокин, В.А. Аргунова, И.С. Кауричев, И.М. Яшин // Изв. ТСХА. – 1973. – Вып.2. – С. 99-105.

435. Фрунзе, Н.И. Респираторная активность микробных сообществ пахотного чернозема Молдовы / Н. И. Фрунзе // Агрохимия. – 2018. – № 4. – С. 59-64. – DOI 10.7868/S0002188118040087. – EDN YWECHT.

436. Хабиров, И. К. Влияние органических удобрений на плодородие серых лесных почв Башкирии / И. К. Хабиров, Ф. Х. Хазиев, Ф. Я. Багаутдинов [и др.] // Почвоведение. – 1995. – № 4. – С. 465-471.

437. Хабиров, И. К. Состав, минерализация соединений азота и регулирование азотного состояния почв Южного Урала : специальность 03.00.27 : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора биологических наук / Хабиров Ильгиз Кавиевич. – Москва, 1992. – 43 с. – EDN ZJXAFR.

438. Хайдуков, К.П. Влияние длительного применения и последействия различных систем удобрения на кислотность, содержание и

качественный состав органического вещества почвы / К. П. Хайдуков, Л. К. Шевцова, А. А. Коваленко, А. А. Милютина // Плодородие. – 2014. – № 1(76). – С. 30-33. – EDN RUYBZH.

439. Харкевич, Л. П. Влияние осадков сточных вод и известкования на урожай и качество сена многолетних трав / Л. П. Харкевич // Агрохимический вестник. – 2011. – № 3. – С. 12-13. – EDN OGAQUD.

440. Харьков, Д.В. Результаты многолетних полевых опытов с формами калийных удобрений / Д.В. Харьков // Калийные удобрения. – М.: Колос, 1964. – С.57-92.

441. Химия тяжелых металлов, мышьяка и молибдена в почвах / Под ред. Н.Г. Зырина и Л.К Садовниковой.- М.: МГУ, 1985.- 208 с.

442. Хлыстовский, А.Д. Плодородие почвы при длительном применении удобрений и извести / А.Д. Хлыстовский. - М.: Наука, 1992. - 190 с.

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

444. Холодов, В.А. Строение гуминовых кислот почв зонального ряда по данным спектроскопии ЯМР 13 / В. А. Холодов, А. И. Константинов, А. В. Кудрявцев, И. В. Перминова // Почвоведение. – 2011. – № 9. – С. 1064-1073. (Kholodov V.A., Konstantinov A.I., Kudryavtsev A.V., Perminova I.V. Structure of humic acids in zonal soils from 13C-NMR data // Eurasian Soil Science. 2011. Vol. 44. P.976-983. doi:10.1134/S1064229311090043).

445. Хомяков, Д.М. Некоторые проблемы использования осадка сточных вод на удобрение / Д.М. Хомяков // Земледелие.-1991. - № 8. - С.62-65.

446. Хоренко, Л.А. Разработка приемов получения экологически безопасной продукции при выращивании картофеля на почвах с внесением

осадка сточных вод / Л.А. Хоренко: автореферат дис… к.с-х.н.: 03.00.16 / М.: МГУ, 2002.- 19 с.

447. Храмцов, И.Ф. Агроэкологическая оценка длительного применения удобрений на черноземных почвах Западной Сибири / И. Ф. Храмцов, М. С. Чекусов, Н. А. Воронкова [и др.] // Плодородие. – 2021. – № 3(120). – С. 104-107. – DOI 10.25680/S19948603.2021.120.20. – EDN ADJJYN.

448. Христенко, А. А. Динамика основных показателей фосфатного режима почв в процессе их экстенсивного использования / А. А. Христенко // Агрохимия. – 2003. – № 2. – С. 10-15. – EDN ONGEIT.

449. Цветнов, Е.В. Проблемы оценки нейтрального баланса деградации земель на уровне региона Российской Федерации / Е. В. Цветнов, О. Б. Цветнова, О. А. Макаров, Н. А. Марахова // . – 2020. – № 2. – С. 3-6. – DOI 10.24411/0044-3913-2020-10201. – EDN HYZEBY.

450. Цуркан, М.А. Городские отходы и способы их утилизации / М.А. Цуркан, О.Д. Архип, А.П. Русу. - Кишинев: Штиинца, 1989.- 134 с.

451. Чеботарев, Н. Т. Агроэкологическая оценка применения осадков сточных вод в качестве удобрений сельскохозяйственных культур / Н. Т. Чеботарев, Н. Д. Найденов, А. А. Юдин // Наука. Мысль: электронный периодический журнал. – 2016. – Т. 6, № 1-2. – С. 31-36. – EDN WBMHMZ.

452. Чеботарев, Н. Т. Влияние длительного применения систем удобрений на свойства почвы и продуктивность севооборотав условиях Европейского Севера России / Н. Т. Чеботарев, О. В. Броварова // Агрохимический вестник. – 2022. – № 5. – С. 24-28. – DOI 10.24412/1029-2551-2022-5-006. – EDN GZEARH.

453. Чеботарев, Н. Т. Влияние систематического применения органических и минеральных удобрений на плодородие дерново-подзолистой почвы и продуктивность культур кормового севооборота на Европейском Севере / Н. Т. Чеботарев, О. В. Броварова, П. И. Конкин // Российская сельскохозяйственная наука. – 2021. – № 1. – С. 34-37. – DOI 10.31857/S2500262721010087. – EDN JAJWBY.

454. Чеботарев, Н.Т. Влияние длительного применения удобрений на агрохимические показатели и баланс органического вещества в дерново-подзолистой почве республики Коми / Н.Т. Чеботарев, А.Г. Тулинов // Аграрный вестник Урала. - 2011 - № 2. - С. 11 - 12.

455. Чеботарев, Н.Т. Влияние осадков сточных вод на плодородие дерново-подзолистой почвы / Н.Т. Чеботарев // Химия в сельском хозяйстве.- 1997.- № 6.- С.18-19.

456. Черных, Н.А. Экотоксикологические аспекты загрязнения почв тяжелыми металлами / Н.А. Черных, Н.З. Милащенко, В.Ф. Ладонин. - М.: Агроконсалт, 1999. - 175 с.

457. Чижикова, Н. П. Изменение глинистых минералов в черноземах слитых глинистых под влиянием веществ различной природы в условиях модельного эксперимента / Н. П. Чижикова, Е. И. Годунова, С. К. Кубашев // Почвоведение. – 2008. – № 10. – С. 1268-1278. – EDN JSJSXH.

458. Чижикова, Н. П. Изменение минералогического состава тонких фракций почв под влиянием агротехногенеза / Н. П. Чижикова // Почвоведение. – 2002. – № 7. – С. 867-875. – EDN SIWMGN.

459. Чижикова, Н. П. Пространственное распределение глинистых минералов в агрочерноземах эрозионно-денудационных равнин Ставропольского края / Н. П. Чижикова, Е. И. Годунова, С. Н. Шкабарда [и др.] // Почвоведение. – 2012. – № 9. – С. 983. – EDN PANJGV.

460. Чимитдоржиева, Г. Д. Гумус и гуминовые кислоты черноземов Юго-Восточного Забайкалья (Читинская область) / Г. Д. Чимитдоржиева, Д. Б. Аюрова, Д. Б. Андреева // Почвоведение. – 2008. – № 2. – С. 168-172.

461. Чимитдоржиева, Э. О. Элементный состав гуминовых кислот почв бугров пучений и термокарстовых понижений Юга Витимского плоскогорья / Э. О. Чимитдоржиева, Г. Д. Чимитдоржиева, Ю. Б. Цыбенов // Успехи современного естествознания. – 2021. – № 10. – С. 32-36. – DOI 10.17513/use.37695.

462. Чумаченко, И.Н. Формы и реакции фосфора в почве / И.Н. Чумаченко // Фосфорные удобрения и условия их применения - Труды ВИУА. Вып. 50. - М., 1971.- С. 8 - 25.

463. Чухина, О.В. Моделирование зависимости продуктивности культур севооборота от гидротермического коэффициента, доз удобрений, содержания подвижных форм фосфора и калия в почве / О. В. Чухина, О. А. Шихова, О. А. Власова [и др.] // Молочнохозяйственный вестник. – 2022. – № 3(47). – С. 162-175. – DOI 10.52231/2225-4269_2021_3_162. – EDN UVKGNZ.

464. Чуян, О.Г. Модель системы удобрений в адаптивноландшафтном земледелии Центрального Черноземья / О. Г. Чуян // Достижения науки и техники АПК. – 2017. – Т. 31, № 12. – С. 5-8. – EDN YMEMTE.

465. Чуян, О.Г. Оценка роли климатических, почвенных и агротехнических факторов в формировании ресурсов продуктивности агроландшафтов Центрального Черноземья / О. Г. Чуян, Г. П. Глазунов, Л. Н. Караулова [и др.] // Метеорология и гидрология. – 2022. – № 6. – С. 79-87. – DOI 10.52002/0130-2906-2022-6-79-87. – EDN SIOTRT.

466. Шабанова, И. В. Содержание тяжелых металлов в зерне озимой пшеницы, выращиваемой на черноземе выщелоченном Западного Предкавказья / И. В. Шабанова // . – 2020. – Т. 10, № 11. – С. 99-102. – EDN OLZZWS.

467. Шаймухаметов, М. Ш. Влияние длительного применения удобрений на К-фиксирующую способность почв / М. Ш. Шаймухаметов, В. Л. Петрофанов // Почвоведение. – 2008. – № 4. – С. 494-506. – EDN IJKMCN.

468. Шаповалова, Н. Н. Агрохимическое состояние и биологическая активность почвы в последействии длительного применения минеральных удобрений / Н. Н. Шаповалова, Е. А. Менькина // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2018. – № 5(73). – С. 43-46. – DOI 10.25930/vaak-2r91. – EDN YNDPCX.

469. Шаповалова, Н. Н. Минералогический состав тонкодисперсных фракций и резервы калия в черноземе при внесении минеральных удобрений

/ Н. Н. Шаповалова, Н. П. Чижикова, Е. И. Годунова, И. Г. Сторчак // Плодородие. – 2018. – № 3(102). – С. 25-31. – DOI 10.25680/s19948603.2018.102.08. – EDN XQHEDJ.

470. Шарков, И. Н. Концепция воспроизводства гумуса в почвах / И. Н. Шарков // Агрохимия. – 2011. – № 12. – С. 21-27.

471. Шафран, С. А. Вклад минеральных удобрений в формирование урожайности полевых культур (сообщение 2). Фосфорные и калийные удобрения / С. А. Шафран // Агрохимия. – 2021а. – № 8. – С. 9-16. – DOI 10.31857/S0002188121080123. – EDN YCZDKS.

472. Шафран, С. А. Вклад минеральных удобрений в формирование урожайности полевых культур. Сообщение 1. Азотные удобрения / С. А. Шафран // Агрохимия. – 2021. – № 7. – С. 27-35. – DOI 10.31857/S0002188121070097. – EDN UBTICF.

473. Шевцова, Л. К. Трансформация органического вещества легкосуглинистой дерново-подзолистой почвы при длительном применении удобрений в льняном севообороте / Л. К. Шевцова, К. П. Хайдуков, Н. Н. Кузьменко // Агрохимия. – 2012. – № 10. – С. 3-12.

474. Шевцова, Л.К. Влияние длительного применения удобрений на состав, свойства и структурные характеристики гумусовых кислот основных типов почв. Сообщение 1 / Л. К. Шевцова, В. А. Черников, В. Г. Сычев [и др.] // Агрохимия. – 2019. – № 10. – С. 3-15. – DOI 10.1134/S0002188119100120. – EDN UAPMMI.

475. Шилова, Е.И. Доступность почвенным микроорганизмам фиксированного из удобрений аммония / Е.И. Шилова // Известия ТСХА: Научно-теоретический журнал Российского государственного аграрного университета - МСХА имени К.А. Тимирязева. – 1982. – Вып. 1. - С. 78-86.

