

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Самарский государственный аграрный университет»

На правах рукописи

БОРОВКОВА НАТАЛЬЯ ВЛАДИМИРОВНА

**ВЛИЯНИЕ ФОСФОГИПСА НА АГРОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ
ПОКАЗАТЕЛИ ОРОШАЕМЫХ ЧЕРНОЗЕМОВ СРЕДНЕГО
ПОВОЛЖЬЯ И ПРОДУКТИВНОСТЬ КАРТОФЕЛЯ**

4.1.3 Агрохимия, агропочвоведение, защита и карантин растений

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата сельскохозяйственных наук

Научный руководитель
доктор сельскохозяйственных наук,
профессор Троц Н.М.

Самара - 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ.....	9
1.1. Виды мелиоративных мероприятий.....	9
1.2. Влияние микроорганизмов на плодородие почв.....	23
1.3. Современное состояние отрасли картофелеводства.....	28
1.4. Биологические и агротехнологические приемы регулирования урожайности картофеля и особенности его возделывания.....	31
1.5. Влияние агротехнических приемов на содержание тяжелых металлов в почвах, на урожайность и качество картофеля.....	36
2. УСЛОВИЯ, МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	44
2.1. Почвенно-климатическая характеристика опытного участка.....	44
2.2. Схема полевого опыта и ее обоснование.....	52
2.3. Методы и методики исследований.....	60
3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	64
3.1. Агрохимические показатели почв производственных плантаций картофеля.....	64
3.2. Обменная и гидролитическая кислотность почвы опытного участка....	95
3.3. Агрофизические свойства почв.....	98
3.4. Физические свойства минеральной части почвы.....	102
3.5. Влияние различных норм внесения мелиоранта на распространение фитопатогенов и антагонистов.....	105
3.6. Влияние разных норм применения фосфогипса на микробиологическую активность почвы.....	108
3.7. Влияние применения фосфогипса на фенологические фазы развития и качество клубней картофеля	111
4. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ДЕЙСТВИЯ ФОСФОГИПСА НА АККУМУЛЯЦИЮ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ ПОЧВОЙ И КАРТОФЕЛЕМ.....	118
4.1. Влияние фосфогипса на накопления тяжелых металлов почвой под растениями картофеля сорта Гранада.....	118
4.2. Влияние фосфогипса на накопления тяжелых металлов почвой под растениями картофеля сорта Гала.....	133
4.3. Накопление тяжелых металлов картофелем.....	148
5. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФОСФОГИПСА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНОЙ ПРОДУКЦИИ КАРТОФЕЛЯ.....	154
5.1. Урожайность картофеля при использовании фосфогипса.....	154
5.2. Экономическая оценка возделывания картофеля.....	158
ВЫВОДЫ.....	160
ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВУ.....	165
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	166
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	179

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. Одной из основных задач агропромышленного комплекса страны является обеспечение населения продовольствием, а перерабатывающей промышленности сырьем. Ее успешное решение во многом зависит от рационального, экономически эффективного и экологически безопасного использования природных ресурсов, в том числе отходов промышленной переработки природного сырья. Это позволит не только обеспечить растения минеральными питательными веществами, но и снизить себестоимость производимой продукции. По мнению многих специалистов, в качестве удобрения и мелиоранта в сельскохозяйственном производстве можно использовать фосфогипс, побочный продукт производства экстракционной фосфорной кислоты, содержащий 70-80% гипса $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 2-3% – подвижного фосфора P_2O_5 , 15 % – оксида кремния SiO_2 и 20-22% – кальция Ca. В его состав также входят и другие, нужные зеленым растениям биогенные элементы: 1,4% – магний Mg, 0,17-0,20% – железо Fe, 0,1% – бор B, 1% – марганец Mn, 0,01% – медь Cu и др. [1].

Современный этап развития отечественной аграрной сферы требует агроэкологической оценки эффективности фосфогипса в конкретных почвенно-климатических зонах. Так, в южной агроэкологической зоне Самарской области в условиях орошения для восстановления баланса кальция, обогащения фосфором, снижения последствий ветровой эрозии почв может быть использован фосфогипс Балаковского филиала АО «Апатит» запасы которого превышают 40 млн тонн и практически не используются, хотя многими исследованиями показана мелиоративная ценность фосфогипса [18].

Для Самарской области актуален вопрос улучшения орошаемых черноземных почв [8, 53, 54]. Однако, научные исследования, которые бы оценили эффективность фосфогипса как мелиоранта в таких условиях, пока не проводились. Не изучено его влияние на ключевые характеристики почвы: плодородие, степень засоления и осолонцевания, а также на содержание нитратов, микроэлементов и минералогический состав, нет конкретных рекомендаций по его применению под

различные сельскохозяйственные культуры, в том числе под картофель [32, 36, 127].

В силу биологических особенностей картофель предъявляет повышенную требовательность к условиям минерального питания. По данным Л. С. Гиль [12], в расчете на формирование 10 т клубней картофелем потребляется до 50 кг азота, 20 кг фосфорных соединений, около 100 кг калия, 38 кг кальция, 16 кг магния и 5 кг серы. Для получения высокого урожая клубней картофеля на орошаемых черноземных почвах необходимо обеспечение следующих параметров: гумуса 5-7%, азота – 120-150 кг/га, фосфора – 60-80 кг/га, калия – 150-200 кг/га, обменного магния – не менее 250 мг/кг MgO, pH_{KCl} – 4,5-7,5, Нг – 1,5-3,0 мг-экв/100 г почвы, плотность – 1,1-1,2 г/см³, пористость 55-57%, влажности на уровне 70-80% полной влагоемкости в течение всего вегетационного периода [7, 22, 78]. Такой уровень плодородия может быть достигнут за счет баланса питательных веществ на фоне оптимизации кальциевого режима.

Повышение урожайности картофеля, прежде всего, на высокоценных, орошаемых черноземных почвах, с целевым уровнем продуктивности и соблюдением принципов ресурсосбережения и экологической безопасности производства является актуальной и практически значимой задачей.

Цель работы – совершенствование агротехнических приемов выращивания картофеля в системе применения фосфогипса при орошении на черноземной почве, обеспечивающих высокую продуктивность растений, сохранение почвенного плодородия и экологическую безопасность продукции.

В соответствии с этим в **задачи исследований** входило:

1. Обобщить результаты мониторинга черноземных почв по основным агрохимическим параметрам, характеризующим закономерности динамики изменения плодородия почв.
2. Установить степень влияния различных норм фосфогипса на агрохимические показатели плодородия почвы и динамику основных макроэлементов.
3. Провести сравнительный анализ валового содержания и подвижных форм кадмия Cd, свинца Pb, цинка Zn, никеля Ni, меди Cu, марганца Mn, железа Fe в

пахотном горизонте почв под посевами картофеля при внесении различных норм фосфогипса.

4. Изучить эффективность использования различных норм фосфогипса в сочетании с минеральными удобрениями на аккумуляцию тяжелых металлов картофеля сортов Гала и Гранада.

6. Рассчитать биогеохимические показатели содержания тяжелых металлов в почвах и растениях.

7. Провести экономическую оценку целесообразности внесения фосфогипса в норме 2,0 т/га, 4,0 т/га, 6,0 т/га, 8,0 т/га на черноземе под посевы картофеля, на фоне $N_{150}P_{150}K_{300}$.

8. Обобщить данные полевого опыта, сделать соответствующие выводы и предложения.

Степень разработанности темы. Изучением вопросов химической мелиорации почв в почвенно-климатических условиях Поволжья, его последствий, отзывчивости сельскохозяйственных культур на данный агроприем, а также определения экономической целесообразности его проведения занимались многие ученые (Гришин Г. Е., 2002; Ивойлов А. В., 2002; Моисеев А. А., Прокина Л. Н., Каргин В. И., 2005; Шильников И. А., Гришин Г. Е., Колесников С. И. 2011; Чекаев Н. П., Лесков А. В., 2020; Головнева В. В., 2020; Лукманов А. А., 2022; Аканова Н. И., 2023 и др.). Тщательный анализ научных результатов исследований доказывает необходимость дальнейших научных изысканий в области мелиорации черноземов в условиях орошения в зависимости от доз, способов внесения, возделываемых культур и т.д.

Научная новизна. Впервые в условиях Самарской области на орошаемой черноземной почве проведены комплексные исследования по оценке эффективности действия фосфогипса Балаковского филиала АО «Апатит» при возделывании картофеля.

В исследованиях установлено, что внесение фосфогипса Балаковского филиала АО «Апатит» с суммарным содержанием с долевой концентрацией 70-80% гипса ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), 2-3% подвижного фосфора (P_2O_5), 15% оксида кремния (SiO_2) и 20-22% кальция (Ca) как в чистом виде, так и на фоне минеральных

удобрений $N_{150}P_{150}K_{300}$ обеспечивало нейтральную реакцию, повышенный уровень кальция, улучшение обеспечения серой, водно-воздушного режима, уменьшение плотности почвы, увеличение доступных питательных веществ.

Выявлено, что внесение фосфогипса в качестве мелиоранта в дозе 2-6 т/га содействовало достоверному повышению продуктивности картофеля сорта Гала на 3,07-7,6 т/га, сорта Гранада на 4,0-9,9 т/га, по сравнению с фоном.

Установлена высокая эффективность фосфогипса в нейтрализации кислотности почвенной среды: сдвиг обменной кислотности в зависимости от дозы мелиоранта составил 0,1-0,5 единиц pH при сочетании его с минеральными удобрениями. Выявлено существенное улучшение питательного режима чернозема обыкновенного остаточно-лугового малогумусного среднесуглинистого, повышение урожайности картофеля, улучшение качества и получение экологически безопасной продукции. Проведена экономическая оценка эффективности фосфогипса при возделывании картофеля.

Теоретическая и практическая значимость. Внесен существенный вклад в понимание необходимости гипсования черноземов, подвергшихся засолению. Результаты научных исследований доказывают возможность использования в производственных условиях Балаковского филиала АО «Апатит» с целью уменьшения засоленности пахотных почв, что способствует поддержанию почвенного плодородия, росту продуктивности возделываемых культур и формированию продукции с высокими показателями качества.

Установлено, что с экономической точки зрения на черноземных почвах Среднего Поволжья, имеющих повышенную реакцию почвенной среды, применение местных запасов фосфогипса эффективно на фоне минеральных удобрений.

Методология и методы исследования. Методология данных исследований основана на комплексном подходе к изучению эффективности фосфогипса Балаковского филиала АО «Апатит» в качестве материала для нейтрализации кислотности почв, включающем проведение полевых и лабораторных экспериментов. В работе использованы теоретические методы исследований (обработка результатов исследований методом статистического анализа) и эмпирические (полевые

опыты, графическое и табличное представление полученных результатов).

Основные положения, выносимые на защиту:

- положительное влияние сочетания фосфогипса с минеральными удобрениями на динамику агрохимических показателей и агрофизические свойства черноземов обыкновенных остаточно-луговатых и обыкновенных остаточно-луговатых карбонатных под посевами картофеля;
- отзывчивость картофеля на действие сочетания фосфогипса с минеральными удобрениями на почву;
- экономическая и агроэкологическая эффективность технологий возделывания картофеля при применении фосфогипса в сочетании с минеральными удобрениями.

Степень достоверности и апробации результатов. Степень достоверности полученных результатов обосновывается применением современных методов исследований как в полевых опытах, так и при проведении лабораторных анализов почвенных и растительных образцов, необходимым количеством наблюдений и учетов, результатами статистической обработки экспериментальных данных, проведением корреляционно-регрессионного анализа.

Показатели экспериментальной работы апробированы и внедрены в ИП Глава КФХ Цирулев Е. П. Приволжского района, ООО «Скорпион» и ООО «Весна» Безенчукского района Самарской области (приложения 2, 3, 4). Результаты исследований используются при чтении лекций во время учебного процесса для студентов агрономического факультета ФГБОУ ВО Самарский ГАУ по дисциплинам: агрохимия, системы земледелия, питание и удобрение садовых культур.

Положения научных исследований докладывались и обсуждались на заседаниях кафедры агрохимии, почвоведения и агроэкологии Самарского ГАУ в 2021-2024 гг., на конференциях молодых ученых Самарского ГАУ в 2021-2024 гг., на международных и научно-практических конференциях: «Приоритеты научно-технологического развития агропромышленного комплекса в современных условиях», Казань, 05-07 июня 2024 г.; «Современные проблемы агропромышленного ком-

плекса», Самара, 06 июня 2024 г.; «Технологические аспекты возделывания сельскохозяйственных культур», Горки, 23-26 января 2023 г.; «Инновационные достижения науки и техники АПК», Кинель, 28 февраля-03 марта 2022 г.; «Цифровые технологии в подготовке кадров АПК, как ключевой фактор повышения его эффективности». Актуальные проблемы противодействия коррупции в системе обеспечения экономической безопасности, Казань, 26 мая 2022 г.; «Теоретические и прикладные проблемы современной науки и образования», Курск, 24 мая 2021 г.; «Достижения в агробизнесе и биотехнологических исследованиях (ABR 2021), Краснодар, 24-26 мая 2021 г.; «Актуальные вопросы агропромышленного комплекса России и за рубежом», Иркутск, 11 ноября 2021 г.

Личный вклад соискателя. Автором разработана программа исследований, лично проведены закладка полевых и лабораторных экспериментов, соответствующие учеты и интерпретация экспериментальных данных, их экологическая и экономическая оценка, выявлены лучшие решения изучаемой проблемы и даны рекомендации сельскохозяйственному производству.

Публикация результатов исследований. По теме диссертации опубликовано 15 научных работ, в том числе, 3 из них, в рецензируемых научных изданиях. Получен патент на изобретение «Способ выращивания картофеля» регистрационный номер 2024133288 от 06.11.2024 года.

Структура и объем диссертации. Диссертация изложена на 185 страницах компьютерного текста и состоит из введения, 5 глав, заключения, библиографического списка и приложений. В работе содержится 48 таблиц, 7 рисунков, 4 приложения. Библиографический список включает 111 источников, в том числе 24 – зарубежных авторов.

1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

1.1. Виды мелиоративных мероприятий

Мелиоративное состояние орошаемых и осушенных земель ухудшается: площадь земель с хорошим почвенно-мелиоративным состоянием уменьшилась на орошаемых землях с 4,09 до 2,57 млн га; на осушенных – с 2,46 до 0,92 млн га. К 2021 году площади мелиорированных земель составляют 9,45 млн га, из них орошаемых – 4,67 млн га, осушаемых – 4,78 млн га (6% площади пашни). Государственный мелиоративный комплекс включает 669 оросительных, 900 осушительных и 57 систем комплексного назначения, а также 14 296 гидротехнических сооружений в составе гидромелиоративных систем и 878 отдельно расположенных. В настоящее время в стране реализуется Государственная программа эффективного вовлечения в оборот земель сельскохозяйственного назначения и развития мелиоративного комплекса Российской Федерации [55].

Обобщены данные по классификации органического вещества и специфическим органическим соединениям, образующимся в почве. Рассмотрена полифункциональная роль гумуса, его значение как индуктора биогеохимической активности почвенной экосистемы. Дана общая характеристика почвенной биоты, установлено, что деградация современных почв – следствие недооценки их биотической составляющей. Рассмотрены меры по гумификации возделываемых почв. Органическое вещество, продуцируемое геобионтами – важнейший компонент почвы, определяющий специфику ее признаков, свойств и режимов. Оно предопределяет основные экосистемные функции почвы – гетеротрофную, супрессирующую, трансформирующую и самоочищающую активности, реализуемые геобионтами. Масштабы дегумусирования почв России – 95 млн га (преимущественно пашни) – внушают серьезные опасения. В то же время отечественное агропроизводство располагает необходимыми ресурсами и возможностями для повсеместного применения высокоэффективных органических удобрений. Они позволяют стабилизировать и увеличить содержание почвенного гумуса. Основным источником образования

его различных форм являются сидераты, а также побочная продукция растениеводства (солома, корневые и пожнивные растительные остатки). Оздоровление угодий с деградированными почвами посредством внесения органики позволяет воссоздать плодородную и здоровую почву, обеспечивающую оптимизацию фитосанитарного состояния агроценоза. В последние десятилетия роль органических удобрений в стране практически повсеместно недооценивается. Почвенный гумус играет ключевую роль в оздоровлении и стабилизации почвенной экосистемы, в элиминировании и/или минимизации развития фитопатогенов, фитофагов, сорных растений. Систематическое применение органических удобрений – важнейший фактор воспроизводства гумуса и оздоровления почв агроценозов. При оптимизированном и повсеместном применении органики здоровая почва в составе наземно-почвенной экосистемы функционирует и как стабилизатор земного климата. Выступая в качестве стока и резервуара атмосферной углекислоты, почва смягчает негативные последствия глобального потепления. Территория России обеспечивает отрицательный баланс углекислоты и ее абсолютный сток [66, 67].

Мелиоративные работы как совокупность мероприятий направлены на нормализацию гидрологических и агроклиматических условий с целью повышения эффективности использования земель, а также на улучшение химических и физических свойств почвы. Мелиоративные мероприятия можно классифицировать, выделив виды метода реализации и поставленной задачи.

Ученые выделяют несколько способов классификаций мелиоративных веществ. Во-первых, мелиоранты можно разделить по составу на минеральные, органические и органоминеральные; по воздействию на мелиоранты, влияющие на реакцию почвы, мелиоранты-сорбенты, мелиоранты-структурообразователи и удобрения-мелиоранты. Для нашего исследования одним из важнейших принципов классификации является выделение видов по происхождению: мелиоративные веществ в этом случае делятся на природные, искусственные и нетрадиционные [102].

Реакция почвенного раствора влияет на доступность питательных элементов, растворимость и усвояемость растениями. Несмотря на то, что невозможно определить универсальную оптимальную кислотность для всех типов почв, представляется возможным выделить общие закономерности усредненных благоприятных значений, в зависимости от климата, водного и теплового режима почвы, характеров биохимических процессов, протекающих в почве. В России наиболее широко известным мелиоративным мероприятием является известкование кислых почв.

Кальцийсодержащие вещества оказывают положительное воздействие на некарбонатные и кислые почвы за счет улучшения структуры почвы, нормализации водно-воздушный баланса ППК, таким образом относясь к виду структурообразовательных мелиорантов. Это приводит к нейтрализации кислот и способствует разложению минералов, насыщая почву питательными элементами (мелиорант-удобрение).

Другим методом мелиорации, основанным на действии кальция, является внесение гипса, т.е. гипсование почв. Гипсование проводят в местах нарушения водных и солевых режимов почвы, в первую очередь, для окультуривания солонцов и солонцеватых почв. Улучшение физико-химических свойств засоленных почв происходит за счет замещения ионами кальция растворенных в почве ионов натрия. К источникам засоления относятся склады отходов, продукции, сырья. Помимо внесения, собственно, молотого гипса, применяют различные кальцийсодержащие нетрадиционные мелиоранты, отходы производства (к примеру, фосфогипс относится к категории отходов химической промышленности).

За длительный период в сельском хозяйстве накоплен большой опыт по улучшению плодородия орошаемых земель, имеющих неблагоприятные свойства, и выявлены эффективные способы восстановления их плодородия [19].