476. Шилова, Е.И. Фиксация аммония из различных форм азотных удобрений и использование азота этих удобрений растениями / Е.И. Шилова // Известия ТСХА. – 1969. - № 4. – С. 137-143.

477. Шильников, И.А. Известкование как фактор урожайности и почвенного плодородия / И.А. Шильников, В.Г. Сычев, Н.А. Зеленов, Н.И. Аканова, Л.С. Федотова. - М.: ВНИИА, 2008. - 340с.

478. Шихова, Л. Н. Изменение кислотности и состава ППК при длительном внесении возрастающих доз минеральных удобрений в дерново-подзолистой почве / Л. Н. Шихова, О. А. Чеглакова // Российская сельскохозяйственная наука. – 2022. – № 6. – С. 32-36. – DOI 10.31857/S2500262722060072. – EDN MJSSGR.

479. Шихова, Л. Н. Содержание и динамика тяжелых металлов в почвах Северо-Востока Европейской части России / Л. Н. Шихова. – Автореф. дисс. докт. с/х н. С.-Петербург. – 2005. – 46 с.

480. Шкляев, А.С. Климат Пермской области // А.С. Шкляев, В.А. Балков.- Пермь: Пермское книжное издательство, 1963.- 190 с.

481. Шконде, Э.И. О природе и подвижности почвенного азота / Э.И. Шконде И.Е. Королева // Агрохимия. - 1964. - № 10. - С. 17-35.

482. Шмырева, Н. Я. Использование растениями азота удобрений и его миграция в дерново-подзолистых почвах склонов Центрального Нечерноземья : специальность 06.01.04 "Агрохимия" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата биологических наук / Шмырева Нина Яковлевна. – Москва, 1996. – 21 с. – EDN ZJEVCD.

483. Шуравилин, А.В. Применение осадка сточных вод для удобрения почв / А.В. Шуравилин, В.С. Меркурьев, Н.В. Сурикова // Мелиорация и водное хозяйство.- 2006.- № 4.- С. 42-46.

484. Шустикова, Е. П. Азотный режим чернозема обыкновенного и продуктивность сельскохозяйственных культур в последействии различных доз азотных удобрений / Е. П. Шустикова, Н. Н. Шаповалова // Агрохимия. – 2014. – № 2. – С. 20-25. – EDN RYBINV.

485. Эмер, Н.Р. Ежесуточная динамика численности и активности азотфиксирующих бактерий на участках залежной и интенсивно

возделываемой почвы / Н.Р. Эмер, А.М. Семенов, В.В. Зеленев [и др.] // Почвоведение. – 2014. – № 8. – С. 963. – DOI 10.7868/S0032180X14080024.

486. Энжеринскас, В.П. Исследование миграции кальция в известкованных почвах западной части Литовской ССР. / В.П. Энжеринскас: Расширенный автореф дисс на соис. уч. ст. канд. с-х наук (06.01.04), Каунас, 1975. - 63 с. Литовская с.-х академия.

487. Эседуллаев, С. Т. Особенности аккумуляции азота многолетними бобовыми травами в чистых и смешанных посевах в Верхневолжье / С. Т. Эседуллаев, Н. В. Шмелева // Плодородие. – 2016. – № 6(93). – С. 16-18.

488. Юферова, Л.К. Качественный состав гумуса и формы азота в главнейших почвах Пермской области / Л.К. Юферова: Автореф. на соиск. уч.степ. канд. с.-х. наук.- Пермь.- 1969. -21 с.

489. Ягодин, Б.А. Тяжелые металлы в системе почва-растение / Б.А. Ягодин, В.В. Кидин, Э.А. Цвирко // Химия в сельском хозяйстве. - 1996. - № 5. - С. 43–45.

490. Якименко, В. Н. Влияние длительного применения калийных удобрений на агрохимические свойства почвы / В. Н. Якименко // Агрохимия. – 2012. – № 12. – С. 41-46.

491. Якименко, В. Н. Влияние калийного состояния почвы на ее фонд минерального азота / В. Н. Якименко // Агрохимия. – 2008. – № 6. – С. 13-17.

492. Якименко, В. Н. Влияние калийных удобрений на содержание макроэлементов и галогенов в картофеле / В. Н. Якименко, Г. А. Конарбаева // Агрохимия. – 2015. – № 1. – С. 50-56.

493. Якименко, В. Н. Диагностика калийного состояния почв лесостепи Западной Сибири / В. Н. Якименко, В. С. Бойко // Почвы и окружающая среда. – 2019. – Т. 2, № 2. – С. 3. – DOI 10.31251/pos.v2i2.74. – EDN WJFMTX.

494. Якименко, В. Н. Изменение содержания калия и магния в профиле почвы длительного полевого опыта / В. Н. Якименко // Агрохимия. – 2019а. – № 3. – С. 19-29. – DOI 10.1134/S0002188119030153.

495. Якименко, В. Н. Изменение содержания форм калия по профилю почвы при различном калийном балансе в агроценозах / В. Н. Якименко // Агрохимия. – 2007. – № 3. – С. 5-11. – EDN IAAPNX.

496. Якименко, В. Н. Калий в агроценозах Западной Сибири / В. Н. Якименко. – Новосибирск : Издательство Сибирского отделения РАН, 2003. – 231 с. – ISBN 5-7692-0570-9. – EDN YXDOHO.

497. Якименко, В. Н. Накопление компонентов калийных удобрений в почве длительного полевого опыта / В. Н. Якименко // Плодородие. – 2019. – № 3(108). – С. 36-39. – DOI 10.25680/S19948603.2019.108.11.

498. Якименко, В. Н. Фиксация калия и аммония почвой агроценозов / В. Н. Якименко // Агрохимия. – 2011. – № 8. – С. 3-7. – EDN NYICEN.

499. Якименко, В. Н. Фонд минерального азота почвы в зависимости от баланса калия в агроценозах / В. Н. Якименко // Плодородие. – 2010. – № 2(53). – С. 29-31.

500. Яковлев, В. Б. Статистика. Расчеты в Microsoft Excel : учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности 060800 "Экономика и упр. на предприятии АПК" / В. Б. Яковлев ; В. Б. Яковлев. – Москва : КолосС, 2005. – (Учебники и учебные пособия для студентов высших учебных заведений). – ISBN 5-9532-0280-6. – EDN QOORFD.

501. Яковлева, Л. В. Влияние длительного применения удобрений на калийный режим дерново-подзолистой почвы / Л. В. Яковлева, В. А. Поляков, С. С. Жданов // Владимирский земледелец. – 2018. – № 4(86). – С. 14-20. – DOI 10.24411/2225-2584-2018-10034. – EDN YQOLID.

502. Яковлева, Л. В. Ионообменная способность и миграция веществ в дерново-подзолистых пахотных почвах / Л. В. Яковлева, Е. А. Николаева // Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии. – 2018. – № 5(69). – С. 15-20. – EDN YAQVHF.

503. Яковлева, Л. В. Миграция оснований в дерново-подзолистых почвах при применении минеральных удобрений / Л. В. Яковлева, А. Н. Небольсин // Плодородие. – 2009. – № 5(50). – С. 12-13. – EDN KYWYNB.

504. Якуцени, С. П. Распространенность углеводородного сырья, обогащенного тяжелыми элементами-примесями. Оценка экологических рисков / С. П. Якуцени ; С. П. Якуцени. – Санкт-Петербург : Недра, 2005. – 370 с. –EDN QKGGAV.

505. Ямалтдинова, В. Р. Влияние систем удобрений на продуктивность полевого севооборота и свойства дерново-мелкоподзолистой тяжелосуглинистой почвы Вятско-Камской земледельческой провинции : специальность 06.01.04 "Агрохимия" : диссертация на соискание ученой степени кандидата сельскохозяйственных наук / Ямалтдинова Венера Рафхатовна. – Пермь, 2011. – 255 с. – EDN QFSNRZ.

506. Allam, M. Influence of Organic and Mineral Fertilizers on Soil Organic Carbon and Crop Productivity under Different Tillage Systems: A Meta-Analysis / M. Allam E. Radicetti, V. Quintarelli, V. Petroselli, S. Marinari, R. Mancinelli // Agriculture. – 2022. – №12. – P. 464 - https://doi.org/10.3390/ agriculture12040464.

507. Anderson, J.P.E. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils / J.P.E. Anderson, K.H. Domsch // Soil Biol. Biochem. - 1978. - V.10 - № 3. - P. 215-221.

508. Andrews, S.S. Designing a soil quality assessment tool for sustainable agroecosystem management / S.S. Andrews, C.R. Carroll // Ecological Applications. - 2001. - V.11. - P. 1573-1585. - DOI: 10.2307/3061079.

509. Babur, E. Effects of parent material on soil microbial biomass carbon and basal respiration within young afforested areas / E. Babur // Scand. J. Forest Res. - 2019. - V. 34(2). - P. 94–101.

510. Baveye, P.C. The (bio) chemistry of soil humus and humic substances: why is the “new view” still considered novel after more than 80 years? / P.C. Baveye, M. Wander // Frontiers in Environmental Science. - 2019. - V.7 (27). - P. 1-6. - DOI:10.3389/fenvs.2019.00027.

511. Börjesson, G. Soil fertility effects of repeated application of sewage sludge in two 30-year-old field experiments / G. Börjesson, T. Kätterer // Nutr

Cycl Agroecosyst. – 2018. – V. 112. P. 369–385. - https://doi.org/10.1007/s10705-018-9952-4

512. Bowen, H.J. Trace Elements in Biochemistry / H.J. Bowen. - N.-Y.–L.:Acad. Pr., 1966. - 241 p.

513. Brogowski, Z. Distribution of phosphorus in granulometric fractions of cambisol developed from morainic loam / Z. Brogowski, J. Chojnicki // Journal of elementology.-2020.-V.25. - Is.1.-P.181-191.-DOI: 10.5601/jelem.2019.24.3.1902.

514. Ceja-Navarro, J.A. Phylogenetic and multivariate analyses to determine the effects of different tillage and residue management practices on soil bacterial communities / J.A. Ceja-Navarro, F.N. Rivera-Orduña, L. Patiño-Zúñiga, A. Vila-Sanjurjo, J. Crossa, B. Govaerts, L. Dendooven // Applied and Environmental Microbiology – 2010. – V. 76(11). – P. 3685-3691. - DOI: 10.1128/AEM.02726-09.

515. Chen, Y. Changes in bacterial community of soil induced by long-term straw returning / Y. Chen, L. Xin, J. Liu, M. Yuan, S. Liu, W. Jiang, J. Chen // Scientia Agricola. – 2017. –V. 74(5). – P. 349-356. - DOI: 10.1590/1678-992x-2016-0025.

516. Christopher, S.F. Nitrogen management affects carbon sequestration in North American cropland soils / S.F. Christopher, R. Lal // Critical Reviews in Plant Sciences. - 2007. - V. 26. - P. 45-64.

517. Ciapparelli, I.C. Phosphorus downward movement in soil highly charged with cattle manure / I.C. Ciapparelli, A.F. de Iorio, A.R. Garcia // Environmental earth sciences. - 2016. - V. 75. - Is. 7. - P. 568. - DOI: 10.1007/s12665-016-5284-3.

518. Cotrufo, M.F. Formation of soil organic matter via biochemical and physical pathways of litter mass loss / M.F. Cotrufo, J.L. Soong, A.J. Horton, E.E. Campbell, M.L. Haddix, D.H. Wall, W.J. Parton // Nature Geoscience. - 2015. - V.8. - P. 776–779 - DOI: 10.1038/ngeo2520.

519. Cramer, M. D. Phosphate as a limiting resource / M. D. Cramer // Plant Soil. - 2010. - V. 334. - № 1. - P. 10. - DOI: 10.1007/s11104-010-0497-9.