Использование для воспроизводства здоровья почвы преимущественно перегноя, биогумуса, компоста, сидератов и т. п. обосновано и апробировано многолетним опытом ведения систем органического земледелия. В этом случае биофильные элементы наиболее полно используются и растениями, и почвенной биотой. В то же время в процессе трансформации органики геобионтами потери

биофилов, других биологически значимых почвенных компонентов должны быть минимизированы. К сожалению, в отличие от минеральных удобрений коэффициенты использования органических удобрений пока не принято определять ни в нашей стране, ни за рубежом. Зеленые удобрения и промежуточные культуры достаточно широко применяются в качестве эффективного приема пополнения и воспроизводства почвенного гумуса, улучшения структуры почвы, а в ряде случаев – и для подавления сорняков. Их практическое значение особенно возрастает на полях, удаленных от животноводческих ферм, где дисбаланс органического вещества в почвах особенно значителен. Действительно, транспортировать навоз, другие местные органические удобрения более чем на 5 км от животноводческих ферм нерентабельно. Поэтому на удаленных полях наряду с применением соломы в качестве органического удобрения используют сидераты [38, 74, 66].

Наиболее востребованной классификацией мелиорантов по происхождению является упрощенное разделение на искусственные, традиционные и нетрадиционные.

Нетрадиционными мелиорантами для подкисления почв являются вещества-отходы химической, металлургической, нефтеперерабатывающей промышленности.

Из-за снижения способности поддерживать полноценную функциональную экосистему процесс истощения техногенно нарушенных земель проходит быстрее, чем процесс восстановления, при этом мощность антропогенного воздействия удваивается каждые 12-15 лет [11].

Следует отметить, что в конце предыдущего века около пятой части всех известковых удобрений являлись отходами промышленности. На сегодняшний момент из числа нетрадиционных мелиорантов активно используются определенные виды шламов, металлургические шлаки, золы, цементная пыль, отходы бурых углей, доломитовые и известковые отходы, остаточный мел и др. [52]. Нетрадиционные мелиоранты на основе осадков сточных вод, комплексные мелиоранты на основе глауконитов, кремнеземов или глиноземов [58] обладают высокой удобри-

тельной пролонгацией. Благодаря высоким ионообменным и сорбционным способностям предотвращается вымывание питательных элементов, что позволяет исключить повторное внесение мелиорантов в течение 4-6 лет [6].

В качестве органических мелиорантов применяют: торф, сапропель, осадки сточных вод, древесные опилки, перегной, а также другие вещества на основе остатков и продуктов жизнедеятельности растений и животных [87].

Ежегодно в мире производят более 40 млн тонн фосфорной кислоты. Свалки отходов промышленной переработки природного сырья постоянно пополняются и принимают масштабы, угрожающие устойчивому функционированию биocenозов. Текущие темпы роста производства фосфогипса оцениваются в 200 миллионов тонн в год, при этом коэффициент массового использования, согласно самым оптимистичным прогнозам, составляет 10-15%. Мировые запасы мелиоранта составляют уже более 4 млрд тонн.

Кроме внесения молотого гипса, применяют различные кальцийсодержащие нетрадиционные мелиоранты, которые входят в группу отходов производства (например, фосфогипс относится к отходам химической промышленности). Обязательным условием для нетрадиционных мелиорантов является отсутствие токсичных примесей.

Методом мелиорации на основе действия кальция является гипсование почв (внесение гипса). На промышленных территориях гипсование проводят в местах нарушения водных и солевых режимов почвы для замедления процессов галогенеза, окультуривания солонцов и солонцеватых почв. Улучшение физико-химических свойств засоленных почв происходит за счет замещения ионами кальция растворенных в почве ионов натрия [23].

Проблема утилизации и хранения фосфогипса имеет важное значение для многих стран, поскольку она связана с экологическими проблемами (загрязнение воды, земли и атмосферы). В настоящее время агентство по охране окружающей среды США запрещает использование фосфогипса из-за его радиоактивности. Например, фосфогипс из Центральной Флориды содержит в среднем 26 pCi/г радия, а в фосфогипсе из Северной Флориды – 10 pCi/г радия. Исключение сделано

для фосфогипса со средней концентрацией радия менее 10 pCi/г, который может быть использован только в качестве сельскохозяйственной добавки [94].

Производство фосфогипса в Китае также приобретает значительный масштаб. Крупнейшими провинциями с точки зрения производства являются Хубэй, Юньнань, Гуйчжоу, Сычуань и Аньхой [91]; следовательно, склады отходов в этих провинциях так же огромны.

На свалках химического завода Визовски (Польша) скопилось более 5 миллионов тонн апатитового фосфогипса. Эти отходы содержат редкоземельные элементы, которые перечислены в качестве «критического» сырья в Европейском союзе (ЕС) [98].

В России на существующих предприятиях по производству аммониевого фосфора накоплено более 500 миллионов тонн фосфогипса [100].

Фторапатит является основным фосфатным сырьем в мире. Месторождения океанического происхождения имеют определенный радиационный фон. Частично радиационные элементы остаются и в фосфогипсе. Несмотря на то, что в 1940-1970-х годах фосфогипс активно использовался в сельском хозяйстве в качестве ценного химического мелиоранта, восстанавливающего засоленные почвы, в 1980-х годах после катастроф на Чернобыльской АЭС Three Mile Island от применения фосфогипса резко отказались.

Тем не менее, производство фосфорной кислоты продолжается и возникает проблема складирования и захоронения многотоннажных отходов производства. Так, с 2000-х годов фосфогипс был переведен из статуса отходов в статус ценного ресурса, полностью соответствующего требованиям безопасности.

При использовании фосфогипса в сельском хозяйстве в качестве удобрения следует учитывать биодоступное количество металлов и изотопов (например, U). Так было сделано в долине реки Гвадалквивир [105]. Для использования фосфогипса в сельском хозяйстве и строительстве необходима его очистка от радиоактивных веществ, которая основана на выщелачивании радионуклидов органическим экстрагентом (раствор ТОФО в керосине). Благодаря этому способу из фосфогипса может быть удалено около 71,1% ^{226}Ra , 76,4% ^{210}Pb , 62,4% ^{238}U и 75,7%

⁴⁰K. Наряду с концентрацией радионуклидов снижается суммарная концентрация РЗЭ [85].

Чистый фосфогипс для внесения на сельскохозяйственные земли не всегда оказывает положительное воздействие на растущие культуры. Фосфогипс используется в качестве мелиоранта, однако, согласно исследованию, он оказывает негативное воздействие на почвенные субстраты. Это связано с изменением кислотности, содержания фторид- и фосфат-ионов, подвижных форм стронция и кальция. Добавление фосфогипса в количестве более 2% от массы способно вызывать токсичность почвогрунта. [103].

Свалки фосфогипса негативно влияют на окружающую среду может проявляться в загрязнении подземных и поверхностных вод, почвы и растительного покрова веществами, просачивающимися через защитный экран, в результате их испарения и вымывания со свалки атмосферными осадками, а также выброса в воздух под воздействием атмосферных воздействий и запыления. Свалка является источником гидродинамического воздействия на окружающую среду, вызывая изменения уровня грунтовых вод, что приводит к трансформации природного ландшафта. Кроме того, неправильная утилизация отходов производства фосфорной кислоты также создает проблему общественного здравоохранения, поскольку воздействие загрязняющих веществ приводит к их накоплению в пищевой цепи.

Необходимо предусмотреть решения этой проблемы, которые сводят к минимуму выброс и воздействие загрязняющих веществ. Одним из решений может быть расширенное использование «безопасного» фосфогипса в сельском хозяйстве, строительстве, что уменьшило бы общее количество складированного фосфогипса, свело бы к минимуму ущерб окружающей среде и снизило бы затраты на хранение и реализацию [106].

К факторам, которые ограничивают возможности применения фосфогипса, относятся содержащиеся в его составе примеси, усложняющие его транспортировку, поскольку находятся в тесной взаимосвязи с условиями окружающей среды – относительной влажностью и температурой воздуха.

Транспортировка фосфогипса и хранение на свалках влечет за собой инвестиционные и эксплуатационные расходы. Например, до 10% себестоимости фосфорной кислоты приходится на затраты на транспортировку и хранение фосфогипса [101].

Несмотря на многие экономические выгоды использования фосфогипса, некоторые исследователи считают, что его применение в качестве удобрения является нецелесообразным с экономической точки зрения [79].

Фосфогипс содержит остатки фосфата, фосфорной кислоты (до 4%, включая водорастворимую форму до 1,5%), сесквиоксид, соединения кремния, микроэлементы редкоземельных элементов в качестве примесей [89]. Следовательно, фосфогипс является мелиорантом и многокомпонентным удобрением [107].

Наличие кальция, фосфора и серы в фосфогипсе делает это вещество полезным для использования в качестве добавки к удобрениям в сельском хозяйстве. Преимущество использования фосфогипса в сельском хозяйстве заключается в том, что его не нужно очищать от P_2O_5 . Однако фосфогипс в том виде, в каком он поступает на свалку (без нейтрализации), не наносится на плодородную почву из-за высокой кислотности и плохих физико-химических свойств.

Существует хорошо известный процесс превращения фосфогипса в комплексное удобрение [88]. Процесс включает обработку исходного фосфогипса фосфатным раствором, фильтрацию и сушку готового продукта. Процесс обычно проводят в две стадии: на первой стадии предварительно прокаленный фосфогипс обрабатывают щелочно-карбонатным реагентом до pH 9-10, а на второй стадии полученную карбонатную пульпу смешивают с полупродуктом производства фосфорной кислоты – промывочной водой до pH 5,4-6. Таким образом, переработка фосфогипса позволяет получить комплексное KPCaS-минеральное удобрение и дикальцийфосфат.

Другой способ комплексного превращения фосфогипса в удобрения включает приготовление раствора карбоната аммония; превращение фосфогипса раствором карбоната аммония по реакции обменного разложения солей: $CaSO_4 \cdot 2H_2O +$

$((\text{NH}_4)_2\text{CO}_3) \text{ p-p} = \text{CaSO}_3 + (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$; отделение на фильтре преобразованной суспензии в раствор сульфата аммония, который выпаривают для извлечения кристаллического или гранулированного сульфата аммония; и остаток карбоната смешивают со сплавом нитрата аммония, гранулируют и сушат [93].

Однако оба метода имеют ряд недостатков: технологическую сложность процесса и образование сточных вод, которые требуют нейтрализации.

К недостаткам применения фосфогипса также можно отнести проблемы из-за его радиационного воздействия на окружающую среду и содержания тяжелых металлов, даже несмотря на то, что исследователи разработали технику безопасного применения этого мелиоранта.

Главной опасностью использования материала хранилищ фосфогипса исследователи называют повышенную радиоактивность. Фосфатная порода содержит Ca, P и природные радионуклиды уранового (^{238}U) и ториевого (^{232}Th) рядов. В фосфатных породах из различных регионов мира содержание ^{238}U и ^{226}Ra варьирует в широких пределах: от 37 до 4900 Бк/кг для ^{238}U и от 100 до 10000 Бк/кг для ^{226}Ra . Постоянное внесение фосфорных удобрений в почву будет приводить к растущему накоплению фосфора и радионуклидов в почве. Это представляет собой большую опасность, так как они могут пройти через слои почвы и раствориться в грунтовой воде [33].

В Бразилии суммарная активность радионуклидов, накопленных в хранилищах фосфогипса, составляет 12,4 ТБк. Расчёты были произведены на основе данных о количестве фосфогипса, производимого различными отраслями промышленности Бразилии [108].

Несмотря на то, что фосфогипс содержит большое количество полезных макро- и микроэлементов для развития сельскохозяйственных культур, их концентрации могут привести к токсичности, что повлияет на качество почвы и урожая. Кроме того, чрезмерное применение фосфогипса может привести к концентрации солей и, таким образом, повлиять на развитие культур.

Что касается положительных сторон [93], применение отходов PG в сельском хозяйстве в качестве удобрения почвы становится интересным, поскольку они содержат большое количество необходимых питательных веществ для развития сельскохозяйственных культур, например, макроэлементов (Ca, P и S) и микроэлементов (например, Se, Mn, Zn, Cu и Mo).

В агрономии фосфогипс можно эффективно использовать для рекультивации кислых почв (вместе с известью), для рекультивации засоленных почв и в качестве мелиорантов-удобрений (1 тонна фосфогипса содержит около 10 кг фосфоритов) для компостирования биопрепаратами и органическими удобрениями.

Использование фосфогипса может ускорить развитие растений и улучшить качество урожая. Однако фосфогипс не может быть использован в качестве альтернативы органическим или химическим удобрениям. Применение фосфогипса может снизить вымывание питательных веществ, отложений и агрохимикатов в грунтовые и поверхностные воды.

Таким образом, использование фосфогипса на различных деградированных землях представляет широкие перспективы использования в сфере сельского хозяйства. Тем не менее, необходимо определить эффективность и проблемы, связанные с конкретным применением мелиоранта, особенно в контексте экологических проблем. Стоит принимать во внимание необходимость непрерывности внесения мелиоранта и его несовместимости с такими веществами, такими как известь, органические кислоты, биоуголь и т.д.

В России количество солонцеватых и солонцовых почв уже превышает 20 млн га. Плановая мелиорация этих почв с целью возврата в использование требует, как минимум 4 т/га фосфогипса каждые 3-5 лет. Кроме того, большая часть почв России страдает от низкого содержания фосфора, серы и кальция, что снижает эффективность применения минеральных удобрений. Использование фосфогипсом в комплексе с расчетными системами питания культур позволяет решить эту проблему.

В работе «Эффективность применения фосфогипса нейтрализованного в рисовом севообороте» [81], изучили влияние фосфогипса на почву и культуры в течение нескольких лет после внесения. Исследование проводилось на почвах Краснодарского края. В почвах рисовых оросительных систем содержание подвижных форм бора, кобальта, цинка, марганца, молибдена, меди сократилось в среднем больше чем на 10 %. Эта проблема стоит особенно остро, так как из-за постоянного затопления происходит потеря азота, образование недоступных растениям соединений – фосфидов, сульфидов, гидрокарбонатов. Проблему деградации рисовых оросительных систем может решить применение агрохимических средств, в частности фосфогипса нейтрализованного ООО «ЕвроХим-БМУ».

Авторы исследования пришли к выводу, что действие после внесения, нейтрализованного фосфогипса сохраняется на протяжении 2-х лет. Влияние фосфогипса, внесенного в количестве 4 и 6 т/га, на следующий год после применения обуславливало увеличение урожайности зерна риса на 0,56 т/га (7,1%) и 0,33 т/га (4,2%), а зеленой массы люцерны 1-го года на 0,55 и 0,65 т/га (6,9 и 8,2%) и 0,77 и 0,80 т/га (9,7 и 10,0%), соответственно, при внесении весной и осенью. Во 2-й год последействия, нейтрализованного фосфогипса урожайность зеленой массы люцерны 1-го года на этих участках, была выше, чем на контрольных на 5,0-5,5% (0,56-0,62 т/га).

Благодаря внесению фосфогипса оптимизируется реакция среды почвы в благоприятном для риса интервале, пополняется содержание в почве фосфора, серы, кальция, кремния, микроэлементов, увеличивается количество мелкодисперсных частиц, формирующих поглощательную способность почвы, повышающих содержания элементов питания [81].

Замена в системе удобрения риса при внесении в основной прием 150 кг/га аммофоса на 40 кг/га карбамида и 4 т/га фосфогипса обеспечивает более высокий уровень содержания доступных растениям форм азота, фосфора и калия в почве, чем при внесении $N_{18+55,2+46}P_{80}K_{60}$, и обеспечивает повышение формирования урожая на 8-12%. Рост урожая происходит в результате повышения выживаемости растений, озерненности и массы зерна с растения [80]. Применение фосфогипса имеет

еще и агроэкологическое значение, заключающееся, во-первых, благодаря освобождению сотен гектаров земли, занятых отходом, но и благодаря значительному обогащению почв элементами питания.

Можно обнаружить данные о пролонгированном влиянии фосфогипса нейтрализованного на питательный режим почв и урожайность сельскохозяйственных культур [82]. Для рационального применения фосфогипса же на посевах риса необходимо оценить продолжительность его действия как поликомпонентного удобрения.

Последствие фосфогипса изучалось при внесении под рис в количестве 2, 4 и 6 т/га весной и осенью, в звене рис-рис, рис-люцерна и рис-рис-люцерна. При выращивании следующих после внесения фосфогипса культур вносилось только азотное и калийное удобрение на посевах риса. Повторность 4-х кратная. Площадь делянки 2500 м². Исследование проводилось на почве опытного участка: рисовая луговая маломощная слабогумусная на аллювиальных тяжелых суглинках.

В. С. Цховребов, А. Б. Умаров, В. И. Фаизова в исследовании «Влияние фосфогипса и удобрений на содержание элементов питания в черноземе южном и урожайность озимой пшеницы» изучили влияние фосфогипса и минеральных удобрений на урожайность и качество озимой пшеницы, а также на питательный режим чернозема южного карбонатного. Исследования проводили в Ставропольском крае в 2014-2017 гг.

Внесение серосодержащих минеральных удобрений и фосфогипса привело к увеличению обеспеченности почвы нитратным азотом на 4-13 мг/кг, подвижным фосфором на 13,5-17,0 мг/кг, подвижной серой на 2-8 мг/кг. Наибольшие изменения отмечены при совместном внесении фосфогипса, аммофоса и аммиачной селитры. В результате по содержанию подвижной серы почва переходила из низкообеспеченной в средне- и высокообеспеченную. Применение фосфогипса и удобрений не оказало существенного влияния на содержание подвижного калия в почве.

Важно отметить, что влияние фосфогипса без минеральных удобрений было значительно слабее, чем при их совместном применении. Внесение фосфогипса в чистом виде в дозах 3, 6 и 12 т/га увеличивало сбор зерна озимой пшеницы в 2016 г.

на 22,4-27,6%, в 2017 г. – на 19,3-20,5%, а совместно с минеральными удобрениями – на 39,4-44,7 и 22,6-33,6%, соответственно. Содержание белка в зерне изменялось по вариантам от 13,3 до 13,6%, клейковины – от 19,5 до 20,2% только в вариантах с фосфогипсом.

В работе «Проблемы гипсования солонцовых почв в Ставропольском крае» Сычев В.Г. и др. исследуют историю вопроса мелиорации солонцовых почв. На долю каштановых и черноземных солонцов и солонцеватых почв на Ставрополье приходится порядка 1500 тыс. га. Каштановые солонцовые почвы отличаются от черноземных тем, что они формировались на лессовидных суглинках, в то время как вторые – на элювии третичных глин майкопского и сарматского ярусов. Что касается морфологического строения, они схожи наличием иллювиального солонцового или солонцеватого горизонта, обладающего глыбистостью структуры, низкой пористостью, высокой плотностью.

Одним из самых эффективных способов повышения плодородия солонцовых почв является гипсование. Его теоретическим обоснованием выступает устранение высокой щелочности почвы и замена натрия в ППК пахотного слоя на ионы кальция. При процессе замены натрия в ППК происходит снижение дисперсности и гидрофильности почвенной массы, а, значит, происходит улучшение ее водно-физических, физико-химических и биологических свойств [73].