520. Czarnecki, S. Influence of long-term mineral fertilization on metal contents and properties of soil samples taken from different locations in Hesse Germany / S. Czarnecki, R.A. During // Soil. - 2015. - № 1. - P. 23–33.

521. Dai, S. Effects of long-term fertilization on soil gross N transformation rates and their implications / S. Dai, J. Wang, Y. Cheng, J. Zhang, Z. Cai // Journ al of Integrative Agriculture. - 2017. - V. 16(12). - P. 2863–2870. - DOI 10.1016/S2095-3119(17)61673-3.

522. Degrune, F. Assessing microbial diversity changes associated with different tillage and crop residue managements: study case in a loamy soil / F. Degrune: Doctoral dissertation. Université de Liège, Liège, Belgique, 2017.

523. Doran, J.W. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil guality / J.W. Doran // Applied Soil Ecology. - 2000. - V.15. - P. 3-15. - DOI: 10.1016/S0929-1393(00)00067-6.

524. Dworkin, J. Exit from dormancy in microbial organisms / J. Dworkin, I. M. Shah // Nat Rev Microbiol. – 2010 - № 8. – P. 890–896.

525. Fernandes, S.A.P. Effect of sewage sludge on microbial biomass, basal respiration, metabolic quotient and soil enzymatic activity / S.A.P. Fernandes, W. Bettiol, C.C. Cerri // Appl. Soil Ecol. - 2005. - V. 30(1). - P. 65–77.

526. Firmano, R.F. Potassium reserves in the clay fraction of a tropical soil fertilized for three decades / R.F. Firmano, V. Melo, C.R. Montes, A. de Oliveira, C. de Castro, L.R.F. Alleoni // CLAYS AND CLAY MINERALS. - 2020. - V. 68. - № 3. - С. 237-249. - DOI: 10.1007/s42860-020-00078-6.

527. Francioli, D. Mineral vs. Organic Amendments: Microbial Community Structure, Activity and Abundance of Agriculturally Relevant Microbes Are Driven by Long-Term Fertilization Strategies / D. Francioli, E. Schulz, G. Lentendu, T. Wubet, F. Buscot and T. Reitz // Front. Microbiol. – 2016. – V. 7. – P. 1446 - DOI: 10.3389/fmicb.2016.01446.

528. Fresne Fresne, M. Soil chemical and fertilizerin fluences onsoluble and medium-siz edcolloidal phosphor usinagricultura lsoils / M. Fresne Fresne, P. Jordan, O. Fenton, P.E. Mellander, K. Daly // Science of the total environment. - 2021. - V.754. - No.142112. - DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142112.

529. Gao, M. Phosphorus Recovery from Excess Sludge: Possibility and Future / M. Gao, L.P. Qiu, K. Xie, S.B. Zhang, J.B. Wang // PROCEEDINGS OF THE 2015 4TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUSTAINABLE ENERGY AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING. AER-Advances in Engineering Research. - 2016. - V. 53. - P. 488-491.

530. Geisseler, D. Pathways of nitrogen utilization by soil microorganisms – A review / D. Geisseler, W.R. Horwath, R.G. Joergensen, B. Ludwig // Soil Biol. Biochem. - 2010. - V. 42. - P. 2058– 2067.

531. Gonzalez-Quiñones, A. Soil microbial biomass – Interpretation and consideration for soil monitoring / A. Gonzalez-Quiñones, E.A. Stockdale, N.C. Banning, F.C. Hoyle, Y. Sawada, A.D. Wherrett, D.L. Jones, D.V. Murphy // Soil Research - 2011. - V. 49. - P. 287–304.

532. Grzebisz, W. Potassium fertilization as a driver of sustainable management of nitrogen in potato (Solanum tuberosum L.) / W. Grzebisz, W. Szczepaniak, J. Bocianowski // FIELD CROPS RESEARCH. - 2020. - V. 254. - Номер статьи: UNSP 107824. - DOI: 10.1016/j.fcr.2020.107824.

533. Hassink, J. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles / J. Hassink // Plant and Soil. - 1997. - V. 191. - P. 77–87.

534. Horwath, W.R. The role of the soil microbial biomass in cycling nutrients / W.R. Horwath // Microbial Biomass: A Paradigm Shift in Terrestrial Biogeochemistry. World scientific, 2017. - P. 41–66.

535. Insam, H. Relationship between soil organic carbon and microbial biomass on chronosequences of reclamation sites // H. Insam, K.H. Domsch // Microb. Ecol. - 1988. - № 15. - P. 177-188.

536. Jakobsen, S.T. Interaction between plant nutrients .3. Antagonism between potassium, magnesium and calcium / S.T. Jakobsen // ACTA AGRICULTURAE SCANDINAVICA SECTION B-SOIL AND PLANT SCIENCE. - 1993. - T. 43. №1. - P.1-5. - DOI: 10.1080/09064719309410223.

537. Jenkinson, D.S. Microbial biomass in soil: measurement and turnover / D.S. Jenkinson, J.N. Ladd, E.A. Paul, J.N. Ladd // Soil Biochemistry. N.Y.: Marcel Dekker, 1981. - P.415–471.

538. Jin, N. Reduced Chemical Fertilizer Combined With Bio-Organic Fertilizer Affects the Soil Microbial Community and Yield and Quality of Lettuce / N. Jin, L. Jin, S. Wang, J. Li, F. Liu, Z. Liu, S. Luo, Y. Wu, J. Lyu, & J. Yu // Frontiers in Microbiology. – 2022. - https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.863325.

539. Johnston, A.E. Soil and Plant Phosphate Paris: International Fertilizer Industry Association (IFA) / A.E. Johnston. - 2000. - 54 p.

540. Jonczak, J. Content and profile distribution of phosphorus fractions in arable and forest Cambic Chernozems / J. Jonczak, V. Simansky, N. Pollakova // Sylwan. - 2015. - V. 159. - No. 11. - P. 931–939.

541. Kabata-Pendias, A. Trace Elements in Soils and Plants / A. Kabata-Pendias. - 4th ed. Boca Raton: Taylor and Francis Group, 2011. - 534 p.

542. Kalkhoran, S.S. Optimal lime rates for soil acidity mitigation: impacts of crop choice and nitrogen fertiliser in Western Australia / S.S. Kalkhoran, D.J. Pannell, T. Thamo, M. Polyakov, & B. White // Crop & Pasture Science. -2020. – V. 71. – P. 36-46.

543. Kallenbach, C. Controls over soil microbial biomass responses to carbon amendments in agricultural systems: a meta-analysis / C. Kallenbach, A.S. Grandy // Agriculture, Ecosystems & Environment. – 2011. – V. 144(1). – P. 241-252. - DOI: 10.1016/j.agee.2011.08.020.

544. Kecskesova, S. Phosphorus Recovery from The Sewage Sludge and Sewage Sludge Ash / S. Kecskesova, Z. Imreova, B. Kozarova, M. Drtil // Chemicke listy. - 2020. - V. 114. - № 5. - P. 341-348.

545. Khan, S.A. The potassium paradox: Implications for soil fertility, crop production and human health / S.A. Khan, R.L. Mulvaney T.R. Ellsworth // Renewable Agriculture and Food Systems. - 2014. – V. 29(1). P. 3–27. - DOI:10.1017/S1742170513000318.

546. Kleber, M. Advances in understanding the molecular structure of soil organic matter: Implications for interactions in the environment / M. Kleber, M.G. Johnson // Adv. Agron. - 2010. - V. 106. - P. 77–142.

547. Knoepp, J.D. Biol. ogical indices of soil quality: an ecosystem case study of their use / J.D. Knoepp, D.C. Coleman, D.A. Crossley, J.S. Clark // Forest Ecology and Management. - 2000. - V.138. - P. 357-368.

548. Kögel-Knabner, I. Soil organic matter in major pedogenic soil groups / I. Kögel-Knabner, W. Amelung // Geoderma. - 2021. - V. 384. - P. 114785.

549. Körschens, M. Soil – Humus – Climate. Practically relevant results of 79 long-term field experiments / M. Körschens // Vortrag zum 2. Symp. “Wahrnehmung und Bewertung von Bödenin der Gesellschaft am 12 Oktober 2018 im UFZ Leipzig”. 2018. 12 p.

550. Körschens, M. Soil organic matter – climate change – carbon sequestration? The importance of long-term field experiments / M. Körschens, J. Kubát // 60th Anniversary of long-term field experiments in the Czech Republic. Prague: VÚRV, 2015. - P. 43-50.

551. Labeda, D.P. Phylogenetic study of the speCles within the family Streptomycetaceae / D.P. Labeda, M. Goodfellow, R. Brown, A.C. Ward, B. Lanoot, M. Vanncanneyt, T. Tamura // Anton. Leeuw. Int. J. G. - 2012. - V. 1. 101. - P. 73–104. - https://doi.org/10.1007/s10482-011-9656-0

552. Lal, R. Digging deeper: A holistic perspective of factors affecting soil organic carbon sequestration in agroecosystems / R. Lal // Glob Chang Biol. – 2018. – V. 24(8). – P. 3285-3301. - DOI: 10.1111/gcb.14054. Epub 2018 Mar 25. PMID: 29341449.

553. Lal, R. Intensive agriculture and the soil carbon pool / R. Lal // Journal of Crop Improvement.–2013.–V.27.-735–751. https://doi.org/10.1080/15427528.2013.845053.

554. Lal, R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change/ R. Lal // Geoderma. – 2004. – V. 123. – Is. 1–2. – P. 1-22. - https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.01.032.

555. Lazcano, C. Short-term effects of organic and inorganic fertilizers on soil microbial community structure and function / C. Lazcano, M. Gómez-Brandón, P. Revilla et al. // Biol Fertil Soils. -2013. – V. 49 – P. 723–733. - https://doi.org/10.1007/s00374-012-0761-7.

556. Lehmann, J. The contentious nature of soil organic matter / J. Lehmann, M. Kleber // Nature. - 2015. - V. 528. - P. 60-68.

557. Li, C.L. Forms, transformations and availability of phosphorus after 32 years of manure and mineral fertilization in a Mollisol under continuous maize cropping / C.L. Li, P. Zang, J.J. Zhang, P. Zhu, L.C. Wang // Archives of agronomy and soil science. - 2020. - DOI: 10.1080/03650340.2020.1787385.

558. Li, T. Soil reserves of potassium: release and availability to lolium perenne in relation to clay minerals in six cropland soils from eastern China / T. Li, H.Y. Wang, X.Q. Chen, J.M. Zhou // LAND DEGRADATION & DEVELOPMENT. - 2017. - V. 28 - № 5. - P. 1696-1703 DOI: 10.1002/ldr.2701.

559. Liebmann, P. Relevance of aboveground litter for soil organic matter formation – a soil profile perspective/ P. Liebmann, P. Wordell-Dietrich, K. Kalbitz, R. Mikutta, F. Kalks, A. Don, S.K. Woche, L.R. Dsilva, G. Guggenberger // https://doi.org/ Preprint. Discussion started: 2 January 2020. https://doi.org/10.5194/bg–2019–465.

560. Liu, X. Effects of agricultural on soil organic matter and carbon transformation – a review / X. Liu, S.J. Herbert, A.M. Hashemi, X. Zhang, G. Ding // Plant soil environ. - 2006 (12). - V. 52. - P. 531-543.

561. Luo, P. Influence of long-term fertilization on soil microbial biomass, dehydrogenase activity, and bacterial and fungal community structure in a brown

soil of northeast China / P. Luo, X. Han, Y. Wang, M. Han, H. Shi, N. Liu, et al. // Ann. Microbiol. – 2015. – V.65. – P. 533–542. - DOI: 10.1007/s13213-014-0889-9

562. Magdoff, F. Soil organic matter management strategies // Soil organic matter in sustainable agriculture / F. Magdoff, R.R. Weil. - Boca Raton etc: CRC Press, 2004. - P. 45-65.

563. Maltas, A. The effects of organic and mineral fertilizers on carbon sequestration, soil properties, and crop yields from a long-term field experiment under a Swiss conventional farming system / A. Maltas, H. Kebli, H.R. Oberholzer, P. Weisskopf, S. Sinaj // Land Degrad Dev. – 2018. V. 29. P. 926–938. - https://doi.org/10.1002/ldr.2913.

564. Malý, S. Effects of long-term mineral fertilization on microbial biomass, microbial activity, and the presence of r- and K-strategists in soil / S. Malý, J. Královec, D. Hampel // Biology and Fertility of Soils. – 2009. – V. 45. – P. 753-760. DOI: 10.1007/s00374-009-0388-5.

565. Mañas, P. Sewage Sludge to Fertilise Durum Wheat / P. Mañas, J. de las Heras // Effects on Crop and Soil. Humic Substance [Working Title]. – 2021. - DOI: 10.5772/intechopen.95896.

566. Menezes-Blackburn, D. Opportunities for mobilizing recalcitrant phosphorus from agricultural soils: a review / D. Menezes-Blackburn, C. Giles, T. Darch, T.S. George, M. Blackwell, M. Stutter, C. Shand, D. Lumsdon, P. Cooper, R. Wendler // Plant and soil. - 2018. - V. 427 (1-2). - P. 5-16. - DOI: 10.1007/s11104-017-3362-2.

567. Meng, X.D. Improved utilization of phosphorous from sewage sludge (as Fertilizer) after treatment by Low-Temperature combustion / X.D. Meng, Q.X. Huang, H.P. Gao, K.R. Tay, J.H. Yan // WASTE MANAGEMENT. - 2018. - V. 80. - P. 349-358. - DOI: 10.1016/j.wasman.2018.09.034.

568. Menšík, L. The effect of application of organic manures and mineral fertilizers on the state of soil organic matter and nutrients in the long-term field experiment / L. Menšík, L. Hlisnikovský, L. Pospíšilová et al. // J Soils Sediments. – 2018. – V. 18. – P. 2813–2822. - https://doi.org/10.1007/s11368-018-1933-3.

569. Menšík, L. The State of the Soil Organic Matter and Nutrients in the Long-Term Field Experiments with Application of Organic and Mineral Fertilizers in Different Soil-Climate Conditions in the View of Expecting Climate Change / L. Menšík, L. Hlisnikovský & E. Kunzová // Organic Fertilizers - History, Production and Applications. – 2019. - DOI: 10.5772/intechopen.86716.

570. Meyer, G. Plant-Available Phosphorus in Highly Concentrated Fertilizer Bands: Effects of Soil Type, Phosphorus Form, and Coapplied Potassium / G. Meyer, M.J. Bell, C.L. Doolette, Zh. YQ. Brunetti, E. Lombi, P.M. Kopittke // JOURNAL OF AGRICULTURAL AND FOOD CHEMISTRY. - 2020. V. 68. № 29. P. 7571-7580. - DOI: 10.1021/acs.jafc.0c0128.

571. Montelius, M. Experimental evidence of large changes in terrestrial chlorine cycling following altered tree species composition / M. Montelius, Y. Thiry, L. Marang, J. Ranger et al. // Environ. Sci. Technol. - 2015. - V. 49. - P. 4921–4928.

572. Morris, S. J. “The ecology of the soil biota and their function,” in Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry / S. J. Morris and C. B. Blackwood. - ed. E. A. Paul (London: Elsevier). – 2015. – P. 273–309. - DOI: 10.1016/B978-0-12-415955-6.00010-4.

573. Mu, H.Y. Heavy Metal Contents in Animal Manure in China and the Related Soil Accumulation Risks. Huan Jing Ke Xue / H.Y. Mu, Z. Zhuang, Y.M. Li, Y.H. Qiao, Q. Chen, J. Xiong, L.L. Guo, R.F. Jiang, H.F. Li. – 2020. – V. 41(2). – P. 986-996. - DOI: 10.13227/j.hjkx.201903078. PMID: 32608761.

574. Olk, D.C. Environmental and agricultural relevance of humic fractions extracted by alkali from soils and natural waters / D.C. Olk, P.R. Bloom, E.M. Perdue, D.M. McKnight, Y. Chen, A. Farenhorst, N. Senesi, Y.P. Chin, P. Schmitt-Kopplin, N. Hertkorn, M. Harir // J. Environ. Qual. - 2019. - V. 48(2). - P. 217-232. - DOI: 10.2134 / jeq2019.02.0041.

575. Ott, C. The European phosphorus balance / C. Ott, H. Rechberger //Resources, Conservation and Recycling. - 2012. - V. 60. - P. 159-172. - DOI: 10.1016/j.resconrec.2011.12.007.

576. Piccolo, A. The supramolecular structure of humus substances: A novel understandind of humus chemistry and implications soil science / A. Piccolo // Advances in agronomy. - 2002. - V.75. - P. 57-134. - DOI:10.1016/s0065-2113(02)75003-7.

577. Prosser, J.I. Relative contributions of archaea and bacteria to aerobic ammonia oxidation in the environment / J.I. Prosser, G.W. Nicol // Environ. Microbiol. – 2008. - Vol.10. P.2931–2941. - doi:10.1111/j.1462-2920.2008.01775.x.

578. Ritz, K. Selecting biological indicators for monitoring soils: A framework for balancing scientific and technical opinion to assist policy development / K. Ritz, H.I.J. Black, C.D. Campbell, J.A. Harris, C. Wood // Ecological Indicators. - 2009. - V.9. - P. 1212–1221. - https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2009.02.009.

579. Rusakova, I. V. Microbiological and Ecophysiological parameters of sod-podzolic soil upon long-term application of straw and mineral fertilizers, the correlation with the yield / I. V. Rusakova // Agricultural Biology. – 2020. – Vol. 55. – No 1. – P. 153-162. – DOI 10.15389/agrobiology.2020.1.153rus. – EDN NNATUV.

580. Schaeffer A. From humic substances to soil organic matter–microbial contributions. In honor of Konrad Haider and James P. Martin for their outstanding research contribution to soil science / A. Schaeffer, P. Nannipieri, M. Kästner, B. Schmidt, J. Botterweck // J. Soils Sediments. - 2015. - V. 15. - P. 1865–1881. - https://doi.org/10.1007/s11368-015-1177-4.

581. Schmidt, M.W.I. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property / M.W.I. Schmidt, M.S. Torn, S. Abiven, T. Dittmar, G. Guggenberger, I.A. Janssens, M. Kleber et al. // Nature. - 2011. - V. 478. - P. 49–56.

582. Semenov, V.M. Humification and nonhumification pathways of the organic matter stabilization in soil: a review / V.M. Semenov, A.S. Tulina, N.A. Semenova, L.A. Ivannikova // Eurasian Soil Science. - 2013. - V. 46. - №4. - P. 355-368. - DOI:10.1134/S106422931304011X.

583. Six, J. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils / J. Six, R.T. Conant, E.A. Paul, K. Paustian // Plant and Soil. - 2002. - V. 241. - P. 155–176. - https://doi.org/10.1023/A:1016125726789.

584. Sohail, S. Influence of Sewage Sludge and Heavy Fertilization on Nitrate Leaching in Soils: An Overview / S. Sohail, M. Fraz Ali, U. Zulfiqar, et al. // Soil Contamination - Recent Advances and Future Perspectives [Working Title]. IntechOpen. – 2022. - DOI: 10.5772/intechopen.107056.

585. Stevenson, F.J. Humus Chemistry, Genesis, composition, reactions / F.J. Stevenson. - N.Y.: John Wiley & Sons, 1994. - 512 p.

586. Stockmann, U. The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon / U. Stockmann, M.A. Adams, J.W. Crawford, D.J. Field, N. Henakaarchchi, M. Jenkins, B. Minasny, A.B. McBratney, V.R. de Courcelles, K. Singh, I. Wheeler, L. Abbott, D.A. Angers, J. Baldock, M. Bird, P.C. Brookes, C. Chenu, J.D. Jastrow, R. Lal, J. Lehmann, A.G. O'Donnell, W.J. Parton, D. Whitehead, M. Zimmermann // Agricult. Ecosyst. Environ. 2013. V. 164. P. 80–99.

587. Strohl, W.R. Antimicrobials / W.R. Strohl // Microbial Diversity and Bioprocessing / Ed. Bull A.T, Washington DC: American Society for Microbiology, 2004. - P. 336–355.

588. Sui, N. Comparative effects of crop residue incorporation and inorganic potassium fertilisation on apparent potassium balance and soil potassium pools under a wheat-cotton system / N. Sui, C.R. Yu, G.L. Song, F. Zhang, R.X. Liu, C.Q. Yang, Y.L. Meng, Z.G. Zhou // Soil research. - 2017. – V. 55. № 8. P. 723-734. - DOI: 10.1071/SR16200.

589. Sutton, R. Molecular structure in soil humic substances: the new view / R. Sutton, G. Sposito // Environ. Sci. Technol. - 2005. - V. 39. - P. 9009–9015.

590. Swift, R.S. Organic matter characterization (chap 35) / R.S. Swift // Methods of soil analysis madison, wi: soil science society of America, 1996. - Part 3. - P. 1018-1020.

591. Szara E., Sosulski T., Szymanska M. Soil phosphorus sorption properties in different fertilization systems / E. Szara, T. Sosulski, M. Szymanska // Plant soil and environment. - 2019. - V. 65 (2). - P. 78-82. - DOI: 10.17221/696/2018-PSE.

592. Tate, K.R. Microbial Biomass: A Paradigm Shift in Terrestrial Biogeochemistry / K.R. Tate (ed.) // World Scientific. - 2017. - https://doi.org/10.1142/q0038/

593. Thong, Z.W. Molecular design of nanofiltration membranes for the recovery of phosphorus from sewage sludge / Z.W. Thong, Y. Cui, Y.K. Ong, T.S. Chung // ACS SUSTAINABLE CHEMISTRY & ENGINEERING. - 2016. - V. 4 (10). - P. 5570-5577. - DOI: 10.1021/acssuschemeng.6b01299.

594. Ugulu, I. Effects of organic and chemical fertilizers on the growth, heavy metal/metalloid accumulation, and human health risk of wheat (Triticum aestivum L.) / I. Ugulu, K. Ahmad, Z.I. Khan, M. Munir, K. Wajid, H. Bashir // Environ Sci Pollut Res Int. - 2021 – V. 28(10). – P. 12533-12545. - DOI: 10.1007/s11356-020-11271-4.

595. 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. - V.49. - P. 518-523. - DOI: 10.1134/S1064229315030138.

596. von Lützow, M. Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions – a review / M. von Lützow, I. Kögel-Knabner, K. Ekschmitt, H. Flessa, G. Guggenberger, E. Matzner, B. Marschner // Eur. J. Soil Sci. - 2006. - V. 57. - P. 426–445.

597. Wajid, K. Effect of Organic Manure and Mineral Fertilizers on Bioaccumulation and Translocation of Trace Metals in Maize / K. Wajid, K. Ahmad, Z.I. Khan, M. Nadeem, H. Bashir, F. Chen, I. Ugulu // Bull Environ Contam Toxicol. – 2020. – V. 104(5). – P. 649-657. - DOI: 10.1007/s00128-020-02841.

598. Wang, W. Effects of long-term fertilization on soil carbon, nitrogen, phosphorus and rice yield / W. Wang, X. Xie, A. Chen, C. Yin, W. Chen // Journal of Plant Nutrition. - 2013.- V.36. - P.551–561. - DOI 10.1080/01904167.2012.748795.