Основным поставщиком фосфогипса в Ставропольском крае выступает ООО «Алмаз Удобрения» и ООО «ЕвроХим Белореченские минеральные удобрения», которые могут полностью удовлетворить ежегодную потребность в фосфогипсе в размере 200-230 тыс. т. Проблему солонцовых почв невозможно игнорировать, так как продуктивность солонцов составляет 45% от продуктивности черноземов, и 48% от продуктивности каштановых почв. Возделывание культур на таких землях приводит к потере половины потенциального урожая.

В работе «Эффективность применения фосфогипса в севообороте с картофелем» рассмотрено использование фосфогипса в качестве комплексного минерального удобрения. Результаты трехлетнего полевого опыта по агроэкологической эффективности применения фосфогипса АО «Апатит» в севообороте с картофелем

указали на агрономически и экологически положительное безопасное воздействие фосфогипса на физико-химические свойства дерново-подзолистой супесчаной почвы и формирование продуктивности и качества продукции картофеля. Ежегодное применение минеральных NPK-удобрений привели к снижению содержания подвижной серы в пахотном слое почв соответственно по годам (кг/га): на 12,9; 5,7 и 7,2 (т.е. в среднем за 1 год на 8,6). Также внесением фосфогипса было обусловлено повышение содержания серы в почве на 9,7; 17,5; 26,5 и 32,9 мг S/кг по сравнению с исходным уровнем в соответствии с внесенными дозами мелиоранта (0,5 т/га +35,1, с дозой 1,0 т/га +57,6, с дозой 1,5 т/га +79,8 и на фоне 3,0 т/га +105,6). Однократное внесение фосфогипса обеспечило повышение содержания подвижного фосфора на фоне доз 1,5 и 3,0 т/га на 72 и 40 мг/кг. В целях оценки возможной токсичности мелиоранта был проведен анализ соотношения Ca/Sr в почве, который находился на безопасном уровне и составило в контрольном варианте 97 и 104-117, на фоне внесения фосфогипса. В сумме за время исследований применение мелиоранта обеспечило увеличение продуктивности звена севооборота «картофель-ячмень-картофель» на 30-38 ц зерн. ед/га т.е. на 19-24% в сравнении с использованием только NPK-удобрений.

Авторы исследования «Эффективность применения фосфогипса в полевом севообороте с ячменем» рассматривают фосфогипс в качестве способа оптимизации питания растений серой. Целью исследования было изучить действие фосфогипса АО «Апатит» на плодородие почвы, продуктивность качество зерна ячменя.

Исследование химического состава показывает, что фосфогипс содержит не менее 17% S, 21% Ca, до 1% общего фосфора (P_2O_5) и характеризуется в качестве кальций-серно-фосфорного удобрения. Основное его вещество ($CaSO_4 \times 2H_2O$) составляет не менее 80%. Эколого-токсикологическая оценка свидетельствует, что в мелиоранте присутствуют тяжелые металлы, мг/кг: Cu – $15,7 \pm 1,2$, Pb – $5,8 \pm 0,5$, Co – $3,2 \pm 0,6$, Ni – $2,1 \pm 0,2$, Mn – $14,1 \pm 0,9$, Cr – $1,6 \pm 0,4$, Cd – $0,70 \pm 0,05$, Hg – $0,04 \pm 0,02$, Zn – $4,6 \pm 0,8$, что значительно ниже показателей ПДК [43].

Сравнение сезонных результатов на слабокислой дерново-подзолистой почве показало, что после вегетации ячменя на фоне доз фосфогипса 1,5 и 3,0 т/га выявлено достоверное снижение гидролитической кислотности на 0,31-0,46 мэкв/100 г почвы, соответственно. В вариантах с внесением только NPK (1-й вар.) и доз мелиоранта 0,5 и 1,0 т/га (2-й и 3-й варианты) существенных изменений не установлено. Применение фосфогипса обеспечило повышение содержания подвижного фосфора на 28-60 мг/кг в сравнении с исходным уровнем – на фоне 1,5 и 3,0 т/га, соответственно, на 42 и 60 мг/кг.

В сравнении с фоновым вариантом содержание подвижной серы после уборки урожая в 2013 г. при внесении ФГ возросло, соответственно, на 11,5, 19,2, 30,3 и 40,0 мг/кг почвы.

Так, установлена агрономически высокая эффективность и экологическая безопасность применения фосфогипса в качестве кальций-серно-фосфорного удобрения, повышающего плодородие дерново-подзолистых почв.

1.2. Влияние микроорганизмов на плодородие почв

Почва – это не физическая или химическая субстанция, а прежде всего биологическая и биохимическая система, одним из главных компонентов которой является почвенная микрофлора [28].

Кондуктивная почва агроценозов (то есть благоприятствующая сохранению и размножению фитопатогенов) – это основное депо, фактор выживания и передачи во времени инокулюма фитопатогенных микроорганизмов, преимущественно микромицетов. На десятках миллионов гектаров РФ экономический ущерб от возбудителей гнилей корней и основания стебля зерновых злаков – гельминтоспориозной, фузариозной, питиозной, ризоктониозной, церкоспореллезной этиологии – ежегодно в среднем оценивается в 10-20%, а в отдельные годы – до 67% потерь урожая пшеницы и ячменя [13, 68, 75].

По данным ФАО, мировые площади деградированных и больных (кондуктивных) почв превысили 1,2 млрд га, а прямые убытки от почвоутомления, фитотоксичности почвы и вредоносности почвенных фитопатогенов составляют ~25% потерь мирового урожая. Увеличение ареала кондуктивных почв (благоприятных для фитопатогенов) и их заселение, в частности, возбудителями корневых гнилей важнейших сельскохозяйственных культур превратилось в мировую проблему. Эти фитопатогены на территории России практически повсеместно (на ~80%) заселили почву агроценозов зерновых злаковых культур выше биологических порогов вредоносности (*БПВ*). Жизнеспособность их инокулюма даже в отсутствие растений-хозяев сохраняется в течение 5-15 лет [13, 76].

Концепция «качества и здоровья почвы» сформулирована, официально одобрена и активно реализуется в США с конца XX века [41, 99]. В течение последнего десятилетия она привлекла внимание почвоведов и экологов разных стран [63, 68].

Прагматичные американские коллеги (из Службы по охране природы МСХ США) определяют качество почвы так: «это то, что делает почву настолько хорошей, насколько мы этого желаем» [96, 99]. Применительно к агро сфере здоровье почвы (наряду с ее плодородием) – важная категория ее качества. Для урбано-сферы эта характеристика почвы также имеет первостепенное значение [22].

Приступая к характеристике микронаселения различных почв, необходимо, прежде всего, отметить большую его динамичность. Численность микроорганизмов довольно сильно меняется не только в течение года, но и в небольших отрезках времени. Это является следствием динамики температуры и влажности почвы, состояния растительного покрова и т.д. [36]. Методы ведения сельского хозяйства сильно влияют на развитие микроорганизмов почвы, формируя микробное сообщество ризосферы, стимулируя активность полезных микроорганизмов ризосферы и ограничивая активность почвенных патогенов р. *Fusarium*. Действительно, севооборот, обработка почвы и внесение органических удобрений могут в некоторой степени контролировать почвенные патогены с помощью различных прямых и косвенных механизмов, связанных с микроорганизмами [24]. Влияние почвенной микробиоты, защищающей растения, на их здоровье представляет особый интерес в

случае почв, подавляющих развитие болезней, которые были определены Бейкером и Куком (1974):

- 1) почвы, в которых патоген не приживается или не сохраняется;
- 2) приживается, но наносит незначительный вред или не наносит его вовсе;
- 3) приживается и вызывает болезнь в течение некоторого времени, но затем болезнь становится менее опасной, хотя патоген может сохраняться в почве.

Подавляющие рост растений почвы представляют собой резервуар полезных микроорганизмов, которые могут обеспечить эффективную защиту растений от различных болезней, передающихся через почву. Этот потенциал подавления роста растений в подавляющих рост растений почвах имеет большое значение при рассмотрении фитопатогенов, таких как *Fusarium spp.*, которые наносят всё больший ущерб сельскохозяйственным культурам в условиях продолжающегося изменения климата [95].

До недавнего времени оценка супрессивности почвы (применительно к фитопатогенным организмам) осуществлялась косвенно, посредством определения численности почвенных антагонистов – бактерий, грибов, актиномицетов. Таким способом характеризовалась только биотическая (микробиологическая) супрессивность [97]. Известны способы почвенных пластинок, агаровых блоков, а также почвенных разведений [49], позволяющие определить численность различных почвенных антагонистов. Способ оценки супрессивности почвы в отношении болезнетворных бактерий человека, используемый для гигиенической оценки почвы, также достаточно сложен и предназначен только для выявления супрессоров патогенных бактерий [46]. Все названные способы характеризуются трудоемкостью и длительностью (не менее 7 суток), что не всегда приемлемо при проведении массовых оперативных анализов почвенных образцов. Однако самое главное – методы оценки биотической супрессивности не характеризуют общую супрессивность, обусловленную, кроме биоты, также химическими и физическими свойствами почвы.

Сроки выживания болезнетворных (патогенных и условно патогенных) микроорганизмов зависят от их видового состава, типа почвы, ее гидротермического

режима, pH, степени и природы загрязнения (органическое, микробное, химическое или иное). Самоочищение почвы от болезнетворных микроорганизмов происходит из-за отсутствия необходимого питательного субстрата, воздействия неблагоприятных экофакторов и антагонистов-супрессоров (сапротрофов, бактериофагов, бактерий-паразитов, простейших) [48].

Растения получают серу из почвы, в виде сульфатных групп. Достаточным считается количество серы в почве 10-15 кг/га, меньшее количество приводит к вырождению микрофлоры, специализирующейся на переработке белковых веществ в минеральные соединения серы и азота, что обуславливает голодание растений. Недостаточное питание растений серой не только снижает урожайность и качество продукции, но и уменьшает эффективность использования азота из удобрений растениями. Таким образом, повышается риск потерь азота, что неблагоприятно сказывается на состоянии окружающей [51, 96, 109, 110]. Одним из эффективных и дешевых серосодержащих удобрений может быть фосфогипс.

Выбирая свой микробиом ризосферы, растения могут сами способствовать подавлению роста [14]. Почва представляет собой самый богатый из известных резервуаров микробного биоразнообразия и состоит из нескольких компонентов: основной массы почвы, содержащей микроорганизмы, на которые не влияют корни; ризосферы, где почвенные микроорганизмы находятся под влиянием корней (и корневых выделений); ризоплана, на котором находятся микроорганизмы, прикрепляющиеся к корням; и эндосферы, где микроорганизмы колонизируют ткани корней. В ризосфере и ризоплане обитает множество бактерий, архей, оомицетов и грибов, отдельные представители которых могут оказывать на растение положительное, отрицательное или нейтральное воздействие. Коллективный геном этого микробного сообщества больше, чем геном самого растения, и его часто называют вторым геномом растения. Таким образом, этот союз растения и связанных с ним микроорганизмов представляет собой голобионт, который функционирует взаимозависимо, слаженно и сложно. В этой системе растение играет ключевую роль, поскольку почти 40% всех фотосинтетических продуктов выделяются непосредственно корнями в ризосферу и служат топливом для микробных сообществ, тем

самым привлекая и формируя этот микробиом. Эти фотосинтетические продукты зависят от генотипа растения, стадии его развития, метаболизма, иммунной системы и способности выделять экссудат. В этом контексте эффективность подавления будет зависеть от разнообразия и функционирования микробиома [29].

В почвообразовании принимают участие высшие зеленые растения, низшие растения, бактерии, грибы, актиномицеты, водоросли, высшие позвоночные и мелкие беспозвоночные животные (членистоногие, моллюски, черви, простейшие) [36]. За последние годы происходит сокращение применения органических удобрений в сельскохозяйственном производстве в связи с недостаточным объёмом их производства и высокой энергозатратностью [9].

Для предотвращения негативного влияния соломы и усиления ее положительного действия в качестве удобрения необходимо обеспечить условия для ее скорейшего разложения и стимулировать наиболее полную трансформацию растительной биомассы, поступающей с соломой в почву. Решение данной задачи возможно при использовании микробиологических препаратов, содержащих эффективные штаммы микроорганизмов, которые позволяют регулировать состав и численность микробного комплекса, выстраивать специальные метагеномные сети, вовлекая в почвенных условиях в процессы деструкции аборигенную микрофлору, отбирая наиболее производительные группы микроорганизмов [10].

В последнее время грибы находят все большее применение в самых разнообразных областях деятельности человека. На данный момент хорошо изучены свойства только незначительного количества известных видов. В связи с этим необходимо как детальное изучение биологии поиск новых полезных свойств других грибов [56].

Важная роль в почве принадлежит микромицетам. Во-первых, с почвой связано большое количество фитопатогенов; во-вторых, микромицеты с сапротрофным типом питания, участвуя в деструкции послеуборочных остатков, способствуют снижению запаса инфекционного начала; в-третьих, грибы-антагонисты обеспечивают антифитопатогенный потенциал почвы [15]. Исследовано, что фосфогипс может успешно применяться в биотехнологиях защиты окружающей

среды, где он выступает как носитель бактериальной культуры и, в тоже время, как источник минерального питания для развития микроорганизмов. При этом ФГ может использоваться для очистки нефтесодержащих шламов, снижения содержания подвижных форм тяжелых металлов, как иммобилизационный материал в био-фильтрах при газоочистке. Учитывая то, что фосфогипс является отходом, то этот способ использования является одной из эффективных технологий защиты окружающей среды [43]. Обобщая глобальные функции почвенного покрова Земли, Г. В. Добровольский подчеркивал его полифункциональную роль как:

- а) уникальной среды обитания разнообразных организмов, обеспечивающих биологическую продуктивность суши, ее природных и антропогенных биоценозов;
- б) аккумулятора энергии и биофильных элементов;
- в) связующее звено биологического и геологического круговорота веществ и энергии;
- г) фактора биологического разнообразия и эволюции организмов;
- д) фактора устойчивости функционирования биосферы.

Разнообразные функции почв наземных экосистем ученый подразделил на физические, химические, физико-химические, биологические и регуляторно-информационные [17].

Объективно следовало бы их дополнить средообразующими, оздоровительными функциями почвы. Во многих агроценозах именно они обеспечивают экологичность продукции наземных экосистем и самое главное – качество жизни самого человека [69].

1.3. Современное состояние отрасли картофелеводства

Картофель впервые начали культивировать приблизительно 5 тысяч лет назад жители бассейна озера Титикака, которое расположено на границе Перу и Чили. В те времена картофель играл очень важную роль в жизни индейцев западных территорий Южной Америки: индейцы обожествляли картофель и приносили

ему жертвы. В Европе картофель прижился не сразу, прежде он прошел долгий путь непризнания и несправедливого осуждения. Во Франции, например, в конце XVIII века цветы картофеля носили в волосах, из них делали букеты. В Германии возделывали картофель на клумбах перед дворцами. В России, куда первый мешок был завезен при Петре I, среди крестьян бытовало суеверие: картофель рождается с головой и глазами, как человек, поэтому есть его – значит есть души человеческие. По-настоящему картофель в России стали разводить только после семилетней войны 1756-1763 гг., когда солдаты прошли Польшу и Пруссию и воочию увидели растущий там картофель, попробовали его и привезли в Россию [2].

Картофель – культура разностороннего использования. Клубни картофеля являются сырьем для перерабатывающей промышленности спиртовой, крахмалопаточной, каучуковой и др. Он является хорошим кормом для скота [40].

База данных FAOSTAT ФАО, обновленная в конце декабря 2023 года, содержит статистику производства картофеля до 2022 года. Согласно этим данным, в 2022 году суммарный среднегодовой объем мирового производства картофеля оценивается на уровне 370-380 млн тонн, при этом Китай (95,5 млн тонн) и Индия (56 млн тонн) были ведущими производителями. Германия произвела 10,6 млн тонн, Франция – 8 млн тонн, Нидерланды – 6,9 млн тонн, Великобритания – 4,8 млн тонн, Бельгия – 3,6 млн тонн. Россия произвела 18,9 млн тонн, а Украина – 20,9 млн тонн.

За последние десятилетия в глобальном масштабе наблюдалось существенное увеличение производства картофеля сосредоточены в умеренной зоне северного полушария, где он выращивается преимущественно в течение летнего сезона и является одной из важнейших по значимости сельскохозяйственных культур в агропродовольственных системах многих стран наряду с пшеницей, рисом и кукурузой. Кроме того, для многих производителей картофель также имеет важное значение как товарная культура и является важным источником дохода.

Современное состояние российской селекции и семеноводства картофеля не обеспечивает в полной мере конкурентоспособность многих селекционных разра-

боток, которые отстают пока еще от запросов товаропроизводителей [65]. По данным Минсельхоза, площадь под картофель в 2024 году сократилась на 33,9 тыс. га по сравнению с прошлым годом. Это, естественно, отразилось на валовом сборе картофеля, планируемые показатели 2024 года на 1,4 млн тонн меньше, чем в рекордном 2023 году, когда с полей убрали 8,6 млн тонн.

Важно отметить, что, хотя данные FAOSTAT являются исчерпывающими, они могут не совпадать в точности с официальными данными, полученными от правительств или отраслевых источников некоторых стран, хотя в целом они дают надёжную картину.

Увеличение производства картофеля происходит интенсивным путем с применением инновационных технологий, а также использованием качественного семенного материала, новых средств защиты растений и высокоэффективных минеральных удобрений. На основе обобщенных данных Росстата за 2011-2017 гг., среднегодовая емкость рынка картофеля в России оценивается в пределах 31 млн т, что выше пороговых значений, установленных Доктриной продовольственной безопасности. Структура использования картофеля включает в себя: пищевое потребление (в свежем виде) – 15-16 млн т; семена – 6-7 млн т; кормовые цели – 5-6 млн т; переработку – до 1 млн т; импорт – 0,7-1,5 млн т; экспорт – 50-70 тыс. т. По данным Минздравсоцразвития России, рекомендуемая норма потребления картофеля 95-100 кг на человека в год, а по данным Росстата в среднем потребляется 110 кг. Самообеспеченность картофелем в среднем по России составляла в 2013 г. – 99%, в 2014 г. – 101%, в 2015 г. – более 105% [25].

Клубни картофеля – прекрасное сырье для спиртовой, крахмалопаточной, декстриновой, глюкозной, каучуковой и других отраслей промышленности [77].

Один из факторов, влияющих на низкий уровень урожайности картофеля – качество семенного материала. Картофель, зараженный различными фитопатогенами, обнаруживается во всех категориях хозяйств и практически во всех регионах, как с благоприятными, так и с неблагоприятными условиями возделывания [42].

Научной основой для повышения продуктивности картофеля служат общие законы земледелия, важнейшими из которых являются закон равнозначности и незаменимости факторов жизни растений, закон минимума, оптимума и максимума, закон совокупного действия факторов жизни, закон возврата [3], закон единства синтеза и разложения органического вещества (Писарев Б. А., 1971). Производство картофеля в России отличается определенной устойчивостью, так как его основное производство развернуто в личных хозяйствах населения, которых в стране, по данным Е. А. Симакова насчитывается до 18 млн. Но в хозяйствах этого типа, по сравнению с промышленным производством, урожайность картофеля значительно ниже: преимущественно ручной труд, экстенсивные технологии выращивания, низкое качество посадочного материала [64].

В России в настоящее время действует Федеральная научно-техническая программа развития сельского хозяйства на период 2017-2030 гг. [55]. ИП Цирулев Е. П. является участником данного проекта. В качестве развития данной отрасли выбран был путь увеличение качества урожая за счет выведения новых сортов и выращивания на товарные цели более высоких репродукций (не ниже элиты в товарный картофель). В проекте документе указан низкий технический и технологический уровень отечественного оригинального семеноводства, поэтому ситуация в сфере научной обеспеченности отрасли картофелеводства требует кардинального изменения: создание новых сортов, ведение индивидуального отбора, улучшение качества семеноводства и т.д.

1.4. Биологические и агротехнологические приемы регулирования урожайности картофеля и особенности его возделывания

Сорт картофеля – это основа будущего урожая; его роль, по мнению ученых, в повышении урожайности находится на уровне 70-80% и только 20% – это влияние технологий его выращивания [5].

Возделывание этой культуры приносит немалый доход. Картофель представляет собой уникальный продукт для здорового питания: источник витаминов,

макро- и микроэлементов, антиоксидантов, незаменимых пищевых и физиологически активных веществ, аминокислот, углеводов, биофлавоноидов, фитонцидов [72].

Картофель является однолетним, многостеблевым травянистым растением, которое может размножаться как вегетативным способом (из клубней), так и семенами (из ягод).

Стебель травянистый, обычно состоит из трех или четырехгранных ребер. В начале вегетации он стоит, но по мере роста и накопления биомассы, становится тяжелый и разваливается.

Листья картофеля расположены на стебле по спирали, по мере роста становятся непарноперистыми, с чередующимися супротивными крупными долями.

Плод – двугнездная мелкосеменная ягода шаровидной или овальной формы.

Семена мелкие, плоские, с согнутым зародышем, светло желтого цвета.

Клубень картофеля представляет собой утолщенное окончание подземного, трансверсально расположенного побега, который образуется из пазухи пристеблевого листа вертикально растущего основного побега [84].

В основе любой рациональной структуры технологических приемов возделывания культуры положены общие принципы земледелия, заключающиеся в достижении приемлемой продуктивности растений, за счет полного использования биопотенциала сорта, регулирование различных процессов в агросистеме, проведение интегрированной защиты растений, а также использование приемов, не наносящих вред окружающей среде, способствующих восстановлению естественного плодородия почвы [47].

Потребность культурных растений в факторах внешней среды в разные периоды жизни различна. Период всходов картофель менее чувствителен к недостатку влаги, чем в последующие периоды бутонизации и цветения. Кроме того, требования растительного организма в отношении любого фактора жизни изменяются в зависимости от наличия других условий. Поэтому актуальной задачей земледелия является глубокое изучение и учет требований растений к условиям произрастания с целью более полного удовлетворения их потребностей в необходимых факторах жизни и получения наивысшего урожая с хорошим качеством продукции [32].

Картофель – светолюбивая культура, короткого дня. При дефиците или отсутствии света клубни начинают прорастать этиолированными, с длинными междоузлиями ростками, которые быстро ломаются. При малом освещении, ростки становятся окрашенными и короткими, на полном свету – короткие, толстые, зеленые. При дефиците света растения начинают вытягиваться, развитие их существенно замедляется, листья теряют способность к трансформированию углекислого газа. Поэтому следует правильно размещать рядки картофеля. При северо-южном их направлении, растения в течение суток, освещаются более равномернее, по отношению с западно-восточным. При интенсивном и продолжительном освещении растения лучше растут и развиваются даже при низких температурах. Клубни и столоны на свету приобретают зеленую окраску, в них формируется хлорофилл и резко увеличивается накопление ядовитого вещества – соланина. Накопление соланина повышает иммунитет и устойчивость их к заболеваниям, озеленённые клубни имеют хорошую семенную продуктивность [4].

Даже при небольшом уменьшении освещения наблюдается пожелтение ботвы, вытягивание стеблей, угнетается рост, развитие и продуктивность растений [104].

Всходы картофеля лучше развиваются при прохладной и влажной погоде. В этот период растения очень чувствительны к жаре и засухе. Наиболее благоприятной для роста ботвы является температура почвы 15-20°C, при температурах выше 40°C рост ботвы прекращается [84].

Потребность картофеля в тепле за период от посадки до появления всходов у ранних сортов составляет 300°C, среднеранних – 330-350°C, среднепоздних – 360-385°C. Хорошее клубнеобразование идет при среднесуточной температуре почвы 16-19°C (19-22°C днем и 12-14°C ночью). Температура почвы ниже 6°C и выше 29-30°C останавливает рост клубней [34].

Важнейшее место среди факторов жизни у картофеля занимает вода.

Располагая значительной площадью листьев, а значит, расходуя большое количество воды на испарение, картофель имеет относительно слаборазвитую корневую систему. Максимальная глубина проникновения корней у картофеля составляет от 59 до 140 см [111].

Если рассматривать потребность картофеля в воздухе, то повышение уровня минерального питания усиливает дыхание растений, но одновременно с этим значительно в большей степени влияет на площадь ассимиляционной поверхности, продолжительность жизни листьев, усвоение двуокиси углерода и интенсивность фотосинтеза, что является одной из причин быстрого роста растений при улучшении режима питания [20].

Доказано, что при урожайности картофеля 25 т/га за вегетацию культура поглощает около 15 т углекислоты или 150 кг/сутки. Известно, что, при внесении в почву 40 т/га навоза выделяемый углекислый газ с этой площади летом увеличивается на 100-200 кг в сутки. Большую часть CO_2 растения потребляют из приземного слоя воздуха. Поэтому для создания благоприятных условий для фотосинтеза необходимо формировать посевы с хорошим воздухообменом, поддерживая почву в рыхлом состоянии для лучшего газообмена между почвенным и атмосферным воздухом [20, 50].

В крупнотоварном производстве объем семенного материала отечественных сортов составляет менее 10%. В тоже время, семенной материал широко известных зарубежных сортов в доступном объеме поставляется европейскими селекционно-семеноводческими компаниями или их представителями, локализовавшими его производство на территории РФ. В условиях реальной конкуренции и необходимости контрактации выращиваемой продукции, крупным и средним товаропроизводителям необходимо получать высокие качественные урожаи сортов картофеля, которые гарантируются при использовании соответствующих современных технологий возделывания [26, 27]. При этом большая часть востребованного отечественного сортимента представлена 3-4 сортами картофеля, созданными более 30 лет назад селекционными научными учреждениями России, а также новыми сортами государственных селекционно-семеноводческих центров научных 206 учреждений и агропредприятий в последние 8-10 лет. В Госреестре РФ насчитывается свыше 200 зарубежных сортов, из которых в товарном картофелеводстве используется не более 15-20 наиболее востребованных сортов. Представители зарубежных компаний обеспечивают не только производство качественного семенного материала

этих сортов, но и технологическое сопровождение с учетом особенностей их возделывания, поэтому эти сорта широко представлены на рынке семенного и товарного картофеля по всей территории России.

Для культуры картофеля необходима оптимизация минерального питания с начальных этапов вегетации. Это обусловлено тем фактом, что корни формируются намного активнее и заканчивается к началу цветения [83]. В формировании урожая картофеля большая роль принадлежит зольным элементам. О потребностях в элементах корневого питания судят по выносу их урожаем клубней. И. А. Стебут отмечал, что для накопления 100 ц клубней требуется N – 40 кг, P_2O_5 – 119 кг, K_2O – 65 кг. По данным А. Г. Лорха, расход питательных веществ на 100 ц урожая: N – 48 кг, P_2O_5 – 22 кг и K_2O – 108 кг. А. И. Тимман приводит следующие цифры выноса питательных веществ на 100 ц урожая: N – 50-60 кг, P_2O_5 – 20 кг и K_2O – 108 кг. Б. А. Писарев, обобщив данные о потреблении питательных веществ растением картофеля, считается, что в среднем каждые 100 ц клубней выносят около 50 кг N, 25 кг P_2O_5 и 90 кг K_2O [60].

Из всего выше изложенного, нужно понимать, что картофель достаточно требовательная культура и в период вегетации картофеля почва должна быть рыхлой, сравнительно легкой по гранулометрическому составу. Подборка посадочного материала должна быть продуманной и с учётом районированности сорта, проверенным и прошедшим предпосадочную обработку, семена высокой репродукции, а растения, в период вегетации, должны быть защищены от сорняков, болезней, и вредителей. Из-за нарушения технологии выращивания, сроков работы, не только снижается рентабельность производства, но и увеличивается экологические издержки. При несоблюдении норм и сроков внесения пестицидов и агрохимикатов можно получить проблемы экологического и фитопатологического характера, таких как выработка резистентности болезням, вредителям и накопления пестицидов в продукции и почве. Регулярное применение химических средств защиты растений приводит к устойчивости фитопатогенов к пестициду и развитию резистентности у вредителей. При нарушении регламентов применения в микробиоте

почвы накапливаются токсикогенные организмы, а в грунтовых водах – остаточные количества пестицидов, что отрицательно влияет на здоровье человека, животных и растений.

1.5. Влияние агротехнических приемов на содержание тяжелых металлов в почвах, на урожайность и качество картофеля

Во второй половине XX века интенсивное применение минеральных удобрений (точнее, переудобрение) в странах Европы и Азии дорого обошлось экосфере: в этих регионах применяли самые высокие нормы их расхода, в силу чего возникли и наиболее серьезные проблемы, связанные с загрязнением среды.

Роль тяжелых металлов двухфазна: они необходимы для нормального протекания физиологических процессов и считаются эссенциальными (жизненно важными) микроэлементами, но также могут быть токсикантами и при высоких концентрациях являются ингибиторами и причиняют вред организму.

Основными микроэлементами являются: железо, марганец, бор, натрий, цинк, медь, молибден, хлор, никель, кремний. Их роль в жизни растений нельзя недооценивать. Недостаток микроэлементов хоть и не приводит к гибели растений, но сказывается на скорости протекания различных процессов. Это влияет на качество бутонов, плодов и урожаях в целом.

Сера – составной элемент протеинов, витаминов, аминокислот цистина и метионина. Участвует в процессах образования хлорофилла. Растения, которые испытывают серное голодание, нередко заболевают хлорозом. Болезнь поражает главным образом молодые листья. Избыток серы приводит к пожелтению краев листьев, их подворачиванию вовнутрь. Впоследствии края обретают коричневый оттенок и отмирают. В некоторых случаях возможно окрашивание листьев в сиреневый оттенок.

Железо – составной компонент хлоропластов, участвует в производстве хлорофилла, обмене азота и серы, клеточном дыхании. Железо – необходимый компо-

нент многих растительных ферментов. Этот тяжелый металл играет наиболее важную роль. Его содержание в растении достигает сотых долей процента. Неорганические соединения железа ускоряют биохимические реакции.

При дефиците этого элемента растения нередко заболевают хлорозом. Нарушаются дыхательные функции, ослабляются реакции фотосинтеза. Верхушечные листья постепенно бледнеют и усыхают.

Марганец – активизирует работу ферментов, участвует в синтезировании протеинов, углеводов, витаминов. Марганец также принимает участие в фотосинтезе, дыхании, углеводно-белковом обмене. Недостаток марганца приводит к осветлению окраски листьев, появлению отмерших участков. Растения заболеванию хлорозом, у них отмечается недоразвитие корневой системы. В серьезных случаях начинают засыхать и опадать листья, отмирать верхушки веток.

Цинк – регулирует окислительно-восстановительные процессы. Является компонентом некоторых важных ферментов. Цинк повышает выработку сахарозы и крахмала, содержание в плодах углеводов и белков. Он участвует в реакции фотосинтеза и способствует выработке витаминов. При нехватке цинка растения хуже противостоят холоду и засухе, уменьшается содержание в них белка. Цинковое голодание также приводит к изменению окраски листьев (они желтеют или обретают белесый цвет), уменьшению образования почек, падению урожайности.

Молибден – на сегодняшний день именно этот микроэлемент называют одним из важнейших. Молибден регулирует азотный обмен, нейтрализует нитраты. Он также влияет на углеводородный и фосфорный обмен, производство витаминов и хлорофилла, а также на скорость протекания окислительно-восстановительных процессов. Молибден способствует обогащению растений витамином С, углеводами, каротином, белками. Недостаточные концентрации молибдена негативно сказываются на обменных процессах, затормаживается редуцирование нитратов, образование белков и аминокислот. В связи с этим урожай снижаются, их качество ухудшается.

Медь – является элементом медьсодержащих белков, энзимов, участвует в фотосинтезе, регулирует транспорт белков. Медь повышает содержание азота и фосфора в два раза, а также защищает хлорофилл от разрушения. Дефицит меди

приводит к скручиванию кончиков листьев и хлорозу. Снижается количество пыльцевых зерен, падает урожайность, у деревьев «повисает» крона.

Бор – регулирует обмен протеинов и углеводов. Является важнейшим компонентом синтеза РНК и ДНК. Бор в союзе с марганцем являются катализаторами реакции фотосинтеза в растениях, которые испытали на себе заморозки. Бор требуется насаждениям на всех стадиях жизненного цикла. От дефицита бора страдают больше всего молодые листья. Нехватка этого микроэлемента приводит к замедленному развитию пыльцы, внутреннему некрозу стеблей. Избыток бора тоже нежелателен, так как приводит к ожогам нижних листьев.

Никель – представляет собой составной компонент уреазы, с его участием протекают реакции разложения мочевины. В насаждениях, которые обеспечены никелем в достаточном количестве, содержание мочевины ниже. Также никель активирует некоторые ферменты, участвует в транспорте азота, стабилизирует структуру рибосом. При недостаточном поступлении никеля замедляется рост растений, снижается объем биомассы. А при перенасыщении никелем угнетаются реакции фотосинтеза, появляются признаки хлороза.

Хлор – является основным элементов водно-солевого обмена растений. Участвует в поглощении кислорода корневой системой, реакциях фотосинтеза, энергетическом обмене. Хлор уменьшает последствия заболевания грибом, борется с излишним поглощением нитратов. При недостатке хлора корни вырастают короткими, но при этом густо разветвленными, а листья увядают. Капуста, испытавшая дефицит хлора, получается неароматной. При этом и переизбыток хлора вреден. При нем листья становятся мельче и твердеют, на некоторых появляются пурпурные пятна. Стебель также грубеет. Чаще всего дефицит Cl проявляется наряду с недостатком N. Исправить ситуацию позволяет аммиачная селитра и каинит.

Кремний – является своеобразным кирпичиком стенок клеток, а потому повышает выносливость насаждений перед заболеваниями, заморозками, загрязнениями, нехваткой воды. Микроэлемент влияет на обменные процессы с участие фосфора и азота, помогает снижать токсичность тяжелых металлов. Кремний стимулирует развитие корней, влияет на рост и развитие растений, способствует урожайности, повы-

шает содержание сахара и витаминов в плодах. Визуально дефицит кремния не обнаружить, но его недостаток негативно скажется на сопротивляемости культур негативным факторам, развитости корневой системы, развитии цветов и плодов.

Накопление растениями тяжелых металлов необходимо рассматривать, как многофакторный взаимосвязанный процесс (содержание и их формы в почвах, тип и свойства почв, видовые и сортовые особенности растений и др.). Общепринято, что основную роль в загрязнении тяжелыми металлами растениеводческой продукции играют их подвижные соединения, доступные растениям. Необходимо отметить, что избыточные концентрации тяжелых металлов могут накапливаться в растениях при содержании тяжелых металлов в почвах в пределах ПДК и ОДК (табл. 1.5.1). Многие исследователи отмечают полиметаллическое загрязнение почв, характерное для каждой отдельно взятой техногенно загрязненной территории своим набором загрязнителей. Поэтому актуально проводить исследования по изучению поведения тяжелых металлов в системе почва-растение, проявления антагонизма и синергизма в условиях, характерных для определенной местности [31].

Таблица 1.5.1 – Действующие гигиенические нормативы загрязнения почв Российской Федерации (СанПиН 1.2.3685-21)

Наименование вещества	Формула	Величина ПДК/ОДК (мг/кг) с учетом фона (Кларка)	Лимитирующий показатель вредности	Класс опасности
1	2	3	4	5
Валовое содержание				
Кадмий а) песчаные и супесчаные б) кислые (суглинистые и глинистые), рН KCl < 5,5 в) близкие к нейтральным, нейтральные (суглинистые и глинистые), рН KCl > 5,5	Cd	/0,5 /1,0 /2,0		1
Марганец	Mn	1500/	Общесанитарный	3
Медь а) песчаные и супесчаные б) кислые (суглинистые и глинистые), рН KCl < 5,5 в) близкие к нейтральным, нейтральные (суглинистые и глинистые), рН KCl > 5,5	Cu	/33,0 /66,0 /132,0		2

Окончание таблицы 1.5.1

1	2	3	4	5
Мышьяк а) песчаные и супесчаные б) кислые (суглинистые и глинистые), pH KCl <5,5 в) близкие к нейтральным, нейтральные (суглинистые и глинистые), pH KCl >5,5	As	/2,0 /5,0 /10,0		1
Никель а) песчаные и супесчаные б) кислые (суглинистые и глинистые), pH KCl <5,5 в) близкие к нейтральным, нейтральные (суглинистые и глинистые), pH KCl >5,5	Ni	/20,0 /40,0 /80,0		2
Ртуть	Hg	2,1/	Транслока- ционный	1
Цинк а) песчаные и супесчаные б) кислые (суглинистые и глинистые), pH KCl <5,5 в) близкие к нейтральным, нейтральные (суглинистые и глинистые), pH KCl >5,5	Zn	/55,0 /110,0 /220,0		1
Свинец а) песчаные и супесчаные б) кислые (суглинистые и глинистые), pH KCl <5,5 в) близкие к нейтральным, нейтральные (суглинистые и глинистые), pH KCl >5,5	Pb	/32,0 /65,0 /130,0		1
Подвижная форма				
Кобальт	Co	5,0/	Общесани- тарный	2
Марганец, извлекаемый 0,1 н H ₂ SO ₄ : Чернозем Дерново-подзолистая: pH 4,0 pH 5,1-6,0 pH 6,0 Извлекаемый ацетатно-аммонийным буфе- ром с pH 4,8: Чернозем Дерново-подзолистая: pH 4,0 pH 5,1-6,0 pH 6,0	Mn	700,0/ 300,0/ 400,0/ 500,0/ 140,0/ 60,0/ 80,0/ 100,0/	Общесани- тарный	3
Медь	Cu	3,0/	Общесанит	2
Никель	Ni	4,0/	Общесанит	2
Свинец	Pb	6,0/	Общесанит	1
Цинк	Zn	23,0/	Транслокац	1

Кроме того, при эколого-геохимической оценке состояния почв и грунтов используются следующие показатели:

- коэффициент концентрации относительно ПДК или ОДК;
- коэффициент концентрации, характеризующий интенсивность техногенной аномалии;
- суммарный показатель загрязнения (Z_c).