599. Wang, X. Spatial Differentiation of the Coupling Characteristics of Soil Carbon and Nitrogen on Mulberry Plantations in China / X. Wang, Y. Hu, H. Guo, J. Zhang, T. Tang, Q. Zeng // Journal of Resources and Ecology. – 2022. – V. 14(1). – P. 84-91. - https://doi.org/10.5814/j.issn.1674-764x.2023.01.008.

600. Wanga, H. Effects of long-term application of organic fertilizer on improving organic matter content and retarding acidity in red soil from China / H. Wanga, J. Xua, X. Liub, D. Zhanga, L. Lia, W. Lia, L. Shenga // Soil and Tillage Research. - 2019. - V. 195. - Article 104366. - DOI 10.1016/j.still.2019.104382.

601. Wells, M.J.M. Supramolecular answers to the organic matter controversy / M.J.M. Wells // J. Environ. Qual. - 2019. - V.48. - P. 1644–1651. - https://doi.org/10.2134/jeq2019.02.0089.

602. Wells, M.J.M. Supramolecular architectures of natural organic matter /M.J.M. Wells, H.A. Stretz // Sci. Total Environ. - 2019. - V. 537. - P. 81–92.

603. Wershaw, R.L. Evaluation of conceptual models of natural organic matter (humus) from a consideration of the chemical and biochemical processes of humifi cation / R.L. Wershaw // Sci. Investigat. Rep. 2004–5121. Virginia: U.S. Geological Survey, Reston, 2004. - 44 p.

604. Wiesmeier, M. Carbon sequestration potential of soils in southeast Germany derived from stable soil organic carbon saturation / M. Wiesmeier, R. Hübner, P. Spörlein, U. Geuß, E. Hangen, A. Reischl, B. Schilling, M. von Lützow, I. Kögel-Knabner //Glob Chang Biol. – 2014 – V. 20(2). – P.653-65. DOI: 10.1111/gcb.12384.

605. Wilcox, K. R. Assessing carbon storage capacity and saturation across six central US grasslands using data–model integration / K. R. Wilcox, S. L. Collins, A.K. Knapp, W. Pockman, Z. Shi, M.D. Smith, and Y. Luo //

Biogeosciences. – 2023. – V. 20. – P. 2707–2725. - https://doi.org/10.5194/bg-20-2707-2023, 2023.

606. Winding, A. Viability of indigenous soil bacteria assayed by respiratory activity and growth / A. Winding, S.J. Binnerup, J. Sørensen. - Appl. Environ. Microbiol. – 1994. – V. 60 – P. 2869–2875.

607. Winterton, N. Chlorine: the only green element – towards a wider acceptance of its role in natural cycles / N. Winterton // Green Chem. - 2000. - V. 2. - P. 173–225.

608. Yang, R. Effect of chemical and organic fertilization on soil carbon and nitrogen accumulation in a newly cultivated farmland / R. Yang, Y. Su, T. Wang, Q. Yang // Journal of Integrative Agriculture. - 2016. - V. 15. - № 3. - P.658-666. - https://doi.org/10.1016/S2095-3119(15)61107-8.

609. Ye, J. Improvement of soil acidification in tea plantations by long-term use of organic fertilizers and its effect on tea yield and quality / J. Ye, Y. Wang, Y. Wang, L. Hong, X. Jia, J. Kang, S. Lin, Z. Wu, H. Wang // Front Plant Sci. - 2022 – V. 13. - №1055900. - DOI: 10.3389/fpls.2022.1055900.

610. Yuan, Y. Long-term fertilization effects on organic carbon stabilization in aggregates of Mollisols / Y. Yuan, L. Li, N. Li, C. Yang, X. Han // Jornal of Food, Agriculture & Environment. - 2013. - № 11 (2). - P. 1. – DOI: 164-1168 10.4141/cjss2010-004.

611. Zhang, J.B. Effects of long-term repeated mineral and organic fertilizer applications on soil nit rogen transformations / J. B. Zhang, T. B. Zhu, Z. C. Cai, S. W. Qin // European Journal of Soil Science February. - 2012. - V. 63. - № 1. P.75-85. - DOI: 10.1111/j.1365-2389.2011.01410.x.

612. Zhang, S.X. Identification of phosphorus species and bio-availability in primary, secondary and digested sludge / S.X. Zhang, W.Z. Cui, D.F. Liu, W.L. Huang // Applied ecology and environmental research. - 2019. - V. 17. - Is. 6. P. 14391-14402. - DOI: 10.15666/aeer/1706_1439114402.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Валовое содержание тяжелых металлов в ОСВ, мг/кг сухого вещества

Наименование металла	Опыт (усреднённые данные)	ГОСТ Р. 17.4.3.07-2001, не более, для осадков группы	
		I	II
Кадмий (Cd)	21	15	30
Свинец (Pb)	43	250	500
Никель (Ni)	273	200	400
Хром ($Cr_{общ}$)	648	500	1000
Цинк (Zn)	224	1750	3500
Медь (Cu)	242	750	1500
Ртуть (Hg)	1	7,5	15
Мышьяк (As)	8	10	20

Приложение 2

Внесение удобрений в сельскохозяйственных организациях Пермского края, посевная площадь и урожайность основных сельскохозяйственных культур (Пермский край в цифрах, 2022)

Показатели	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Внесено минеральных удобрений (в пересчёте на 100% питательных веществ):	-	-	-	-	-	-
всего, тыс. т	8,4	7,9	7,1	8,3	8,9	12,8
на гектар посева, кг	17,0	16,3	15,4	15,8	17,8	19,8
в том числе под:						
зерновые культуры (без кукурузы)	24,9	25,8	24,2	29,2	38,4	42,1
овощные культуры	17,4	12,7	177,6	11,0	80,5	82,3
картофель	342	266	283	229	274	268
кормовые культуры	9,8	8,7	7,5	7,2	4,4	8,4
Удельный вес площади с внесёнными минеральными удобрениями во всей посевной площади, %	40,3	36,2	34,6	34,0	32,1	38,4
Внесено органических удобрений:						
всего, тыс. т	1191	1188	1142	1145	1191	1138
на гектар посева, т	2,4	2,5	2,5	2,2	2,4	2,2
в том числе под:						
зерновые культуры (без кукурузы)	3,0	4,0	3,6	3,3	3,2	3,1
овощные культуры	3,2	9,7	11,9	0,3	4,2	3,6
картофель	1,7	1,6	4,3	0,1	0,9	1,1
кормовые культуры	2,1	1,6	1,8	1,6	2,0	2,3
Удельный вес площади с внесёнными органическими удобрениями во всей посевной площади, %	4,8	4,7	4,6	3,9	5,2	4,8
Посевная площадь, тыс. га	753,6	754,5	739,5	733,3	723,3	740,3
Урожайность, ц/га: зерновые и зернобобовые	15,2	15,8	14,7	15,4	12,1	18,2
из них пшеница	14,7	15,4	13,6	15,4	11,4	16,8
картофель	106,3	140,3	131,5	141,7	159,5	163,3
овощи открытого грунта	292,8	308,0	284,9	290,6	286,4	275,3

Приложение 3

Агрохимическая характеристика почвы злаково-разнотравного луга

Горизонт, глубина, см	$C_{орг}$, %	pH_{KCl}	S	Hг	Ca	Mg	V, %	P_2O_5	K_2O
			смоль(экв)/кг					мг/кг	
A_1 0-22 см	1,19	4,5	21,1	3,4	18,0	3,5	86	290	291
A_2B 22-28 см	0,84	4,4	21,7	3,3	18,8	4,1	87	307	215
B_1 28-76 см	0,22	4,1	27,6	3,2	27,4	6,0	90	332	192
B_2 76-105 см	0,14	4,3	31,6	2,5	32,5	5,8	93	395	190
B_2C 105-127 см	0,11	4,4	30,6	2,3	31,0	4,8	93	409	186
C >127 см	0,22	4,4	32,2	2,4	35,1	4,5	93	335	164

Агрохимическая характеристика почвы по горизонтам профиля (*опыт 1)*

Горизонт, глубина, см	Гумус, %	pH_{KCl}	S	Hг	Ca	Mg	V, %	P_2O_5	K_2O
			смоль(экв)/кг					мг/кг	
Ап 0-21	1,11	4,4	16,7	3,5	12,6	2,6	83	143	124
A_2B 21–28	0,63	4,4	19,0	3,3	15,8	3,0	85	159	135
B_1 30–70	0,18	4,2	22,5	3,0	20,6	3,6	88	144	151
B_2 84–96	0,12	4,3	28,4	2,6	26,3	5,5	92	220	190
B_2C 96–132	0,10	4,4	28,0	2,5	26,3	4,9	92	250	117
C >132	0,09	4,5	28,8	2,1	25,9	4,9	93	315	117

Агрохимическая характеристика почвы по горизонтам профиля (*опыт 3)*

Горизонт, глубина, см	Гумус, %	pH_{KCl}	S	Hг	Ca	Mg	V, %	P_2O_5	K_2O
			смоль(экв)/кг					мг/кг	
Ап 0-22	1,05	4,1	17,1	3,9	14,1	3,3	81	125	133
A_2B 22-30	0,96	4,1	19,9	4,2	14,3	3,5	83	140	141
B_1 30-68	0,23	4,1	28,3	3,2	22,6	5,5	90	178	160
B_2 68-102	0,15	4,1	28,5	2,8	22,6	5,1	91	275	151
B_2C 102-135	0,13	4,2	29,4	2,7	23,3	4,8	92	305	145
C >135	0,17	4,2	28,3	3,0	25,4	5,8	90	312	137

Приложение 4

Характеристика почвенного разреза (злаково-разнотравный луг)

Почва дерново-подзолистая глубокодерновая поверхностноподзолистая тяжелосуглинистая, сформировавшаяся на покровной некарбонатной глине. Макрорельеф – плато. Поверхность почвы ровная. Угодье – злаково-разнотравный луг.

Исследуемая почва характеризуется следующим морфологическим строением профиля:

Горизонт, мощность, см	Морфологическое описание горизонта
A_1 0-22 см	Перегнойный, гумусовый, сухой, рыхлый, светло-коричневый, мелко-ореховатый, тяжелосуглинистый, имеются корни растений, органически остатки, ходы червей, переход в нижележащий горизонт постепенный, не ярко выражен
A_2B 22-28 см	Элювиально–иллювиальный, чуть светлее верхнего горизонта, рыхлый, сухой, ореховатый, темно-коричневый, тяжелосуглинистый, имеются корни, переход постепенный с затеками
B_1 28-76 см	Иллювиальный, переходный, светло-бурый, сухой, рыхлый, ореховатый или крупно-ореховатый, единичные корни, тяжелосуглинистый, переход слабовыраженный
B_2 76-105 см	Иллювиальный, коричнево-бурый, крупно-ореховатый, корневые остатки, влажный, плотный, тяжелоглинистый, переход постепенный
B_2C 105-127 см	Переходный к почвообразующей породе, влажный, светло-коричневый с бурым оттенком, бесструктурный, переход в нижележащий горизонт постепенный, плотный, тяжелосуглинистый
C >127 см	Влажный, коричневый, бесструктурный, плотный, глинистый, с соляной кислотой не вскипает

Приложение 5

Характеристика почвенного разреза (*опыт 1*)

Почва дерново-подзолистая культурная среднепахотная слабоподзолистая тяжелосуглинистая, сформировавшаяся на покровной некарбонатной глине. Макрорельеф – плато. Поверхность почвы ровная с небольшим уклоном. Угодье – посев озимой ржи.