Коэффициент концентрации относительно ПДК (ОДК) характеризует превышение содержания элемента в почвах и грунтах над его ПДК (ОДК). Численно – этот коэффициент равен отношению содержания элемента в исследуемом объекте к его ПДК (ОДК):

$$K_{ПДК(ОДК)} = C_i / ПДК(ОДК)$$

Коэффициент концентрации (K_{ci}), характеризующий интенсивность техногенной аномалии; численно он равен отношению содержания элемента в исследуемом объекте к его фоновому содержанию:

$$K_{ci} = C_i / C_{fi},$$

где C_i – фактическое содержание i -го химического элемента в почвах и грунтах, мг/кг; C_{fi} – фоновое содержание i -го химического элемента в почвах и грунтах, мг/кг.

Суммарный показатель загрязнения (Z_c) характеризует воздействия группы элементов; численно этот показатель равен сумме коэффициентов концентрации химических элементов:

$$Z_c = K_{ci} + \dots + K_{cn} - (n-1),$$

где n – количество учитываемых химических элементов; K_{ci} – коэффициент концентрации i -го компонента загрязнения, превышающий единицу. Для расчета суммарного показателя необходимо использовать не менее семи химических элементов – свинец, мышьяк, кадмий, цинк, ртуть, медь, никель. Значение фонового содержания валовых форм тяжелых металлов и мышьяка в почвах определяют для незагрязненной территории, а затем согласовывают с территориальными органами госсанэпиднадзора. В санитарно-гигиеническом отношении почвы городских террито-

рий подразделяют по уровню химического загрязнения на категории: чистая, допустимая, умеренно опасная, опасная, чрезвычайно опасная. Для чистой категории загрязнения почв и грунтов не запускается превышение ПДК (ОДК) [39].

Для почвенных ресурсов первостепенно важной является способность осуществлять основные почвенно-экологические функции, включая плодородие. Как было уже сказано выше, современная оценка уровня загрязнения почв тяжелыми металлами основана на использовании концентрационных критериев в виде ПДК и ОДК, которые основаны на концентрации поллютанта по отношению к массе почвы. Но растения реагируют на реальное содержание элементов-загрязнителей в корнеобитаемом слое, а не на их концентрации по отношению к массе вмещающего материала. Ведь они могут быть различны при одной и той же массе загрязнителя в зависимости от массы вмещающего почвенного материала. Например, в соответствии с формулой: $ZB = C \cdot \rho_b \cdot h$, где ZB – запас загрязняющего вещества; ρ_b – плотность почвы, h – мощность ее слоя. В торфе или подстилке, обладающих малой плотностью (0,1-0,3 г/см³), при одной и той же массе загрязнителя его концентрация будет существенно выше, чем в минеральной почве с плотностью 1,3-1,5 г/см³. Часто массовые концентрации поллютантов в легких подстилках в 5-10 раз выше таковых в нижележащих минеральных горизонтах; но умножив их на плотность мы видим, что объемные концентрации будут равными, а то и больше в гумусовых горизонтах [71].

Нормирование содержания тяжелых металлов в почве и растениях является достаточно сложным процессом из-за невозможности полного учета всех факторов природной среды. Так, изменения только агрохимических свойств почвы (рН содержание гумуса, степень насыщенности оснований, гранулометрический состав) может в несколько уменьшить или увеличить содержание тяжелых металлов в растениях. Подвижность тяжелых металлов существенно зависит от типа почвы, содержания органического вещества, кислотности, плотности почвы и других факторов [44].

Большой ролью обладает и минералогический состав, так как поглощательная способность у разных минералов различна. Наряду с органическим веществом и

глинистыми минералами оксиды и гидроксиды Al, Fe и Mn представляют значительную роль в адсорбции ТМ в почвах. Способность связываться оксидами и гидроксидами Al, Fe и Mn установлена для Co, Ni, Zn, Cu, Cd, Mo, Sr, Pb, Sn. По способности адсорбироваться гидроксидами Fe и Al тяжелые металлы формируют ряд селективности: $Pb > Zn > Cd$. Поглощение ТМ гидроксидами находится в зависимости от pH среды. В кислых почвах Fe, Al, Mn присутствуют в подвижном состоянии, а при нейтрализации они преобразуются в нерастворимые гидроксиды, которые формируют коллоиды, адсорбирующие прочие ТМ из почвенных растворов [92]. По мнению А. П. Виноградова (1952), все химические элементы в той или иной степени участвуют в жизнедеятельности растений, и если многие из них считаются физиологически значимыми, то только потому, что для этого пока нет доказательств. Поступая в растение в небольшом количестве, и становясь в них составной частью или активаторами ферментов, микроэлементы выполняют сервисные функции в процессах метаболизма. Когда же в среду поступают непривычно высокие концентрации элементов, они становятся токсичными для растений. Проникновение тяжелых металлов в ткани растений в избыточном количестве приводит к нарушению нормальной работы их органов, и это нарушение тем сильнее, чем больше избыток токсикантов. Продуктивность при этом падает. Токсическое действие ТМ проявляется с ранних стадий развития растений, но в различной степени на различных почвах и для разных культур. Избыток химических элементов вызывает токсикозы у растений. По мере возрастания концентрации ТМ вначале задерживается рост растений, затем наступает хлороз листьев, который сменяется некрозами, и, наконец, повреждается корневая система. Токсическое действие ТМ может проявляться непосредственно и косвенно. Прямое воздействие избытка ТМ в растительных клетках обусловлено реакциями комплексообразования, в результате которых происходит блокировка ферментов или осаждение белков. Дезактивация ферментативных систем происходит в результате замены металла фермента на металл-загрязнитель. При критическом содержании токсиканта каталитическая способность фермента значительно снижается или полностью блокируется.

2. УСЛОВИЯ, МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1. Почвенно-климатическая характеристика опытного участка

По природно-сельскохозяйственному районированию страны исследуемая территория относится к Заволжской провинции степной зоны и располагается на древних надпойменных террасах р. Волги.

В основном объект исследования почва представлена черноземами обыкновенными остаточно-луговатыми и обыкновенными остаточно-луговатыми карбонатными с вкраплин

ами мелких контуров лугово-черноземных почв. Образование лугово-черноземных почв на высоких террасах связано с орошением.

Почвенный покров исследуемой территории обследования в границах севооборота представлен 1-м типом, 1-м подтипом и 4-я почвенными разновидностями.

Названия почв даны по действующей классификации. Характеристика почвенного покрова приведена на основе полученных результатов лабораторных исследований, места заложения точек отбора показаны на картографическом материале (приложение 1).

Черноземы обыкновенные остаточно-луговатые получили распространение на слабоволнистой второй надпойменной террасе р. Волги. Почвообразующими породами для них служат древнеаллювиальные средние суглинки. Содержание гумуса в этих почвах относительно небольшое 4,0-5,0%, вниз по профилю убывание гумуса идет очень постепенно. На глубине 1м его обнаруживается 1,5%, что характерно для остаточно-луговатых черноземов. Сумма поглощенных оснований в пахотном слое составляет 39,7-28,0 мг-экв на 100 г почвы, с преобладанием поглощенного кальция, что также типично для этих почв. Высокая насыщенность почвенного поглощающего комплекса обменным кальцием способствует его устойчивости. Коллоиды, содержащие обменный кальций более водопрочные (табл. 2.1.1).

Чернозёмы обыкновенные остаточно-луговые карбонатные приурочены к повышенным частям второй надпойменной террасы. Они, как правило, встречаются в виде пятен среди обычных остаточно-луговых черноземов. Черноземы обыкновенные остаточно-луговые карбонатные имеют в основном среднесуглинистый механический состав.

Таблица 2.1.1 – Классификация почвенного покрова в границах севооборотов территории обследования

Тип	Подтип	Род	Разновидность
Чернозем	Чернозем обыкновенный	Чернозем обыкновенный остаточно-луговой	Чернозем обыкновенный остаточно-луговой малогумусный мощный орошаемый среднесуглинистый
			Чернозем обыкновенный остаточно-луговой глубоковскипающий малогумусный среднемощный орошаемый тяжелосуглинистый
		Чернозем обыкновенный остаточно-луговой карбонатный	Сочетание: 1. Чернозем обыкновенный остаточно-луговой малогумусный среднемощный орошаемый тяжелосуглинистый
			2. Чернозем обыкновенный остаточно-луговой карбонатный слабогумусированный среднемощный орошаемый среднесуглинистый 10-25%

Среди фракций мелкозема преобладает крупная пыль и ил. По содержанию гумуса эти черноземы относятся к малогумусным с количеством гумуса при среднесуглинистом механическом составе в горизонтах Апах – 4,3-5,7%. Уменьшение гумуса вниз по профилю происходит очень медленно. В прямой зависимости с содержанием гумуса и механическим составом находится емкость поглощения. Поглощающий комплекс насыщен кальцием и магнием в отношении 7:1, а по мере углубления вниз по профилю количество магния увеличивается. Реакция почвенной среды слабощелочная, с рН=7,3. Емкость катионного обмена 26,0 мг-экв. на 100 г почвы. Почвообразующими породами служат древнеаллювиальные тяжелые и средние суглинки. По сравнению с вышеописанными остаточно-луговыми обычными черноземами данный род характеризуется устойчивым поверхностным

вскипанием, т.е. наличием карбонатов во всем почвенном профиле, начиная с поверхности. В карбонатных почвах содержится повышенное количество Ca^{2+} , Mg^{2+} и HCO_3^- в почвенном растворе, что определяет их слабощелочную реакцию. В этих почвах быстрее осуществляется минерализация органического вещества и высвобождается азот в минеральных формах. Фосфаты, железо, марганец, тяжелые металлы здесь менее доступны, чем в кислых почвах. Присутствие в почвенных растворах большого количества кальция вследствие антагонизма катионов может затруднить усвоение некоторых элементов питания, создавая их недостаток для растений. В условиях промывного водного режима повышенная карбонатность почв способствует усилению аккумулятивных почвообразовательных процессов и ослаблению элювиальных, оптимизации гумусового состояния, физико-химических и физических свойств.

В черноземах при нейтральной реакции среды в групповом составе гумуса преобладают гуминовые кислоты ($C_{\text{гк}}: C_{\text{фк}} = 2-2,5$). Это соответствует накоплению гумуса 4-12% и емкости поглощения почвы катионов 50-70 мг-экв./100 г почвы. При слабощелочной реакции среды почв протекает щелочной гидролиз органической и минеральной части почв. В групповом составе гумуса преобладающее место занимают фульвокислоты ($C_{\text{гк}}: C_{\text{фк}} = 0,5-0,7$). Этот соответствует малой емкости поглощения почвами катионов (5-10 мг-экв./100 г почвы).

По мощности гумусового горизонта данные почвы отнесены к среднемощным и только у одной разновидности по мощности отнесена к мощной. Мощность гумусового горизонта в среднем составляет 68 см с пределом варьирования от 55 см до 74 см и мощная 93 см. По механическому составу все почвы представлены среднесуглинистыми разновидностями. Преобладающими являются фракции крупной пыли и мелкого песка.

По содержанию гумуса в верхнем горизонте почвы отнесены к малогумусным и слабогумусированным. По профилю почв уменьшение содержания гумуса происходит постепенно.

Степень обеспеченности подвижными формами фосфора для зерновых и пропашных культур изменяется от средней и повышенной. Что касается обеспечения подвижными формами калия, очень высокая, повышенная и средняя для зерновых и пропашных культур. Емкость катионного обмена в данных почвах составляет 27,9-31,0 мг-экв. на 100 г почвы (таблица 2.1.2).

Таблица 2.1.2 – Агрохимическая характеристика черноземов обыкновенных степной зоны Поволжья, 0-30 см

рН водной суспен- зии	Гумус, %	Содержание подвижных форм, мг/кг <i>по методу Чирикова</i>		ЕКО мг-экв. на 100г почвы	Балл бо- ни- тета
		фосфор	калий		
6. Чернозем обыкновенный остаточно-луговатый малогумусный мощный орошаемый среднесуглинистый точки отбора (по материалам 2003 г.)					80
6,6	5,1	117 повышенная	250 оч. высокая	31,0	
10/8. Сочетание: 1. Чернозем обыкновенный остаточно-луговатый малогумусный среднемощный орошаемый тяжелосуглинистый 2. Чернозем обыкновенный остаточно-луговатый карбонатный слабогумусированный среднемощный орошаемый среднесуглинистый 10-25%					67/68
10. Чернозем обыкновенный остаточно-луговатый малогумусный среднемощный орошаемый среднесуглинистый (точки отбора 3,25 по данным 2003 г.)					67
6,8	4,8	132 повышенная	120 повышенная	29,0	
6,5	4,7	196 высокая	250 оч. высокая	29,0	
8. Чернозем обыкновенный остаточно-луговатый карбонатный слабогумусированный среднемощный орошаемый среднесуглинистый (точки отбора 3,25 по данным 2003 г.) 10-25%					68
7,0	3,1	140 повышенное	146 высокое	27,9	
6,7	3,3	92 среднее	120 повышенное	29,0	
12. Чернозем обыкновенный остаточно-луговатый глубоковскипающий малогумусный среднемощный орошаемый тяжелосуглинистый (по материалам 2003 г.)					67
6,8	4,8	132 повышенная	120 повышенная	29,0	
6,5	4,7	196 высокая	250 оч. высокая	29,0	

Основным интегральным показателем оценки плодородия почв является балл бонитета почв. Определение балла бонитета включает установление признаков и свойств почв, существенно влияющих на их плодородие, расчет средних физических

значений в зависимости от их влияния на урожайность сельскохозяйственных культур и перевод данных значений в относительные величины – баллы. Полученные бонитеты сельскохозяйственных угодий по административным районам сопоставлены с многолетней средней урожайностью зерновых культур. Причиной различной цены балла в административных районах могут быть микроразнональные климатические условия, которые отражены в коэффициентах оценки климатических условий. В таблице 2.1.2. баллы бонитета приводятся по данным кадастровой оценки сельскохозяйственных угодий, проведенной ОАО «ВолгоНИИГипрозем» в 2000 году.

Содержание и запас органического вещества в почвах служат основным критерием оценки почвенного плодородия, а также рассматривается с точки зрения экологической устойчивости почв как компонента биосферы. Гумусовое состояние почв [16] принято характеризовать содержанием гумуса в пахотном слое и запасами в слоях 0-20 см и 0-100 см.

Оценка содержания гумуса в почвах дифференцирована в зональном аспекте. Для черноземов выделяются виды по содержанию гумуса: тучные > 9,0%; среднегумусные от 9,0 до 6,0%; малогумусные от 6,0 до 4,0%; слабогумусированные < 4,0%.

Определение содержания гумуса в почвах проводится в верхнем пахотном горизонте (ГОСТ 26213-84). Плотность сложения почвы принимается показателем плотности сложения генетических горизонтов, характерных для данного типа почв, по литературным источникам. Определение мощности гумусового горизонта устанавливается по результатам морфологического описания профиля почвы. Определение содержания гумуса в почвах проводится в генетических горизонтах (ГОСТ 26213-84).

Были определены запасы органического вещества на участке в почвах чернозема обыкновенного отаточно-луговатого малогумусного и слабогумусированного среднесуглинистого в верхнем 0-20 см слое. При расчете были приняты показатели: плотность сложения – 2,4 г/см³; содержание органического вещества в виде гумуса у малогумусных – 5,1% и слабогумусированных – 3,1%.

Полученные расчеты показали, что запасы органического вещества в 20 см слое малогумусные характеризуются как очень высоким уровнем имеющих значение 244,8 т/га, слабогумусированные характеризуются средним уровнем имеющих значение – 148,8 т/га.

Не зависимо от агротехнических приемов достаточное влияние на рост развитие растений оказывают метеорологические условия зимне-весенних месяцев и вегетационного периода (табл.2.1.3). Изучение метеорологических данных ближайшей метеостанции (МС «Безенчукская») и метеостанции, стоявшей в поле, показывают, что в зимние месяцы январь-февраль в зоне расположения опытного поля выпало достаточно атмосферных осадков – 140,1 мм, при среднемноголетнем значении – 42 мм.

Таблица 2.1.3 – Метеорологические условия в годы проведения исследований, 2021-2024 гг.

Месяц	Температура, °С			Среднее значение температур, гр.	Осадки, мм			Σ осадков за месяц, мм
	I	II	III		I	II	III	
2021 г.								
Май	15,9	22	20,5	19,5	4	3,2	8,6	15,8
Июнь	18,1	21,6	26,9	22,2	28,6	2,6	6,8	38
Июль	23,6	25,2	24	24,3	2	0,4	15	17,4
Август	25,1	25,6	21,3	24,0	0	0	0,8	0,8
Сентябрь	13,6	12,5	9,4	11,8	9,2	2	15,2	26,4
2022 г.								
Май	9,77	10,78	13,05	11,2	2,4	16,8	23,8	43
Июнь	19,07	20,41	17,8	19,09	39,4	12,4	1,8	53,6
Июль	19,83	22,07	21,33	21,08	20,4	33,2	48	101,6
Август	23,07	20,63	25,62	23,11	0	0	0	0
Сентябрь	12,8	14,31	13,48	13,53	2,72	1,6	22	26,3
2023 г.								
Май	12	14,1	15,9	14,0	2,2	7,2	0,2	9,6
Июнь	17,7	18,7	19,7	18,7	8	2,8	19,6	30,4
Июль	20,4	20,8	20,9	20,7	0,6	10,4	1,4	12,4
Август	20,3	19,1	17,3	18,9	0,4	1,2	12	13,6
Сентябрь	14,9	12,3	9,8	12,3	16,4	8	0	24,4
2024 г.								
Май	9,1	11,3	17,9	12,8	5,2	0,0	0,0	5,2
Июнь	23,3	26,4	18,4	22,7	7,4	7,4	8,6	23,4
Июль	19,0	20,6	20,6	20,1	0,0	0,0	7,8	7,8
Август	20,8	19,0	22,8	20,9	13,6	8,2	0,8	22,6
Сентябрь	17,9	16,1	14,4	16,2	0,8	0,0	0,0	0,8

В активный период роста и развития растений, июль-август проходило при теплой погоде и 26 мм до 30 мм от нормы, которая составляет 47 мм (рис.2.1.1. Это значительно ускорило процессы генеративного развития растений и наступления физиологической и хозяйственной спелости. Жаркая и засушливая погода продолжалась и в августе. К этому времени на опытных участках не имело возможности убрать, так как для уборки картофеля рекомендуемая температура почвы должна быть ниже 18 градусов. Их уборка прилась на конец третьей декады сентября.