Исследуемая почва характеризуется следующим морфологическим строением профиля:

Горизонт, мощность, см	Морфологическое описание горизонта
Ап 0-22	Пахотный, слабоувлажнённый, светло-серый с буроватым оттенком, тяжелосуглинистый, пылевато-мелкокомковатый, уплотнен, сильно пронизан корнями, в нижней части неперепревшие органические остатки, переход в нижележащий горизонт ясный
A_2B 22-30	Переходный к иллювиальному горизонту, увлажнен, светло-буровато-белесый, тяжелосуглинистый, плотный, неоднородный по структуре, плитчато-ореховатый, с кремнеземистой присыпкой на поверхности структурных агрегатов. Встречаются мелкие зерна ортштейна, угли, сильно перепревшие органические остатки. По трещинам и ходам корней видны слабо прокрашенные натеки гумуса. Переход в горизонт B_1 постепенный.
B_1 30-68	Иллювиальный, переходный, коричнево-бурый, слегка увлажнен, рыхлый, ореховатый, много корней, тяжелосуглинистый, переход ясный
B_2 68-102	Иллювиальный, влажный, бурый, глинистый, плотный, крупно-ореховатый. Четко прослеживается иллювиальность в виде глянцеватости. Переход постепенный.
B_2C 102-135	Переходный к материнской породе, влажный, светлее горизонта B_2, глинистый, плотный, крупноореховато-призматический. Переход в горизонт С постепенный.
С >135	Материнская порода, бурая, вязкая, бесструктурная, бескарбонатная покровная глина.

Приложение 6

Характеристика почвенного разреза *(опыт 3)*

Почва дерново-подзолистая культурная среднепахотная слабоподзолистая тяжелосуглинистая, сформировавшаяся на покровной некарбонатной глине. Макрорельеф – плато. Поверхность почвы ровная с небольшим уклоном. Угодье – посев озимой ржи.

Исследуемая почва характеризуется следующим морфологическим строением профиля:

Горизонт, мощность, см	Морфологическое описание горизонта
Ап 0-22	Пахотный, увлажненный, рыхлый, светло-серый, пылевато-комковатый, тяжелосуглинистый, имеются корни растений, органически остатки, переход в нижележащий горизонт по линии вспашки
A_2B 22-30	Переходный к иллювиальному горизонту, увлажнен, светло-буровато-белесый, тяжелосуглинистый, плотный, неоднородный по структуре, плитчато-ореховатый, с кремнеземистой присыпкой на поверхности структурных агрегатов. Встречаются мелкие зерна ортштейна, единичная мелкая галька, сильно перепревшие органические остатки. По трещинам и ходам корней видны слабо прокрашенные натеки гумуса. Переход в горизонт В1 постепенный.
B_1 30-68	Иллювиальный, переходный, коричнево-бурый, слегка увлажнен, рыхлый, ореховатый, много корней, тяжелосуглинистый, переход ясный
B_2 68-102	Иллювиальный, крупно-ореховатый, корневые остатки, влажный, темный, плотный, глинистый, переход постепенный
B_2C 102-135	Переходный к почвообразующей породе, влажный, светло-коричневый с бурым оттенком, слитный, переход в нижележащий горизонт постепенный, плотный
C >135	Влажный, коричневый, бесструктурный, плотный, глинистый, с соляной кислотой не вскипает

Приложение 7

Гранулометрический состав почвы злаково-разнотравного луга

Горизонт	Пыль крупная 0,05-0,01	Пыль средняя 0,01-0,005	Пыль мелкая 0,005-0,001	Ил <0,001	Песок мелкий 0,25-0,05	Песок средний 1,0-0,25	Физическая глина < 0,01
A_1 (0-22 см)	18,3	8,4	15,3	18,5	28,6	10,9	42,2
A_2B (22-28 см)	17,2	7,1	14,9	20,1	29,7	11,0	42,2
B_1 (28-76 см)	16,6	7,7	14,6	22,5	29,5	9,0	44,8
B_2 (76-105 см)	14,8	8,8	15,0	23,5	28,4	9,5	47,3
B_2C (105-127см)	12,3	7,8	15,4	23,5	31,1	9,9	46,7
C (от 127 см)	13,4	12,1	18,1	27,3	22,8	6,4	57,5

Гранулометрический состав пахотного слоя почвы, % *(опыт 1)*
(Завьялова, 2014)

Вариант	Пыль крупная 0,05-0,01	Пыль средняя 0,01-0,005	Пыль мелкая 0,005-0,001	Ил <0,001	Песок мелкий 0,25-0,05	Песок средний 1,0-0,25	Физическая глина < 0,01
Без удобрений	27,9	7,1	17,7	19,3	21,3	6,7	44,1
Навоз 10 т/га	32,7	8,0	19,9	16,3	17,0	6,7	44,2
Навоз 20 т/га	29,9	7,2	17,8	18,1	20,2	6,8	43,1
NPK экв. 10 т навоза	30,9	7,8	18,7	15,8	20,6	6,2	42,3
NPK экв. 20 т навоза	32,9	8,2	19,0	14,6	19,1	6,2	41,8
Навоз 5 т+NPK экв.	32,2	7,7	19,0	16,7	18,0	6,4	43,4
Навоз 10 т + NPK экв.	29,1	8,6	19,6	14,4	19,8	8,5	42,6
Навоз 20 т + NPK экв.	30,8	8,1	20,5	13,3	20,6	6,7	41,9

Гранулометрический состав пахотного слоя почвы, % *(опыт 2)*
(Завьялова и др., 2014)

Вариант	Пыль крупная 0,05-0,01	Пыль средняя 0,01-0,005	Пыль мелкая 0,005-0,001	Ил <0,001	Песок мелкий 0,25-0,05	Песок средний 1,0-0,25	Физическая глина < 0,01
Без удобрений	34,3	12,4	18,9	13,6	19,4	1,38	44,9
$(NPK)_{30}$	35,3	11,5	16,8	14,2	23,2	1,15	42,4
$(NPK)_{60}$	37,5	10,3	18,1	12,1	20,6	1,40	40,5
$(NPK)_{90}$	37,5	13,3	21,2	9,8	16,5	1,68	44,3
$(NPK)_{120}$	38,1	9,37	18,3	12,5	14,8	1,01	40,1
$(NPK)_{150}$	42,6	9,54	17,5	15,2	13,7	1,30	42,3

Гранулометрический состав пахотного слоя почвы, % *(опыт 3)*

Вариант	Пыль крупная 0,05-0,01	Пыль средняя 0,01-0,005	Пыль мелкая 0,005-0,001	Ил <0,001	Песок мелкий 0,25-0,05	Песок средний 1,0-0,25	Физическая глина < 0,01
Без удобрений	21,6	8,4	17,6	18,8	25,0	8,7	44,8
Навоз	21,0	7,3	17,0	19,0	26,6	8,8	43,3
ОСВ	22,3	7,2	18,3	18,2	25,5	8,8	43,8
NPK – фон	20,0	8,9	16,0	17,6	28,2	8,9	42,5
Фон + навоз	22,4	8,1	18,4	17,4	25,3	8,4	43,9
Фон + ОСВ	23,2	8,8	19,2	14,7	27,7	6,6	42,7

Гранулометрический состав пахотного слоя почвы бессменного чистого пара, %

Пыль крупная 0,05-0,01	Пыль средняя 0,01-0,005	Пыль мелкая 0,005-0,001	Ил <0,001	Песок мелкий 0,25-0,05	Песок средний 1,0-0,25	Физическая глина < 0,01
31,3	5,3	18,9	18,8	20,5	5,2	43,0

Приложение 8

Метеорологические условия вегетационных периодов сельскохозяйственных культур по годам исследований (1976-2022 гг.)

Год	Сумма активных температур более 5°С	Сумма активных температур более 10°С	Сумма осадков, мм	ГТК
1977	1969	1853	221	1,0
1978	1516	1297	417	2,2
1979	1768	1575	260	1,4
1980	1686	1541	337	1,6
1981	2063	1964	100	0,5
1982	1805	1625	177	0,7
1983	1799	1620	328	1,7
1984	1840	1701	398	1,9
1985	1672	1564	224	1,2
1986	1503	1361	286	1,5
1987	1980	1924	177	0,9
1988	2089	1967	204	0,8
1989	1687	1644	279	1,3
1990	1784	1659	299	1,2
1991	2023	1953	319	1,5
1992	1479	1223	362	2,2
1993	1857	1788	415	2,0
1994	1684	1543	451	2,6
1995	1945	1845	344	1,3
1996	1830	1667	257	1,3
1997	1742	1595	304	1,2
1998	2072	1994	189	0,9
1999	1705	1587	257	1,3
2000	2097	1937	439	1,3
2001	1867	1795	157	0,7
2002	1599	1445	302	1,4
2003	1958	1827	343	1,6
2004	2009	1919	318	1,4
2005	1972	1875	242	1,1
2006	1894	1722	278	1,3
2007	1886	1758	453	2,0
2008	1895	1738	273	1,3
2009	1854	1775	232	1,2
2010	2133	2036	252	1,0
2011	1928	1795	258	1,4
2012	2069	2012	303	1,4
2013	2033	1912	230	1,1
2014	1850	1737	262	1,4
2015	1839	1706	474	2,1
2016	2187	2065	162	0,7
2017	1700	1610	458	2,5
2018	1817	1617	269	1,3
2019	1653	1552	500	3,0
2020	1954	1861	279	1,4
2021	2220	2148	255	1,2
2022	1937	1869	152	0,7

Приложение 9

Содержание углерода в растительных образцах

Культура	Содержание углерода, мас. %
Озимая рожь (зерно)	41,96± 0,39
Озимая рожь (ПКО)	40,40± 0,49
Картофель (клубни)	39,10 ± 0,33
Картофель (ботва)	39,40 ± 0,49
Картофель (ПКО)	41,08 ± 0,45
Яровая пшеница (зерно)	42,04± 0,22
Яровая пшеница (ПКО)	40,86± 0,43
Яровой ячмень (зерно)	40,99 ± 0,16
Яровой ячмень (солома)	42,44 ± 0,60
Яровой ячмень (ПКО)	39,71 ± 0,65
Овес (зерно)	42,54± 0,33
Овес (солома)	42,33± 0,48
Овес (ПКО)	32,80± 0,57
Клевер луговой (надземная масса, сено)	41,70 ± 0,32
Клевер луговой (ПКО)	40,66 ± 0,56

Приложение 10

Корреляционные зависимости показателей фосфатного режима от агрохимических свойств почвы (*опыт 1*)

Показатель	$C_{орг.}$,%	pH_{KCl}	Нг	S	V, %
			смоль(экв)/кг		
0-20					
Общее содержание фосфора, мг/кг	0,9*	-0,1	0,3	-0,6	-0,6
Минеральные соединения фосфора, мг/кг	0,8*	-0,1	0,2	-0,5	-0,5
Органические соединения фосфора, мг/кг	0,9*	-0,2	0,3	-0,6	-0,6
Подвижные соединения фосфора, мг/кг	0,9*	-0,1	0,2	-0,5	-0,5
Ca-P_{I}, мг/кг	0,9*	0,2	-0,1	-0,3	-0,2
Ca-$P_{II,}$ мг/кг	0,3	0,5	-0,5	0,1	0,3
Al-P, мг/кг	0,3	-0,1	0,1	-0,4	-0,3
Fe-P, мг/кг	0,6	-0,1	0,3	-0,5	-0,4
Ca-P_{III}, мг/кг	-0,1	-0,3	0,3	-0,4	-0,3
0-100					
Общее содержание фосфора, мг/кг	0,8*	0,2	0,6*	-0,7*	-0,7*
Минеральные соединения фосфора, мг/кг	0,4*	0,1	0,4*	-0,3	-0,4*
Органические соединения фосфора, мг/кг	0,9*	0,3	0,6*	-0,8*	-0,7*
Подвижные соединения фосфора, мг/кг	0,1	-0,1	0,2	-0,1	-0,3

* - существенный ($p<0,05$).