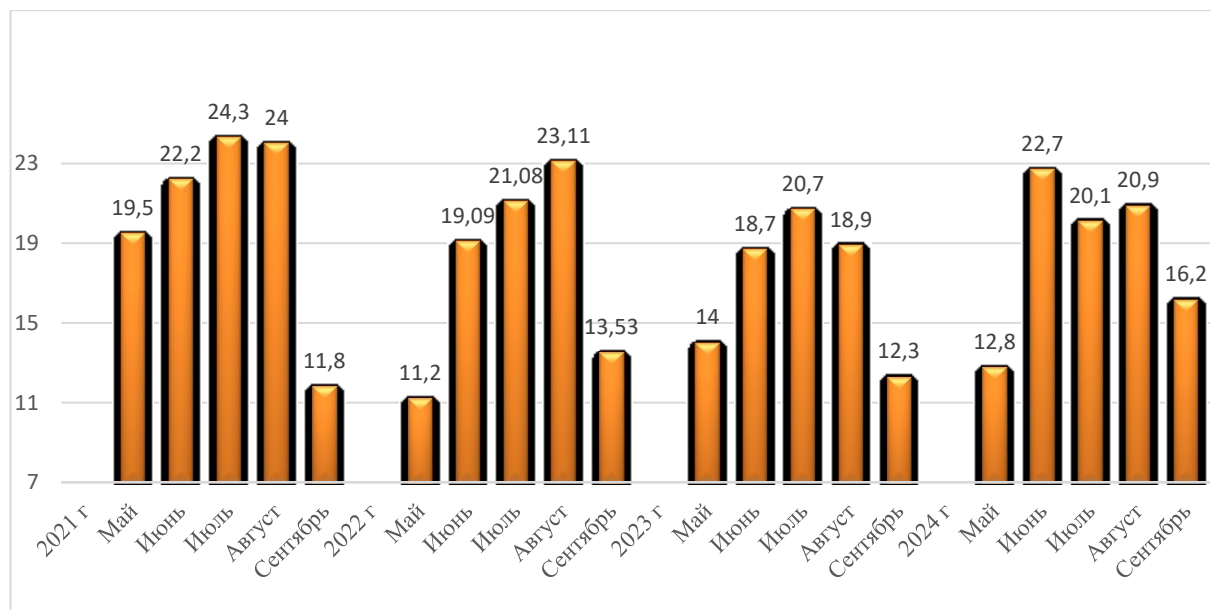


Рисунок 2.1.1 – Среднемесячная температура воздуха вегетационных периодов, 2021-2024 гг.

Сумма положительных температур за вегетационный период (май-июль) составила 2690°C, при норме 2437,50 С. ГТК равнялся 0,55. Учитывая, что исследования проводились на культурах в условиях компенсации влагообеспеченности за счет орошения, можно считать их благоприятными для роста и развития. Несмотря на недостаток влаги на опытных участках полив проводился регулярно. Орошение картофеля должно восполнять дефицит почвенной влаги от 25 мм и выше с момента начала оформления клубней. Это позволило создать оптимальные запасы влаги по всему периоду вегетации картофеля.

В целом за период январь-июль в районе опытного поля выпало 249,7 мм атмосферных осадков, при норме 212 мм, что на 17,4 % больше среднемноголетнего значения (рис. 2.1.2).

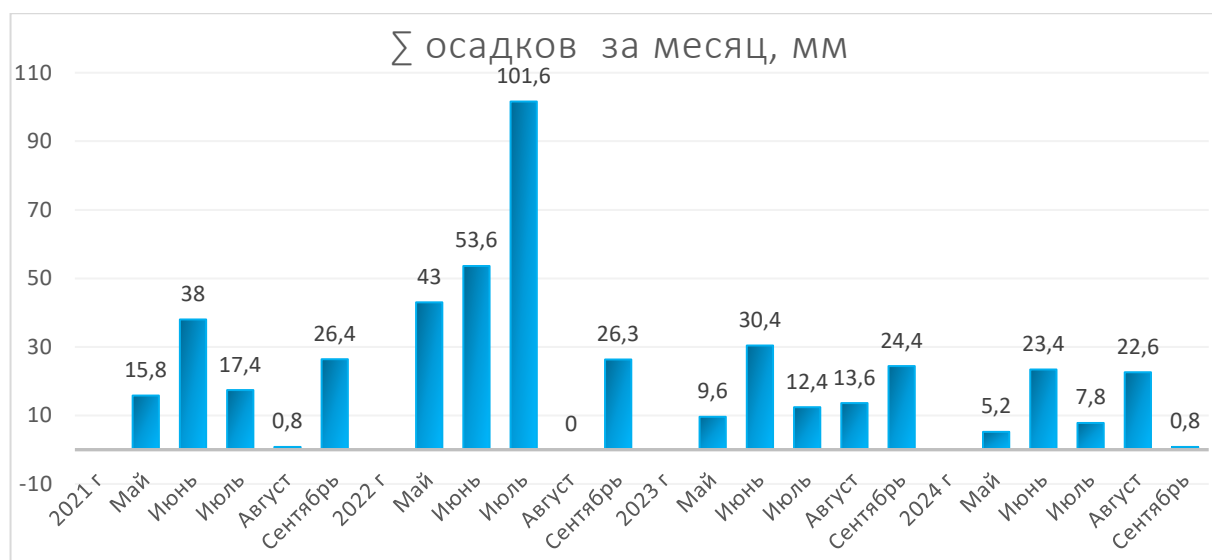


Рис. 2.1.2. – Среднемесячные осадки вегетационных периодов, 2021-2024 гг.

Для картофеля нормальной считается подача 25 мм воды один раз в 10 дней. Оценку площадей, пригодных для орошения, обычно проводят с расчетом того, что и в дальнейшем с десятидневной периодичностью будет подаваться 25 мм дополнительной влаги. В условиях КФХ Цирулева Е.П. установлены на полях датчики влажности, на которые сигнализируют по шкале об относительной влажности почвы. Согласно данным датчиков производится полив поля (рис. 2.1.3.)

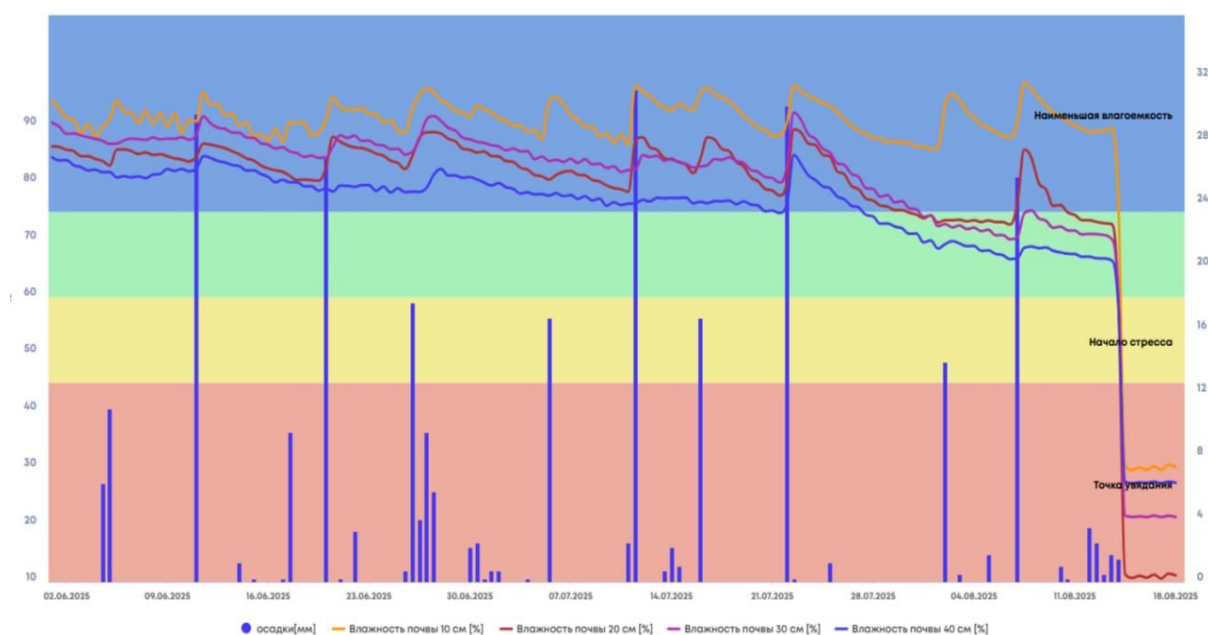


Рис. 2.1.3. – График полива производственных плантаций картофеля в ИП Цирулев Е.П., гК(Ф)Х

Справа на рисунке 2.1.3 указано количество осадков в мм, а слева шкала относительной влажности почвы. По рисунку можно отметить, что растения практически не доходили до стресса. На момент снижения наименьшей влагоемкости включался полив.

2.2. Схема полевого опыта и ее обоснование

С целью решения задач, поставленных в работе, проводились обследования почвы полей севооборота до поставленных опытов и после на полях ИП Цирулев Е.П., главы К(Ф)Х, расположенного в Приволжском районе Самарской области в период с 2021 г. по 2024 г. на площади 462 га. (рис. 2.2.1). На рисунке представлена схема всех полей хозяйства с культурами:

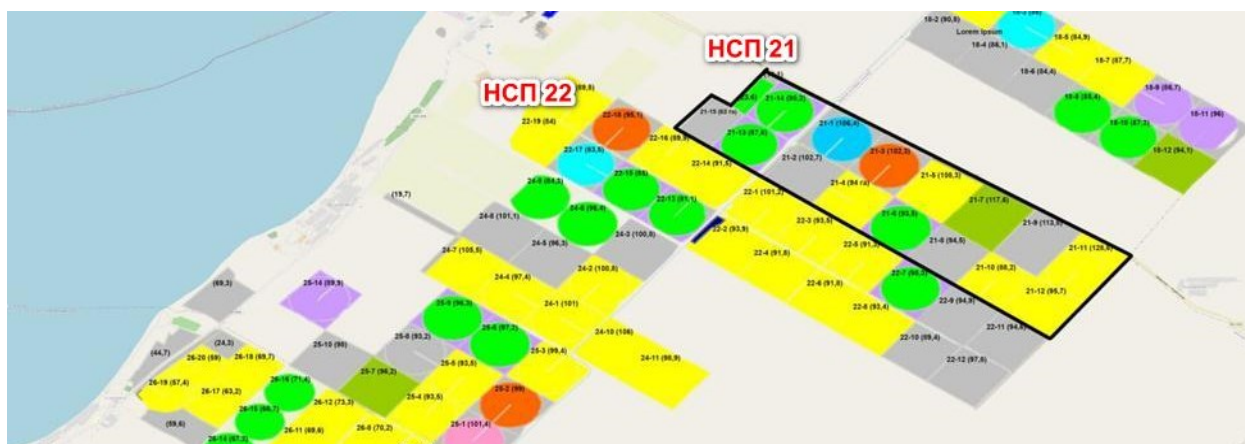


Рис. 2.2.1. Карта-схема полей ИП Цирулева Е.П.

Условные обозначения к рис. 2.2.1

Цвет	Культура	Цвет	Культура
	Пар занятый		Свекла
	Картофель		Соя
	Лук		Оз. пшеница
	Морковь		Кукуруза

Согласно списку сортов растений Госреестра по состоянию 2023 год допущено к использованию 532 сорта картофеля, из них в наши исследования были включены 2 сорта: Гранада– 2017; Гала – 2008.

Гранада. Сорт картофеля Гранада (Гранада // Государственный реестр селекционных достижений) был выведен в 2015 г в Германии. Картофель столового назначения, в Госреестр РФ внесен в 2017 г. Районирован для Средневолжского региона, но выращивается страны. Кусты невысокие, компактные, хорошо облиственные. Средняя высота растения – 60 см, на бедных почвах редко дотягивает до 40 см. Полная зрелость клубня наступает ближе к 120 дню выращивания, поэтому среди дачников он получил распространение как среднепоздний сорт картофеля (рис. 2.2.2).

С одного куста можно собрать до 14 товарных плодов весом более 150 г. Весь картофель Гранада выравненный, правильной удлиненно-овальной формы. Кожица тонкая, приятного кремово-желтого цвета, глазков мало, и они мелкие. В разрезе мякоть светло-желтая, плотная, не темнеет при обработке. Вкусовые качества картофеля Гранада отменные. Сорт используют для приготовления различных блюд в кафе и ресторанах. Он не разваривается, не темнеет. Однако замечено, что вкус напрямую зависит от внесенных удобрений. Лежкость хорошая, более 95%. Кусты обладают хорошим иммунитетом от таких заболеваний: парша, картофельный рак, фитофтороз, гниение клубней. Однако сорт склонен к фузариозному увяданию.



А



Б



В

Рис. 2.2.2. А и Б – внешний вид сорта картофеля Гранада,
В – калибровка клубней картофеля

Гала. Сорт картофеля Гала (Гала // Государственный реестр селекционных достижений <https://reestr.gossortrf.ru/sorts/9705642/>) – сорт немецкой селекции, среднераннего срока созревания. В Государственном реестре селекционных достижений он с 2008 года.

Клубни у сорта Галы массой 71-122 г, округлой формы, глазки мелкие – чистить их очень удобно. Кожура гладкая, желтой окраски. Мякоть темно-желтая, визуально похожа на сливочное масло хорошего качества.

Урожайность у этого сорта неплохая – 216-263 кг с сотки, но бывает и больше – до 390 кг с сотки (такой урожай собрали на экспериментальном участке в Волгоградской области). Товарность клубней – 71-94%, лежкость – 89%.

Важно и еще один момент – сорт Гала устойчив к раку картофеля и очень опасному вредителю – золотистой картофельной нематоды. Европейские производители уверяют, что он также устойчив к парше.

Сорт рекомендован для большинства областей России, исключение составляют Северный, Центрально-Черноземный и Северо-Кавказский регионы – здесь он не районирован.

В период с 2021 г. по 2024 г. проводился эксперимент по изучению эффективности использования посадок картофеля по принятой технологии. В качестве фона – с применением минеральных удобрений $N_{150}P_{150}K_{300}$ в сочетании с фосфогипсом который оказывает на формирование агрегатного состава в пахотном горизонте и аккумуляцию тяжелых металлов (кадмия, свинца, меди, цинка, марганца, хрома, железа) картофелем и улучшения структурообразования. В наших исследованиях в принятом севообороте в 2021-2024 годах исследуемый участок находился в районе НСП-21 и был расположен в 5-польном севообороте. Чередование культур в севообороте приведено в таблице 2.2.2.

В применяемом севообороте предшественником для картофеля является занятый пар с фацелией (рис. 2.2.3).

По занятому пару в качестве сидерата производился посев фацелии. Фацелия как сидерат очень хорошо разрыхляет почву, изгоняет проволочника, уменьшает кислотность, обогащает органикой (приравняется к 30 т/га навоза КРС).

Таблица 2.2.2 – Специализированный севооборот

Номер поля (га)	Годы исследований			
	2021	2022	2023	2024
1 (104)	Соя	Фацелия	Картофель	Лук
5 (107)	Картофель	Лук/ячмень	Соя	Соя
13 (87)	Морковь	Соя	Фацелия	Картофель
14 (92)	Фацелия	Картофель/оз. пшеница	Лук	Соя
15(70,0)	Соя	Соя	Соя	Фацелия

Учетные площадки формировались с учетом технологии посадки картофеля, имели форму прямоугольника со стороной 15 м, длиной 500 м, площадью 7500 м² (15х500). По краям всех учетных площадок устанавливали защитные полосы. В применяемом севообороте предшественником для картофеля в 2021-2024 годах были сидеральные пары.

Поле 21-15, S=70 га 2024 – фацелия 2023 – соя 2022 – соя 2021 – соя 2025год – опытный участок картофеля	
Поле 21-13, S=87 га 2024 – картофель 2023 – фацелия 2022 – соя 2021 – морковь 2024год – опытный участок картофеля	Поле 21-14, S=92 га 2024 – соя 2023 – лук 2022 – картофель 2021 – фацелия 2022 год – опытный участок картофеля
	Поле 21-1, S=104 га 2024 – лук 2023 – картофель 2022 – фацелия 2021 – соя 2023 год – опытный участок картофеля
	Поле 21-5, S=107 га 2024 – соя 2023 – соя 2022 – лук/ячмень 2021 – картофель 2021год – опытный участок картофеля

Рис. 2.2.3. Схема пятипольного севооборота с чередованием культур за одну ротацию:

1. Занятый пар (фацелия) 2. Картофель
3. Лук (ячмень, если нет многолетних сорняков) 4. Соя 5. Соя

По занятому пару в качестве сидерата производился посев фацелии. Фацелия как сидерат очень хорошо разрыхляет почву, изгоняет проволочника, уменьшает кислотность, обогащает органикой (приравняется к 30 т/га навоза КРС).

Учетные площадки формировались с учетом технологии посадки картофеля, имели форму прямоугольника со стороной 15 м, длиной 500 м, площадью 7500 м² (15×500). По краям всех учетных площадок устанавливали защитные полосы. В применяемом севообороте предшественником для картофеля в 2021-2024 годах были сидеральные пары.

Площадь полевого севооборота 460 га, в границах которого 12 опытных участков площадью 10 га. Ввиду того, что севооборот действует на орошаемом участке, где орошение производится дождевальными машинами «Фрегат» ДМУ-Б488-90, каждый опытный участок был привязан к максимальной площади полива при работе на одной позиции дождевальной машины и имел площадь от 85-102 га. Количество полей севооборота совпадало с количеством лет ротации, т.е. 5 лет, при этом 1 год поле в севообороте не занято картофелем, оно находится под посевами соей 3 года и 1 год фацелии.

При формировании учетной площадки была принята схема для среднепозднего сорта Гранада и среднераннего сорта Гала: 22 гребня – фон (N₁₅₀P₁₅₀K₃₀₀), 22 гребня – вариант с внесением ФГ в дозе 2 т/га, 22 гребня – вариант ФГ 4 т/га, 22 гребня – вариант ФГ 6 т/га, 22 гребня – вариант ФГ 8 т/га.

По краям учетных площадок согласно принятой технологии посадки картофеля между опытами оставляли 2 не засаженных гребня, которые служили в качестве защитных полос.

В системе выращивания картофеля применялись препараты, вносимые при подготовке почвы, защите от болезней, сорняков и вредителей:

Зенкор Ультра – системный гербицид широкого спектра действия против двудольных и злаковых сорняков.

Инфинито – инновационный системный фунгицид для защиты картофеля от всех типов фитофтороза.

Квадрис – фунгицид для контроля широкого спектра почвенных заболеваний картофеля.

Сигнум – инновационный двухкомпонентный фунгицид с ярко выраженным AgCelence-эффектом для защиты овощных культур от комплекса болезней. При обработке часть действующего вещества боскалид остаётся на поверхности растения, другая проникает внутрь, распространяется трансламинарно и по сосудистой системе листа акропетально.

Арнад – это системный гербицид, который поступает в сорняки главным образом через листья.

Изабион – жидкое органоминеральное удобрение, предназначенное для увеличения урожайности за счёт лучшей завязываемости плодов и увеличения их размера, улучшения качества товарной продукции, приживаемости саженцев, преодоления растением различных стрессов.

Ридомил Голд – комбинированный фунгицид для защиты картофеля, овощных культур и винограда от комплекса болезней, включая пероноспороз, альтернариоз, фитофтороз, милдью. Длительная защита полностью всего растения, включая необработанные части — новый прирост листа, точку роста, стебель, клубни картофеля, плоды томата. Не используйте препарат для лечебных и искореняющих опрыскиваний, Ридомил Голд применяется для профилактики заболеваний культур.

Абига тик – контактный фунгицид предназначен для борьбы с комплексом грибных и бактериальных болезней на овощных, технических, плодовых, декоративных и цветочных культурах, виноградной лозе, лекарственных растениях и лесных насаждениях. Значительно удешевляет всю хозяйственную систему защиты растений, поскольку работает профилактически и подавляет заболевание при первых признаках возникновения. Препарат стимулирует иммунную систему растения, дает толчок и возможность растению бороться с проявлениями окружающей среды, способствует образованию хлорофилла. При этом фунгицид не подавляет

активность микробиопрепаратов по типу лепидоцида, битоксибациллина, не проявляет фитотоксичности, не подавляет биологическую активность почвы, обладает антифидантным действием.

Ширлан – уникальный контактный фунгицид профилактического действия для защиты картофеля от фитофтороза.

Пеннкоцеб – однокомпонентный фунгицид широкого спектра действия с добавлением микроэлемента Zn. Используется препарат для защиты картофеля, томата и винограда от комплекса заболеваний.

Боксер – высокоэффективный селективный гербицид для довсходового и раннего послевсходового подавления широкого спектра однолетних злаковых и широколистных двудольных сорняков на картофеле, луке, моркови.

Койра – кишечный инсектицид для борьбы с комплексом вредителей картофеля.

Децис Эксперт, КЭ – универсальный контактный препарат для оперативного контроля широкого спектра вредителей.

Применялся почвенный гербицид до всходов картофеля, который сдерживает первую волну сорняков и минимизирует стресс у растений. Далее в хозяйстве используем гербицид в фазу 15-20 см всходы картофеля, данная обработка является завершающей гербицидной обработкой от сорной растительности. Потому, что происходит смыкание ботвы картофеля и сорняки не могут прорасти.

Перед смыканием ботвы используется контактный фунгицид в профилактических целях, чтобы снизить инфекционный фон. Далее выставляем схему защиты: каждые 10-14 дней проводится обработки в профилактических и лечебных целях в баковой смеси с инсектицидом, если есть вредители, или просто фунгицид.

Всего за период вегетации было предусмотрено четыре листовых обработок с интервалом 7, 12, 14, 12 дней после первой.

Схема использования препаратов, применяемых при выращивании картофеля, представлена в таблице (таб. 2.3.2).

Для производимых операций использовали универсальный пропашной колесный трактор John Deere 6920 и полевой опрыскиватель AMAZONE UG-5200 предназначенный исключительно для сельскохозяйственного применения методом поверхностного опрыскивания с использованием воздушного потока, предназначенный для работы со всеми разрешенными в сельском хозяйстве растворами, эмульсиями и суспензиями.

Таблица 2.2.3 – Схема использования препаратов при выращивании картофеля

Стадия развития	Способ внесения, техника	Препараты	Расход, д.в.
Предпосевное	Разбрасыватель навесной ZA-TS 3200, на тракторе VALTRA	Хлористый калий	400 кг/га
Предпосевное	Разбрасыватель навесной ZA-TS 3200, на тракторе VALTRA	Аммофос	300 кг/га
До всходов	Опрыскивание почвы Amazone UG-5200 на тракторе John Deere 6920, 15.06.2024	Зенкор	0,8 л/га
Всходы - Формирование стеблей и листья	Разбрасыватель навесной ZA-TS 3200, на тракторе VALTRA	Сульфат аммония	400 кг/га
	Опрыскивание Всходов Amazone UG-5200 на тракторе John Deere 6920, 28.05.2024 г.	Пенкоцеб Боксер Титус Пав 90	1,2 л/га 3 л/га 0,05 кг/га 150 мл/га
	Опрыскивание Amazone UG-5200 на тракторе John Deere 6920, 8.06.2024 г.	Абига пик	3 л/га
	Опрыскивание Amazone UG-5200 на тракторе John Deere 692, 20.06.2024 г.	Инфинито Сигнум Пленум Изабион	1,2 л/га 0,2 л/га 0,2 л/га 1,5 л/га
	Опрыскивание Amazone UG-5200 на тракторе John Deere 692, 2.07.2024 г.	Ревус топ	0,6 л/га
	Опрыскивание Amazone UG-5200 на тракторе John Deere 692, 14.07.2024 г.	Инфинито Квадрис	1,2 л/га 3 л/га
	Опрыскивание Amazone UG-5200 на тракторе John Deere 692, 26.07.2024 г.	Инфинито Квадрис	1,2 л/га 3 л/га
	Опрыскивание Amazone UG-5200 на тракторе John Deere 692, 8.08.2024 г.	Гремми Койра	2,5 л/га 0,1 л/га
	Опрыскивание Amazone UG-5200 на тракторе John Deere 692, 28.08.2024 г.	Реглон	1 л/га
Полное созревание	Опрыскивание Amazone UG-5200 на тракторе John Deere 692, 4.09.2024 г.	Реглон Ширлан	1 л/га 0,3 л/га

Минеральные удобрения под картофель вносились до посадки разбросным способом. Полная доза калийных удобрений (KCL 60%) вносилась осенью под

нарезку гребней в один приём разбрызгивателем навесным Rauch MDS 935 на тракторе Д/Д 6920, Д/Д 6130. Весной одновременно с посадкой, производилось внесение аммофоса ($N_{12}P_{52}$), затем через 10-15 дней перед окучиванием производили подкормку азотным удобрением сульфатом аммония – $N_{21} S_{24}$. Расчет произведен балансовым методом по методике, предложенной И. С. Шатиловым и М. К. Каюмовым [37].

В 2021-2024 году было отобрано и проанализировано 124 почвенных образцов и 112 проб картофеля не менее 100 шт. в пробе. Исследованию подвергались: почва, клубни картофеля 2 сортов.

На основе полученных результатов выведены средние значения показателей агрохимического состояния почвенного покрова по годам и вариантам опыта. Данное разделение вызвано тем, что прослеживается различная динамика изменения в агрохимических показателях при равных условиях их использования в сельскохозяйственном производстве.

2.3. Методы и методики исследований

Растительные и почвенные образцы для анализа отбирали с использованием общепринятых методов [2, 13, 17]. На каждой пробной площадке отбирался смешанный образец методом конверта, весом около 500 г, который помещался в маркированный мешочек с присвоением ему номера. Растительные образцы отбирали параллельно с почвенными образцами на тех же площадках. Растительные образцы отбирали параллельно с почвенными образцами на тех же площадках. Отбирали по 5-30 и более экземпляров в зависимости от их размера, сразу отделяли клубни и ботву. Каждую пробу помещали в маркированные пакеты. Маркировка растительных образцов была связана с номером соответствующей пробной площадки. В пакетах почвенные и растительные образцы доставляли в лаборатории.

Почвенные и растительные анализы выполнены в сертифицированных лабораториях ФГБУ САС «Самарская» (Аттестат аккредитации испытательной лаборатории (центра) в системе аккредитации аналитических лабораторий (центров))»

№ РОСС RU.0001.510565 выдан 10.08.2016 г. (дата внесения сведений в реестр аккредитованных лиц – 22.04.2015 г.), Самарская испытательная лаборатория ФГБУ «ВНИИЗЖ» (Уникальный номер записи об аккредитации в реестре аккредитованных лиц № RA.RU. 516467) и научно-исследовательской испытательной лаборатории ФГБОУ ВО «Самарский ГАУ». Экономическую оценку технологии возделывания картофеля с применением фосфогипса и минеральных удобрений проводили по системе натуральных и стоимостных нормативов и цен, принятых для производственных условий ФГБОУ ВО Самарский ГАУ в 2021 г.

Для решения поставленных целей и задач в двухфакторном полевом опыте были проведены следующие учеты, наблюдения и анализы по следующим методам:

1) фенологические наблюдения – визуально оценивалось наступление фаз развития опытных культур по Методике государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур [86];

2) учет фактического урожая экспериментальных культур проводили с учетной площади делянки с последующим пересчетом на 100% чистоту (ГОСТ 12037-81) и 14% влажность (ГОСТ 27548-97);

3) отбор и подготовку проб почвы для химического анализа (ГОСТ Р 58595-2019) проводили буром Малькова в пахотном слое каждого варианта I и III повторности из пяти точечных проб методом конверта на делянках.

В смешанных образцах определяли:

- обменную кислотность pH_{KCl} потенциометрическим методом (ГОСТ 26483-85);
- актуальную кислотность pH_{H_2O} потенциометрическим методом (ГОСТ 26483-85);

- содержание органического вещества в виде гумуса по методу Тюрина в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26213-91),

- содержание общего азота (ГОСТ 26107-84),

- содержание подвижных форм фосфора и обменного калия – по методу Ф. В. Чирикова в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26204-91), в карбонатных почвах по Б. П. Мачигину (ГОСТ 26205-91);

- гидролитическую кислотность по методу Каппена в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26212-91);

Полученные экспериментальные данные подвергались статистической обработке методом дисперсионного анализа двухфакторного опыта [21] и корреляционно-регрессионного анализа с использованием электронной таблицы Microsoft Office Excel 2007.

Подготовку образцов почвы и растений для определения валового содержания тяжёлых металлов в них проводили традиционным методом (Муравин Э. А., 2005).

Из средних образцов воздушно-сухого растительного материала отбирали, измельчали вручную и взвешивали на аналитических весах с точностью до 3-го знака определенное количество надземной фитомассы и клубней растений. Количество воздушно сухого материала, необходимого для анализа, определяли по выходу золы не менее 100 мг зольных веществ. Навеску воздушно-сухого материала озоляли в муфельной печи при температуре +450 - +500 в течение 4-20 часов в зависимости от характера образца (Пустовой И. В. и др., 1995). Зола взвешивали на аналитических весах до 3-го знака, растирали в агатовой ступке и помещали в маркированные пакетики, на которых указывали начальную навеску воздушно-сухого материала и вес полученной золы в граммах. В пакетиках подготовленные пробы хранились до анализа.

Определение валовых форм тяжелых металлов в почвах и растительных образцах проводилось с предварительной подготовкой проб методом «сухой» минерализации при 575°C. Подвижные формы соединений извлекались ацетатно-аммонийным буферным раствором с pH 4,8 (ААБ). Экстрагент принят агрохимической службой для извлечения доступных растениям микроэлементов. Конечное определение элементов проводили пламенным и электротермическим вариантами с применением атомно-абсорбционного спектрофотометра «Спектр 5-4» в пламени ацетилен – воздух. Одновременно проводили холостой анализ, включая все его стадии, кроме взятия пробы почвы. За окончательный результат испытания принимали среднее арифметическое двух параллельных определений.

Помимо содержания тяжелых металлов в почвах определяли:

- содержание гумуса по методу И. В. Тюрина в модификации ЦИНАО в соответствии с ГОСТ 26213-91;
- pH солевой суспензии в модификации ЦИНАО в соответствии ГОСТ 26483-83;
- содержание подвижного фосфора и обменного калия в нейтральных почвах по Ф. В. Чирикову (ГОСТ 26204-91), в карбонатных почвах по Б. П. Мачигину (ГОСТ 26205-91);
- содержание нитратного азота (ГОСТ 26951);
- содержание легкогидролизуемого азота по Тюрину и Кононовой [59];
- содержание поглощенных оснований Ca^{2+} и Mg^{2+} атомно-абсорбционным методом ЦИНАО (ГОСТ 26487-85);
- содержание подвижной серы по методу ЦИНАО (ГОСТ 26490-85);
- емкость катионного обмена ГОСТ 17.4.4.01-84;
- содержание тяжелых металлов методом атомно-абсорбционной спектроскопии [45];
- содержания тяжелых металлов в надземной фитомассе проводили пламенным и электротермическим вариантами атомно-абсорбционной спектроскопии с предварительной подготовкой проб методом «сухой» минерализации [45];
- агрегатный анализ почв методом Н. И. Савинова (ГОСТ 12536-2014).

Содержание подвижного фосфора и обменного калия получены разными методами, для сопоставимости полученные результаты лабораторных анализов по Мачигину пересчитаны по методу Чирикова.

В качестве фоновых значений тяжелых металлов использовались значения, полученные Н. В. Прохоровой (1998, 2000, 2005, 2006) [57].

Полученные экспериментальные данные подвергались статистической обработке методом дисперсионного анализа двухфакторного опыта [21] и корреляционно-регрессионного анализа с использованием электронной таблицы Microsoft Office Excel 2007.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1. Агрохимические показатели почв производственных плантаций картофеля

Интенсивная технология выращивания сельскохозяйственных культур, обеспечивая высокую урожайность, способствует выносу питательных веществ из почвы и минерализации гумуса. Регулирование этого процесса возможно за счет повышения плодородия почвы, которая способна обеспечивать оптимальные условия для роста и развития растений. Чтобы повысить плодородие, нужно следить за агрофизическими, биологическими и агрохимическими показателями почвы.

К способам повышения плодородия относится чередование культур в севообороте, возделывание многолетних трав и зернобобовых, использование органических удобрений, дозированное применение минеральных удобрений, использование органических удобрений, повышение супрессивности почвы, мероприятия по защите почвы от эрозии, контроль реакции почвы. Главное правило повышения плодородия почвы – возвращать в неё все полезные вещества, которые выносятся культурами, за счет внесения дозированное применение минеральных удобрений и лучше всего – с небольшим избытком.

Для правильного и грамотного контроля за почвенным плодородием, для своевременного принятия мер по его выравниванию и повышению на опытных участках и по севообороту в целом, необходима полная и подробная агрохимическая характеристика полей севооборота, которую можно получить по результатам агрохимического обследования (табл. 3.1.1)

Среди комплекса почв, оказывающих влияние на условия питательного режима и применение удобрений, имеют физико-химические свойства: реакция почвы; величина поглощения; степень насыщенности основаниями; содержание и запасы гумуса; плотность сложения и пористость; фракционный состав.

**Таблица 3.1.1 – Агрохимические показатели
почв участков возделывания картофеля, 2021-2024 гг.**

	Вариант опыта	рН (сол) обменная кислотность	рН (вод) актуальная кислотность	Гумус, %	Азот NO ₃ ⁻ , мг/кг	Азот ЛГ мг/кг	Подвижные формы, мг/кг		ЕКО мг-экв/100г почвы
							P ₂ O ₅	K ₂ O	
1	N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	7,3	8,0	4,3	55,0	7,0	58,0	265,0	26,0
2	+ ФГ 2 т/га	7,1	7,1	4,8	10,7	96,0	213,0	160,5	30,0
3	+ ФГ 4 т/га	7,0	7,0	4,5	7,6	127,0	203,0	145,0	46,0
4	+ ФГ 6 т/га	7,3	7,4	4,7	11,0	128,0	56,0	300,0	36,0
5	+ ФГ 8 т/га	7,1	7,1	4,5	7,2	122,0	207,0	210,0	38,0

Важным показателем в получении продукции растениеводства, сохранении и повышении плодородия при изучении агрохимического состояния почвы уделяется органическому веществу почвы, которое находится в виде гумуса и остатков животных и растений, т.е. это важная составная часть почвы, представляющая сложный комплекс органических веществ биогенного происхождения. Оценка содержания гумуса в почве дифференцирована (табл.3.1.2).

**Таблица 3.1.2 – Показатели гумусового состояния почв на опытных участках
выращивания картофеля, 2021-2024 гг.**

Наименование показателя	Вариант опыта				
	N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	+ 2т/га	+ 4 т/га	+ 6т/га	+ 8 т/га
Содержание гумуса, %	4,3	4,8	4,5	4,7	4,5
Запас гумуса в слое 0-20 см	120	131	144	137	135
Углерод общий, %	0,82	1,43	1,21	0,97	1,32
Углерод гуминовых кислот, %	0,20	0,36	0,52	0,36	0,53
Углерод фульвокислот, %	0,62	1,07	0,69	0,61	0,79
Степень гумификации органического вещества С _{ГК} : С _{ФК} ×100	24 средняя	25 средняя	43 очень высокая	37 высокая	39 высокая
Тип гумуса, С _{ГК} : С _{ФК}	0,32 очень фульватный	0,34 очень фульватный	0,75 гуматно- фульватный	0,59 фульватный	0,67 фульватный

Гумусовое состояние почв принято характеризовать содержанием гумуса в пахотном горизонте, запасы в слое 0-20 см и 0-100 см, отношение C:N, т.е. обогащенностью азотом, тип гумуса, степень гумификации органического вещества, а также, отношение углерода гуминовых кислот к углероду фульвокислот, в соответствии с которым определяется тип гумуса.

Распад органической субстанции почвы происходит в зависимости от соотношения C:N. Чем интенсивнее обработки почвы, тем быстрее протекает процесс распада органического вещества и тем ниже содержание гумуса в почве. Соотношение C:N касается биодоступной доли углерода и азота в растениях и в почве и является индикатором ее плодородия. Обогащенность гумуса азотом, характеризующаяся величиной отношения C:N, служит практически значимым показателем, поскольку гумус является важным источником азота для живых организмов. Также этот показатель можно использовать для характеристики резервов азота и степени гумификации органического вещества.

Расчет баланса гумуса (3.1.3) дает возможность оценить характер изменения его содержания в почве при сложившейся системе земледелия. Знание баланса гумуса в севообороте необходимо для определения потребности в органических удобрениях.

Таблица 3.1.3 – Определение обогащенности гумуса азотом в почвах на опытных участках выращивания картофеля, 2021-2024 гг.

№	Вариант опыта	pH (сол)	Гумус, %	C общ. %	N общ. %	C:N
1	N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	7,3	4,3	2,49	0,21	14:1
2	+ ФГ 2 т/га	7,1	4,8	2,78	0,24	14:1
3	+ ФГ 4 т/га	7,0	4,5	2,61	0,25	10:1
4	+ ФГ 6 т/га	7,3	4,7	2,73	0,22	12:1
5	+ ФГ 8 т/га	7,1	4,5	2,61	0,23	13:1

Оценку баланса гумуса и разработку приемов воспроизводства органического вещества осуществляют на основе анализа всех его составляющих в почвах конкретных полей с учетом чередования культур. Баланс гумуса представляет собой разность между статьями его прихода и расхода. Главная статья приходной части – вновь образующиеся гумусовые вещества за счет гумификации растительных

остатков и органических удобрений. Расходную часть гумусового баланса составляет минерализация органического вещества при возделывании растений в севообороте. Для получения полной картины о необходимости восполнения запаса гумуса требуется произвести расчет баланса гумуса и потребность в органических веществах. Оценку баланса гумуса и разработку приемов воспроизводства органического веществ осуществляют на основе анализа всех его составляющих в почвах исследуемых полей с учетом чередования культур. Любые изменения в структуре севооборотов, системах обработки почвы, удобрения приводят к его количественным и качественным изменениям.

Дефицит гумуса в севообороте можно восполнить путем внесения органических удобрений. В среднем, подстилочный навоз содержит 22% сухого вещества, коэффициент гумификации которого равен 0,2 или 20%. Тогда выход гумуса из 1 т навоза составляет 44 кг или 0,044 т ($1,0 \times 22 \times 20 / 100 \times 100$). Срок действия органических удобрений на тяжелых почвах 3-4 года.