Приложение 11

Корреляционные зависимости показателей фосфатного режима от агрохимических свойств почвы (*опыт 2*)

Показатель	$C_{орг.}$,%	pH_{KCl}	Нг	S	V, %
			смоль(экв)/кг		
0-20					
Общее содержание фосфора, мг/кг	0,4	-0,5	0,4	-0,1	-0,3
Минеральные соединения фосфора, мг/кг	0,3	-0,1	0,0	0,2	0,0
Органические соединения фосфора, мг/кг	0,3	-0,8*	0,9*	-0,7*	-0,9*
Подвижные соединения фосфора, мг/кг	0,3	-0,3	0,4	0,1	-0,2
0-100					
Подвижные соединения фосфора, мг/кг	0,0	0,4*	-0,4*	0,4*	0,3*

* - существенный ($p<0,05$).

Приложение 12

Корреляционные зависимости показателей фосфатного режима от агрохимических свойств почвы (*опыт 3*)

Показатель	$C_{орг.}$,%	pH_{KCl}	Нг	S	V, %
			смоль(экв)/кг		
0-20					
Общее содержание фосфора, мг/кг	0,9*	-0,7	0,9*	0,3	-0,6
Минеральные соединения фосфора, мг/кг	0,8	-0,8	0,9*	0,4	-0,7
Органические соединения фосфора, мг/кг	0,6	-0,2	0,4	0,0	-0,1
Подвижные соединения фосфора, мг/кг	0,8	-0,8	1,0*	0,4	-0,8
Степень подвижности фосфатов, мг/л	0,8	-0,8	0,9*	0,0	-0,8
$Ca\text{-}P_{I}$, мг/кг	0,9*	-0,8	0,9*	0,1	-0,7
$Ca\text{-}P_{II,}$ мг/кг	0,6	-0,6	0,8	0,0	-0,5
Al-P, мг/кг	0,7	-0,4	0,6	0,6	-0,2
Fe-P, мг/кг	-0,1	-0,2	0,3	0,5	-0,1
$Ca\text{-}P_{III}$, мг/кг	0,4	-0,7	0,8	0,6	-0,7
0-100					
Общее содержание фосфора, мг/кг	0,7*	-0,6*	0,7*	-0,5*	-0,6*
Минеральные соединения фосфора, мг/кг	0,1	-0,5*	0,3*	0,1	-0,1
Органические соединения фосфора, мг/кг	0,9*	-0,5*	0,8*	-0,9*	-0,9*
Подвижные соединения фосфора, мг/кг	-0,1	-0,4*	0,0	0,2	0,1
Степень подвижности фосфатов, мг/л	0,7*	-0,5*	0,7*	-0,5*	-0,6*

* - существенный ($p<0,05$) .

Приложение 13

Корреляционные зависимости показателей калийного режима (мг/кг) от агрохимических свойств почвы

Показатель	$C_{орг.}$, %	pH_{KCl}	Нг	S	V, %	$N_{мин}$	$N\text{-}NO_3$	$N\text{-}NH_4$	P_2O_5	Ca^{2+}	Mg^{2+}
			смоль(экв)/кг			мг/кг				смоль(экв)/кг	
Опыт1											
0-20											
Валовое содержание	0,7*	-0,2	0,2	-0,2	-0,5	0,3	0,2	0,3	0,9*	-0,5	0,0
Необменные соединения	0,6	-0,2	0,3	-0,4	-0,5	0,6	0,6	0,5	0,6	-0,8*	-0,5
Подвижные соединения	0,8*	-0,4	0,5	-0,6	-0,8*	0,5	0,5	0,4	0,9*	-0,9*	0,2
Легкообменные соединения	0,8*	-0,4	0,5	-0,6*	-0,8*	0,4	0,4	0,3	0,9*	-0,9*	-0,2
0-100											
Валовое содержание	-0,8*	-0,2	-0,6*	0,7*	0,6*	-0,3	-0,2	-0,3	0,1	0,7*	0,6*
Необменные соединения	0,8*	0,3*	0,6*	-0,8*	-0,7*	0,2	0,2	0,1	0,1	-0,8*	-0,7*
Подвижные соединения	0,8*	0,2	0,7*	-0,8*	-0,8*	0,3	0,3	0,3	0,4*	-0,8*	-0,7*
Легкообменные соединения	0,9*	0,2	0,8*	-0,8*	-0,9*	0,3	0,2	0,2	0,3*	-0,9*	-0,7*
Опыт 2											
0-20											
Валовое содержание	0,3	-0,1	-0,1	-0,4	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,4
Необменные соединения	0,3	0,4	-0,3	0,1	0,3	-0,1	0,1	-0,3	0,0	0,1	0,5
Подвижные соединения	0,6*	-0,2	0,3	-0,5	-0,4	0,4	0,4	0,3	0,1	-0,1	0,6*
Легкообменные соединения	0,7*	-0,5	0,6	-0,7*	-0,6	0,6	0,6	0,3	0,2	-0,3	0,4
0-100											
Валовое содержание	-0,7*	-0,1	-0,2	0,4*	0,4*	-0,4*	-0,4*	-0,3*	-0,2	0,7*	0,5*
Необменные соединения	-0,3*	-0,2	0,1	0,0	0,1	-0,3*	-0,2	-0,4*	-0,4*	0,3*	0,2
Подвижные соединения	0,8*	-0,2	0,5*	-0,7*	-0,7*	0,6*	0,5*	0,4*	0,0	-0,7*	-0,5*
Легкообменные соединения	0,9*	-0,2	0,5*	-0,7*	-0,7*	0,6*	0,6*	0,5*	0,1	-0,8*	-0,6*
Опыт 3											
0-20											
Валовое содержание	0,3	-0,7	0,7	0,7	-0,5	0,7	0,8*	0,7	0,8*	-0,9*	-0,8*
Необменные соединения	0,6	-0,8*	0,9*	0,5	-0,7	0,7	0,9*	0,7	1,0*	-0,8*	-0,8*
Подвижные соединения	0,4	-0,8*	0,9*	0,3	-0,8*	0,4	0,9*	0,4	0,9*	-0,7	-1,0*
Легкообменные соединения	0,5	-0,7	0,8*	0,3	-0,7	0,6	0,8*	0,6	0,9*	-0,9*	-0,8*
Среднее											
0-20											
Валовое содержание	0,4*	-0,1	0,1	-0,1	0,0	0,1	-0,1	0,2	0,1	-0,1	0,2
Необменные соединения	0,1	0,6*	-0,5*	-0,4*	0,3	-0,2	0,5*	-0,7*	0,4*	0,1	-0,8*
Подвижные соединения	0,7*	0,0	-0,1	-0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,2	-0,1	0,0
Легкообменные соединения	0,7*	-0,3	0,3	-0,3*	-0,3	0,3*	0,2	0,1	0,4*	-0,4*	0,0
0-100											
Валовое содержание	-0,7*	0,0	-0,3*	0,4*	0,5*	-0,4*	-0,2*	-0,4*	-0,1*	0,7*	0,4*
Необменные соединения	-0,1	0,1	0,1	0,1	-0,1	-0,4*	0,3*	-0,7*	0,0	0,3*	-0,4*
Подвижные соединения	0,6*	-0,1	0,2*	-0,5*	-0,3*	0,4*	0,0	0,5*	0,0	-0,6*	-0,2*
Легкообменные соединения	0,9*	-0,2*	0,5*	-0,7*	-0,6*	0,6*	0,2*	0,5*	0,1*	-0,8*	-0,5*

* - существенный ($p<0,05$).

Приложение 14

Корреляционные зависимости** между группами микроорганизмов и агрохимическими показателями почвы

Показатель	$C_{орг}$	$N_{общ}$	$N_{нг}$	$N_{тг}$	$N_{лг}$	$N_{мин}$	$P_{общ}$	$P_{мин}$	$P_{орг}$	$P_{подв}$	$K_{вал}$	$K_{необ}$	$K_{обм}$	$K_{л/обм}$	pH_{KCL}	Нг	S	V	CaO	MgO
МПА(аммонификаторы)	0,3	0,4	0,3	0,5*	0,3	0,0	0,2	0,3	0,0	0,3	0,1	0,4	0,1	0,1	0,5*	-0,5*	0,2	0,3	0,0	-0,2
КАА (амилолитики)	-0,2	-0,1	-0,1	0,2	0,1	-0,3	0,0	0,3	-0,3	0,0	0,2	0,0	-0,1	-0,1	0,2	-0,4	0,4	0,2	0,1	0,1
ПА (олиготрофы)	0,3	0,6*	0,5*	0,6*	0,2	0,3	0,3	0,2	0,3	0,5*	0,6*	0,5*	0,4	0,4	0,1	-0,2	0,2	-0,1	-0,1	-0,1
КГА (актиномицеты)	0,4	0,0	-0,2	0,1	0,7*	-0,3	0,2	0,5*	-0,3	0,0	-0,6*	-0,4	-0,1	0,2	0,3	0,1	-0,7*	0,1	-0,2	0,1
Гетчинсона (целлюлозолитики)	0,4	0,7*	0,7*	0,4	0,0	0,8*	0,6*	0,2	0,8*	0,8*	0,8*	0,2	0,6*	0,6*	-0,2	0,2	0,2	-0,4	0,2	0,2
Чапека (микромицеты)	0,7*	0,8*	0,5*	0,8*	0,7*	0,3	0,7*	0,6*	0,5*	0,9*	0,4	0,6*	0,7*	0,9*	0,0	0,2	-0,5*	-0,5*	-0,5*	-0,2
Общее количество микроорганизмов	0,2	0,4	0,3	0,5*	0,3	0,0	0,2	0,3	0,0	0,4	0,4	0,3	0,2	0,2	0,3	-0,4	0,2	0,1	-0,1	-0,1

* - существенный (p<0,05).

** – корреляционный анализ проведён по данным опыта 1, целинной почве и бессменному чистому пару.

Приложение 15

Корреляционные зависимости между микробиологическими и агрохимическими показателями почвы

Показатель	$C_{орг}$	$N_{общ}$	$N_{нг}$	$N_{тг}$	$N_{лг}$	$N_{мин}$	$P_{общ}$	$P_{мин}$	$P_{орг}$	$P_{подв}$	$K_{вал}$	$K_{необ}$	$K_{обм}$	$K_{л/обм}$	pH	Нг	S	V	CaO	MgO
Опыт 1																				
БД	0,2	-0,2	-0,2	-0,1	0,1	-0,1	-0,1	0,0	-0,3	-0,1	-0,1	-0,5*	-0,5*	-0,4	0,8*	-0,8*	0,8*	0,8*	0,7*	0,0
СИД, $C_{мик}$	-0,4	-0,6*	-0,6*	-0,4	-0,4	-0,2	-0,3	-0,3	-0,2	-0,5	-0,8*	-0,2	-0,3	-0,4	0,1	0,0	-0,1	0,2	0,2	-0,2
qCO_2	0,5*	0,6*	0,6*	0,5*	0,5*	0,3	0,4	0,4	0,3	0,6*	0,8*	0,2	0,3	0,4	0,2	-0,2	0,2	-0,1	-0,1	0,1
Опыт 2																				
БД	-0,3	0,1	0,0	0,2	0,0	0,6*	0,0	-0,1	0,2	0,0	-0,4	-0,7*	-0,2	0,0	-0,7*	0,7*	-0,5*	-0,7*	-0,5*	-0,5*
СИД, $C_{мик}$	-0,2	0,3	0,3	0,2	0,6*	0,4	-0,1	-0,3	0,4	-0,2	0,1	-0,1	0,1	0,1	-0,3	0,4	-0,1	-0,4	0,2	-0,1
qCO_2	-0,1	-0,3	-0,3	-0,2	-0,6*	-0,1	0,1	0,2	-0,2	0,1	-0,4	-0,4	-0,4	-0,3	-0,1	-0,1	-0,2	0,1	-0,4	-0,3
Опыт 3																				
БД	0,8*	0,6	0,7	0,2	0,2	0,0	0,6	0,5	0,5	0,5	0,2	0,3	0,2	0,4	-0,4	0,5	-0,4	-0,7*	-0,1	-0,1
СИД, $C_{мик}$	-0,3	-0,5	-0,4	-0,2	-0,9*	-0,4	-0,7	-0,8*	-0,1	-0,9*	-0,9*	-0,9*	-0,9*	-0,8*	0,9*	-0,9*	-0,3	0,8*	0,7	0,9*
qCO_2	0,8*	0,7	0,8*	0,3	0,6	0,2	0,8*	0,8*	0,5	0,8*	0,5	0,7	0,6	0,7	-0,7	0,9*	-0,1	-0,9*	-0,4	-0,5
Целинные и пахотные почвы**																				
БД	0,3	0,3	0,3	0,0	-0,2	0,2	0,1	0,0	0,2	0,2	0,0	-0,2	-0,2	0,0	-0,2	0,4	-0,1	-0,4	0,0	0,2
СИД, $C_{мик}$	0,1	0,1	0,0	-0,1	0,3	0,3	0,2	0,1	0,4	-0,1	-0,2	0,5*	0,1	0,0	0,4	-0,3	-0,3	0,2	0,3	-0,4
qCO_2	0,1	0,1	0,2	0,1	-0,4	0,0	-0,1	0,0	-0,2	0,2	0,2	-0,5*	-0,1	0,1	-0,5*	0,6*	0,2	-0,5*	-0,3	0,4

* - существенный (p<0,05).

** – корреляционный анализ проведён по данным опытов 1-3, целинной почве и бессменному чистому пару.

Приложение 16

Хозяйственный вынос элементов питания сельскохозяйственными культурами 1 т основной продукции, кг (среднее по 2 закладкам за 5 ротаций севооборота)

Варианты	Озимая рожь (зерно)			Пшеница (зерно)			Клевер 1 г.п. (сено 16 %)			Клевер 2 г.п. (сено 16 %)			Ячмень (зерно)			Картофель (клубни)			Овёс (зерно)		
	N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O
Без удобрений	23±2	9±1	26±5	25±3	10±1	23±7	22±3	4±1	28±3	27±5	6±2	29±14	25±3	10±3	22±3	3,1±0,4	1,1±0,2	5,0±0,8	25±1	10±1	28±6
Навоз 10 т/га	26±4	10±1	30±7	28±4	10±1	27±11	24±2	5±1	28±3	26±5	6±2	33±12	26±2	9±2	26±6	2,9±0,3	1,1±0,2	4,8±0,8	28±4	11±2	33±9
Навоз 20 т/га	25±3	10±2	30±8	29±4	10±1	28±12	23±3	5±1	30±4	28±5	6±2	33±13	29±5	11±2	31±15	3,0±0,4	1,2±0,2	5,0±0,7	26±2	11±2	33±6
NPK экв. 10 т навоза	27±4	10±1	37±13	31±3	10±1	27±9	23±3	5±1	29±3	26±5	6±2	33±12	25±3	9±2	23±5	3,3±0,5	0,9±0,2	5,0±0,9	29±1	10±1	35±8
NPK экв. 20 т навоза	29±4	10±1	35±10	33±4	9±1	31±9	23±3	4±1	30±3	25±4	6±1	34±11	24±5	10±2	24±3	3,2±0,4	1,0±0,2	5,2±1,2	31±3	10±1	33±7
Навоз 5 т+NPK экв.	27±2	10±1	33±7	30±6	10±1	32±14	23±3	4±1	28±4	27±5	6±1	34±11	26±5	10±2	27±10	3,1±0,5	1,0±0,2	5,0±0,8	29±2	10±2	36±8
Навоз 10 т + NPK экв.	30±2	10±1	36±8	33±5	10±1	34±13	24±4	5±1	31±3	26±4	6±1	36±12	27±5	10±2	27±7	3,3±0,4	1,0±0,1	5,4±1,3	32±2	11±2	37±9
Навоз 20 т + NPK экв.	30±3	10±2	37±9	36±5	11±2	38±11	24±3	5±1	32±3	26±4	6±2	32±13	27±5	10±2	29±5	3,3±0,5	1,1±0,2	4,9±0,1	34±3	12±1	43±9

Приложение 17

Хозяйственный вынос элементов питания сельскохозяйственными культурами 1 т основной продукции, кг (среднее по 2 закладкам за 5 ротаций севооборота) *(опыт 2)*

Варианты	Озимая рожь (зерно)			Картофель (клубни)			Пшеница (зерно)			Клевер 1 г.п. (сено 16 %)			Клевер 2 г.п. (сено 16 %)			Ячмень (зерно)			Овёс (зерно)		
	N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O
Без удобрений	24±2	10±1	26±3	2,7±0,5	1,0±0,3	6,1±1,3	34±4	11±2	25±5	27±4	7±1	32±4	27±6	6±2	29±7	27±4	12±3	23±5	24±2	14±3	37±8
N_{90}	31±3	9±1	34±7	3,5±0,6	0,9±0,2	5,6±0,9	35±3	12±2	23±4	28±4	7±1	31±5	28±7	6±2	29±7	30±5	11±2	26±5	30±5	12±2	37±10
P_{90}	26±2	10±1	32±3	2,6±0,4	1,0±0,2	6,1±1,2	35±2	11±1	19±4	25±2	6±1	30±5	26±5	5±1	31±7	25±4	11±2	25±5	22±2	13±2	33±6
K_{90}	28±4	9±2	28±5	2,7±0,4	0,9±0,2	6,5±1,0	34±4	12±2	22±4	28±3	7±1	38±5	26±6	6±1	32±8	28±6	11±1	24±5	22±3	13±2	32±6
$(NP)_{90}$	34±8	10±1	43±14	3,2±0,5	0,9±0,2	5,4±0,9	40±4	11±2	25±5	28±2	7±1	33±9	28±6	6±1	26±6	32±4	12±2	28±5	28±4	13±2	39±6
$(NK)_{90}$	33±4	9±2	41±7	2,9±0,5	0,8±0,2	6,2±1,0	36±6	11±2	23±5	27±2	7±1	38±6	26±6	5±1	34±8	32±5	11±2	29±3	30±5	12±1	39±8
$(PK)_{90}$	29±4	10±1	30±4	2,4±0,4	0,9±0,2	5,8±1,1	37±4	11±2	31±8	27±3	7±1	36±6	27±6	6±1	34±8	29±7	11±1	26±5	23±3	13±3	34±10
$(NPK)_{90}$	31±3	11±1	35±6	3,2±0,5	0,8±0,2	6,1±1,2	39±4	10±2	25±4	26±2	7±1	37±4	27±6	6±1	32±8	31±4	13±2	29±6	28±4	13±2	41±7
$(NPK)_{30}$	31±4	10±1	34±7	2,8±0,5	0,9±0,2	6,0±1,1	38±3	12±2	24±6	26±2	7±1	32±5	26±6	6±1	31±8	30±6	13±2	27±7	29±3	12±2	45±10
$(NPK)_{60}$	26±2	9±2	34±5	2,7±0,4	0,9±0,2	6,1±1,0	35±4	11±1	21±4	27±3	7±1	36±4	25±6	6±1	31±7	26±5	12±2	24±5	30±5	12±2	34±6
$(NPK)_{120}$	33±3	10±1	34±4	3,1±0,6	0,8±0,2	6,0±1,0	37±5	11±2	25±8	27±2	7±1	35±5	25±5	6±1	30±7	30±5	12±3	23±4	31±3	12±2	37±4
$(NPK)_{150}$	35±6	12±2	43±7	3,1±0,6	0,9±0,3	6,0±1,0	41±4	13±2	28±6	28±2	8±1	38±5	26±6	6±1	33±8	32±5	12±2	29±7	30±4	13±2	35±7

Приложение 18

Продуктивность культур и факторы влияющие на него

Параметры	№	Продуктивность севооборота, т з.ед. (Y)	$C_{орг}$, % (X1)	Nмин, мг/кг (X2)	P_2O_5, мг/кг (X3)	K_2O, мг/кг (X4)
Без удобрений	1	2,54	1,15	12,8	153	142
Навоз 10 т/га	2	2,84	1,33	14,2	220	212
Навоз 20 т/га	3	3,01	1,41	16,7	272	228
NPK экв. 10 т навоза	4	3,24	1,26	18,9	216	225
NPK экв. 20 т навоза	5	3,44	1,31	19,7	245	320
Навоз 5 т+NPK экв.	6	3,25	1,3	16,5	227	233
Навоз 10 т + NPK экв.	7	3,41	1,38	22,2	269	277
Навоз 20 т + NPK экв.	8	3,46	1,53	17	472	387
Без удобрений	9	2,62	1,12	10,3	192	129
N_{90}	10	2,97	1,1	20,3	188	112
P_{90}	11	2,77	1,2	10	461	108
K_{90}	12	2,85	1,38	7,8	235	217
$(NP)_{90}$	13	2,93	1,29	21,4	397	109
$(NK)_{90}$	14	2,98	1,28	18,6	185	218
$(PK)_{90}$	15	2,97	1,07	8,3	397	195
$(NPK)_{90}$	16	3,31	1,33	29,9	371	230
$(NPK)_{30}$	17	2,78	1,13	12,9	329	133
$(NPK)_{60}$	18	3,26	1,21	17,8	339	178
$(NPK)_{120}$	19	3,28	1,34	45,2	446	195
$(NPK)_{150}$	20	3,36	1,37	59,1	530	234
Без удобрений	21	2,45	1,13	21	126	122
Навоз	22	3,18	1,18	30	158	148
ОСВ	23	2,94	1,28	36	233	131
NPK – фон	24	3,39	1,17	32	331	183
Фон + навоз	25	3,60	1,31	39	345	165
Фон + ОСВ	26	3,51	1,4	31	398	175

Парная корреляция по факторам

Параметры	Y	X1	X2	X3	X4
Y	1,00				
X1	0,56	1,00			
X2	0,54	0,29	1,00		
X3	0,47	0,39	0,40	1,00	
X4	0,58	0,70	0,03	0,23	1,00

Приложение 19

Результаты регрессионной статистики

Регрессионная статистика	
Множественный R	0,794
R-квадрат	0,630
Нормированный R-квадрат	0,580
Стандартная ошибка	0,204
Наблюдения	26

Дисперсионный анализ

	df	SS	MS	F	Значимость F
Регрессия	3	1,56	0,52	12,50	0,00006
Остаток	22	0,92	0,04		
Итого	25	2,48			

	Коэффициенты	Стандартная ошибка	t-статистика	P-Значение	Нижние 95%	Верхние 95%	Нижние 95,0%	Верхние 95,0%
Y-пересечение	2,21	0,16	14,20	0,00	1,88	2,53	1,88	2,53
Переменная X 2	0,01	0,00	3,19	0,00	0,00	0,02	0,00	0,02
Переменная X 3	0,00	0,00	1,15	0,26	0,00	0,00	0,00	0,00
Переменная X 4	0,00	0,00	3,97	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Приложение 20

Результаты регрессионной статистики

Регрессионная статистика	
Множественный R	0,78
R-квадрат	0,61
Нормированный R-квадрат	0,57
Стандартная ошибка	0,21
Наблюдения	26

Дисперсионный анализ

	df	*SS*	*MS*	*F*	*Значимость F*
Регрессия	2	1,51	0,75	17,82	2,11E-05
Остаток	23	0,97	0,04		
Итого	25	2,48			

	Коэффициенты	*Стандартная ошибка*	*t-статистика*	*P-Значение*	*Нижние 95%*	*Верхние 95%*	*Нижние 95,0%*	*Верхние 95,0%*
Y-пересечение	2,277	0,144	15,797	0,000	1,978	2,575	1,978	2,575
Переменная X 2	0,013	0,003	3,967	0,001	0,006	0,020	0,006	0,020
Переменная X 4	0,003	0,001	4,333	0,000	0,001	0,004	0,001	0,004