Таблица 3.1.4 – Расчет баланс гумуса в севообороте с картофелем сорта Гала

Культура	Вариант опыта	Средняя урожайность, за 4 года т/га	Минерализация (потери) гумуса, т/га	Коэффициент выхода пожниво-корневых остатков от основной продукции урожайности	Накопление гумуса за счет пожниво-корневых остатков, т/га		
					Выход пожниво-корневых остатков, т/га	Выход гумуса из пожниво-корневых остатков, т/га	Баланс гумуса +/-т/га
Соя		2,5	0,5	1,3	3,25	0,81	+0,31
Картофель	N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	51,3	0,8	0,11	5,64	0,56	-0,24
	+ФГ 2 т/га	54,1	0,8	0,11	5,95	0,60	-0,20
	+ФГ 4 т/га	56,4	0,8	0,11	6,20	0,62	-0,18
	+ФГ 6 т/га	58,7	0,8	0,11	6,46	0,65	-0,15
	+ФГ 8 т/га	59,3	0,8	0,11	6,52	0,65	-0,15
Фацелия		20,0	0,2	0,25	5,0	0,50	+0,30
Соя		2,5	0,5	1,3	3,25	0,81	+0,31
Лук		52,1	0,8	0,11	5,73	0,57	-0,23
Итого		-	6,0	-			-0,23

Расчет баланса гумуса по севообороту определялся нами в расчете на 1 га севооборотной площади. Вынос гумуса в 2024 году при выращивании продукции в севообороте производится картофелем, соей, луком и фацелией. Вынос гумуса картофелем рассчитывался по вариантам: фон ($N_{150}P_{150}K_{300}$), и фон + фосфогипс (ФГ) с различной дозой внесения сорта Гала (табл. 3.1.4 и 3.1.5) и сорта Гранада (табл. 3.1.6 и 3.1.7).

Урожайность культур принята по результатам полученного урожая в границах севооборота. Расчет баланса гумуса позволяет осуществить контроль за характером изменения содержания гумуса при сложившейся структуре посевных площадей и уровне применения удобрений.

Исходя из полученных результатов (табл. 3.1.4), определялась потребность в органическом удобрении для сорта Гала. Наибольший дефицит испытывает вариант на фоновом участке с внесением минеральных удобрений $N_{150}P_{150}K_{300}$ при принятой урожайности в севообороте лука – 52,1 т/га, сои – 2,5 т/га и фацелии – 20 т/га (зеленой массы) носит отрицательный баланс и составил по севообороту – 0,23. При вариантном исследовании на участке фон ($N_{150}P_{150}K_{300}$) и фон + ФГ в дозе 2 т/га, 4 т/га, 6 т/га и 8 т/га с колебанием урожайности картофеля с 51,3 т/га до 59,3 т/га (урожайность остальных культур в севообороте осталась без изменения). Баланс гумуса, полученный расчетным путем, отрицательный во всех вариантах. Однако наблюдается положительный баланс в вариантах опыта фон + ФГ 2 т/га, 4 т/га и 8 т/га за счет выравнивания баланса гумуса при возделывании сои на 2-х участках и фацелии.

Для восполнения гумуса в почве установили дозу внесения и насыщенность органическими удобрениями. Баланс гумуса в пятипольном севообороте будет восстановлен при дозе органических удобрений в варианте опыта фон + ФГ 8 т/га из расчета 5,23 т/га и на участке вариантности фон + ФГ 6 т/га – 1,82 т/га при насыщенности органическими удобрениями в варианте фон + ФГ 8 т/га – 1,05 т/га и варианте исследования фон + ФГ 6 т/га – 0,36 т/га для сорта Гала. Результаты расчета приведены в таблице 3.1.5.

Таблица 3.1.5 – Расчет баланса гумуса в среднем по севообороту с картофелем сорта Гала

Показатель	Вариант опыта				
	N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	+ФГ 2 т/га	+ФГ 4 т/га	+ФГ 6 т/га	+ФГ 8 т/га
Баланс гумуса по севообороту	+0,45	+0,25	+0,07	-0,08	-0,23
Среднее по севообороту	+0,09	+0,05	+0,01	-0,02	-0,05
Доза внесения органических удобрений, т/га	-	-	-	1,82	5,23
Насыщенность органическими удобрениями, т/га	-	-	-	0,36	1,05

Исходя из полученных результатов, определялась потребность в органическом удобрении для сорта Гранада (табл. 3.1.6).

Таблица 3.1.6 – Расчет баланс гумуса в севообороте с картофелем сорта Гранада

Культура	Вариант опыта	Средняя урожайность, за 4 года т/га	Минерализация (потери) гумуса, т/га	Коэффициент выхода пожниво-корневых остатков от основной продукции урожайности	Накопление гумуса за счет пожниво-корневых остатков, т/га		
					выход пожниво-корневых остатков, т/га	выход гумуса из пожниво-корневых остатков, т/га	баланс гумуса +/-т/га
Соя		2,5	0,5	1,3	3,25	0,81	+0,31
Картофель	N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	54,1	0,8	0,11	5,95	0,60	-0,20
	+ФГ 2 т/га	58,3	0,8	0,11	6,41	0,64	-0,16
	+ФГ 4 т/га	58,1	0,8	0,11	6,39	0,64	-0,16
	+ФГ 6 т/га	64,0	0,8	0,11	7,04	0,70	-0,10
	+ФГ 8 т/га	62,2	0,8	0,11	6,84	0,68	-0,12
Фацелия		20,0	0,2	0,25	5,0	0,50	+0,30
Соя		2,45	0,5	1,3	3,19	0,80	+0,30
Лук		56,5	0,8	0,11	6,22	0,62	-0,18
Итого		-	6,0	-			-0,01

Расчет баланса гумуса с картофелем сорта Гранада показал, что в целом по севообороту создан бездефицитный (компенсированным) баланс и результат приведен в таблице 3.1.7.

Таблица 3.1.7 – Расчет баланса гумуса в среднем по севообороту с картофелем сорта Гранада

Показатель	Вариант опыта				
	N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	+ФГ 2 т/га	+ФГ 4 т/га	+ФГ 6 т/га	+ФГ 8 т/га
Баланс гумуса по севообороту	+0,53	+0,37	+0,21	+0,11	-0,01
Среднее по севообороту	+0,11	+0,07	+0,04	+0,02	0
Доза внесения органических удобрений т/га	*	-	-	-	-
Насыщенность органическими удобрениями, т/га	-	-	-	-	-

Примечание: *баланс гумуса бездефицитный, внесения не требуется

Однако на опытных участках при выращивании картофеля разность между статьями прихода и расхода гумуса образовывается отрицательный баланс во всех вариантах опыта с колебанием от 0,20 т/га на фоне и до 0,10 т/га в варианте фон +ФГ 6 т/га. Данный отрицательный баланс гумуса в пятипольном севообороте компенсируется за счет включения в севооборот выращивания сои на 2-х полях и фацелии. Внесение органического удобрения на исследуемом участке в варианте опыта сорта Гранада не требуется.

Важным показателем при расчётах балансов является насыщенность – количество удобрений, приходящихся на 1 га площади посевов.

В системе агротехнических мероприятий, направленных на повышение плодородия почв и урожайности сельскохозяйственных культур, одно из важных мест занимает использование удобрений. При установлении доз органических и минеральных удобрений необходимо учитывать исходный запас доступных для растений питательных элементов, гумуса, реакцию почвенной среды, климатические условия, биологические требования сельскохозяйственных культур, их сорта, проектируемые урожайность и качество продукции.

Достижение и поддержание рационального режима органического вещества, а также подвижных форм питательных элементов, прежде всего азота, фосфора и калия.

Азот – является важным элементом питания для растений. Культура постоянно потребляет его в течение всей вегетации. За счет происходящих почвенных

процессов азот постоянно пополняется. Несмотря на относительно невысокое содержание элемента в растениях (0,5-4% сухого вещества), азот имеет решающее значение в образовании белков, аминокислот, нуклеиновых кислот, хлорофилла, липидов, фосфатидов, многих витаминов (Кретович, 1982). Азот входит в состав гумусовых веществ почвы. Накопление его – характерная черта почвообразовательного процесса, обусловленная биологическим круговоротом веществ в системе «почва-растение». Аккумуляция азота в почвах является одним из признаков почвообразования, определяет ростовые процессы, размеры и интенсивность синтеза белка, являющегося катализатором всех процессов в растении, в том числе фотосинтеза. Важной составляющей служит пополнение азота за счет минерализации гумуса, которая происходит при действии почвенных микроорганизмов. Коэффициент пользования из почвы в основном составляет 70% (0,7). В почве происходит постоянный цикл трансформации азота из одних форм в другие, в частности из минеральных в органические и обратно. Данные процессы происходят в результате синтеза и разложения.

В отобранных образцах проводили исследование по обеспеченности почвы нитратной и легкогидролизуемой формой азота.

Минеральные формы азота (NH_4^+ , NH_2 , NO_3^- , NO_2^-). Все три формы соединений азота – нитратная (NO_3^-), аммонийная (NH_4^+), и амидная (NH_2) могут служить растению источником азотного питания.

Органический азот подразделяют на легкогидролизуемый (амиды, амины), трудно гидролизуемый (амины, часть амидов, гумины, необменный аммоний) и негидролизуемый (азот гуминов, меланинов, битумов, необменный аммоний) которые извлекаются (минерализуются) из почвы путем минерализации и являются ближайшими источниками пополнения минеральных соединений азота, используемых растениями.

Легкогидролизуемый азот в почве – это органический азот, который может быстро расщепляться и усваиваться растениями. Он находится в почве в основном в виде нитратов и аммония. Легкогидролизуемый азот образуется в результате раз-

ложения остатков растений и животных, а также под действием микробной активности. Содержание легкогидролизуемого азота в почве является одним из важных показателей её плодородия. Высокое содержание этого вида азота в почве способствует более интенсивному росту растений и повышению их урожайности. Легкогидролизуемый азот представлен низкомолекулярными соединениями – аминокислотами и амидами, азот которых становится доступным после минерализации. В почвах легкогидролизуемый азот составляет 5-10% от общего содержания.

К преобладающим процессам относятся азотфиксация, аммонификация, нитрификация, денитрификация (биологическая и химическая) и иммобилизация (фиксация микроорганизмами и глинистыми минералами). Минерализация и иммобилизация определяют содержание подвижных форм питательных веществ и условия азотного питания растений.

Содержание нитратов в почвах показывают, что накопление этой формы минерального азота определяется потенциальными запасами почвенного плодородия. Режим нитратного азота в значительной степени определяется способами основной обработки почвы. Сокращение глубины и числа обработок приводит к снижению накопления нитратов.

Основные биохимические этапы миграции и трансформации нитратного азота следующие: 1. Биологическое поглощение. 2. Денитрификация. 3. Вымывание – вынос нитратного азота в почвенном растворе из корнеобитаемого слоя почвенного профиля.

На опытных участках, проводилось исследование обеспеченности почвы как минеральными, так и органическими формами азота.

Содержание нитратного азота (NO_3^-) по вариантам: фон ($\text{N}_{150}\text{P}_{150}\text{K}_{300}$) обеспеченность азотом очень высокая; фон +фосфогипс (ФГ) 2 и 6 т/га – низкая; фон +фосфогипс (ФГ) 4, 8 т/га – очень низкая.

Следует отметить, что нитратный азот очень подвижен и удерживается от вымывания только с помощью биологической поглотительной способности. Интенсивность биологического поглощения зависит от аэрации, температуры, влажности и других свойств почвы, от количества и состава органического вещества,

служащего источником питания и энергетическим материалом для преобладающих в почве гетеротрофных микроорганизмов. При этом нитратный азот восстанавливается микроорганизмами до свободного газообразного азота, который теряется из почвы. Азот теряется также в результате вымывания нитратов, особенно из легких почв, при орошении [70].

Содержанию легкогидролизуемого азота по вариантам: обеспеченность ЛГ варианты: фон ($N_{150}P_{150}K_{300}$) – очень низкая; фон + фосфогипс (ФГ) 2 т/га – высокая; фон + 4 т/га, 6 т/га и 8 т/га – очень высокая.

Однако данная форма азота доступна только после процесса минерализации в природных условиях и благодаря этому являются ближайшими источниками пополнения минеральных соединений азота, используемых растениями.

В месте, где органическое вещество подверглось аммонификаторам, там эта аммонийная форма прикрепилась к почвенно-поглощающему комплексу, где ЕКО зависит от типа почвы, гранулометрического состава, от реакции почвенного раствора и от содержания гумуса. Емкость катионного обмена является одной из интегральных агрономических и экологических характеристик почв. ЕКО в значительной степени обусловлена буферностью почв. С ёмкостью катионного обмена тесно связано понятие почвенного поглощающего комплекса (ППК). Под ППК понимают совокупность почвенных частиц – коллоидов, способных поглощать и обменивать поглощённые ионы. С емкостью катионного обмена связывается устойчивость почв к антропогенным воздействиям, в частности, к химическому загрязнению. Этот показатель указывает на то, какое количество питательных элементов из удобрений могут быть закреплены почвой. Все внесенное вне этого показателя будет вымываться и теряться. ЕКО на опытном участке коррелирует по вариантам исследования. Наибольшая ЕКО – высокая выявлена в варианте опыта фон + ФГ 4 т/га, наименьшая – средняя на фоновом участке. Насыщение ППК катионами кальция, а также необходимыми для полноценного развития растений элементами: фосфор, сера, кремний и даже цинк которые играют важную роль для всех сельскохозяйственных культур [70].

Определение норм минеральных удобрений на планируемую урожайность производился расчетными методами, в основе которых лежит баланс питательных веществ сопоставление расхода элементов питания на формирование урожая (т.е. выноса элементов питания с урожаем культур) с поступлением питательных веществ из почвы и удобрений.

Вынос основных элементов питания на единицу урожая отдельных культур может значительно различаться в зависимости от условий выращивания. Поэтому для расчетов лучше пользоваться данными о выносе, полученными в хозяйстве или в типичных почвенных условиях ближайшими опытными учреждениями. Коэффициенты использования азота, фосфора и калия из минеральных удобрений также подвержены существенным колебаниям в зависимости от культуры, почвенно-климатических условий, нормы, времени внесения и способа заделки удобрений и т.д. По расчетному методу доза минерального удобрения определяется по каждому питательному элементу. Растения не используют полностью удобрения в год внесения, часть удобрений остаётся неиспользованной и оказывает влияние на урожай растений на второй и даже на третий год после внесения.

На основе полученных данных о средней урожайности картофеля за период 2021-2024 гг. с разделением на 2 испытываемых сорта произведен расчет потребности в минеральных удобрениях (табл. 3.1.8).

Расчет произведен балансовым методом, при котором учитываются все статьи прихода и расхода питательных веществ. Расчет норм удобрений ведется на основе материалов агрохимического обследования, а также показателей выноса питательных элементов на фактически полученную урожайность под одну культуру – картофель. Вынос элементов питания картофелем зависит от структуры урожая. Картофель отличается повышенной требовательностью к плодородию почвы, так как корневая система его слабо развита и располагается в поверхностном слое почвы.

На формирование 1 т картофеля затрачивается 6,0 кг азота, 2,0 кг – фосфора и 9,0 кг калия. Потребность в элементах питания, находится в прямой зависимости

от полученного урожая, чем выше был получен урожай, тем выше потребность в азотном, фосфорном и калийном питании.

Для получения картофеля сорта Гала при средней урожайности за 4 года 2021-2024 гг. 51,3 т/га на 1 га потребуется внести: 357 кг азота, 327 кг – фосфора и 210 кг калия. Для сорта Гранада при средней урожайности за 4 года 2021-2024 гг. 54,1 т/га на 1 га потребуется внести: 381,0 кг азота, 349,0 кг – фосфора и 250,0 кг калия.

Однако проведя расчет потребности доз минеральных удобрений для получения урожайности в элементах питания за ротацию севооборота, получены другие результаты. Расчет в элементах питания сельскохозяйственных культур за ротацию севооборота проводят с учётом: данных о выносе NPK планируемой урожайностью, данных обеспеченности почв элементами питания в среднем по севообороту, данных по использованию NPK из минеральных и органических удобрений. При наличии в севообороте многолетних бобовых трав и зернобобовых в почве накапливается биологический азот за счет фиксации его клубеньковыми бактериями из атмосферы. Часть биологического азота усваивается последующими растениями. Принято считать, что азот в почве накапливается 50% от выноса, а используется 50% от того, что накопилось в почве. В севообороте присутствует бобовая культура – соя. При определении общей потребности в минеральных удобрениях учитывают балансовые коэффициенты их использования за ротацию севооборота.

Был произведен расчет на примере 2024 года при условии, для получения урожайности картофеля сорта Гала 51,3 т/га, лука – 52,1 т/га, сои 2,50 т/га и фацелии 20 т/га зеленой массы, а также сорта Гранада – средней урожайности 54,1 т/га где урожайность лука, сои и фацелии осталась без изменения и в обоих вариантах без внесения органических удобрений. Класс обеспеченности почвы в обоих вариантах составил: по азоту – V, фосфору – III и калию – VI.

Исходя из полученных расчетов потребности в элементах питания за ротацию севооборота 2024 года получения продукции: картофеля Гала – 51,3 т/га, лука – 52,1 т/га, 2,50 т/га сои и фацелии 20,0 т/га необходимо было внести минеральных удобрений 178 425 кг из них: 74 983 кг азота, 38 716 кг фосфора и 64 726 кг

калия; для сорта Гранада, имея среднюю урожайность ниже 54,1 т/га при одинаковом классе обеспеченности почвы потребность за ротацию 2024 года для получения продукции необходимо внести минеральных удобрений 182 536 кг из них: 76 553 кг азота, 39 547 кг фосфора и 66 436 кг калия.

Балансовым методом была определена потребность растений в элементах питания на один год внесения на примере 2024 года. Основным условием правильного применения удобрений под сельскохозяйственные культуры является учёт совокупного воздействия основных факторов, влияющих на рост и развитие растений. Расчет доз удобрений под культуры севооборота для получения урожайности при использовании балансового метода складывается из этапов: вынос питательных веществ урожаем каждой культурой, поступления элементов питания из почвы, недостающее количество питательных веществ восполняют за счет минеральных удобрений.

Дозы минеральных удобрений с учетом биологических требований культур и плодородия почв в 2024 году и для получения продукции сорта Гала: картофеля – 51,3 т/га, лука репчатого – 52,1 т/га, 2,45 т/га сои и 20,0 т/га фацелия (зеленая масса) необходимо было внести азота под картофель – 124,4 кг/га; фосфора под фацелию – 4,3 кг/га, под картофель – 16,3 кг/га, под лук – 7,02 кг/га [70]; калия под картофель – 103,5 кг/га (табл. 3.1.9 и 3.1.11). Если, согласно расчетам, не требуется вносить фосфор, то необходимо планировать предпосевное внесение фосфорных удобрений.

Для получения продукции сорта Гранада: картофеля – 54,1 т/га, лука репчатого – 52,1 т/га, 2,50-2,55 т/га сои и фацелии (зеленая масса) – 20,0 т/га необходимо было внести: азота под картофель – 39,1 кг/га; фосфора под сою – 0,78 кг/га, под картофель – 8,3 кг/га, под лук – 0,78 кг/га и под фацелию – 12,7 кг/га; калия под сою – 2,1 кг/га, под лук – 2,1 кг/га, под картофель – 129,9 кг/га и фацелию – 158,3 кг/га (табл. 3.1.10 и 3.1.12).

Интенсивное земледелие, обеспечивая высокую урожайность, способствует выносу питательных веществ из почвы и минерализации гумуса. Регулирование этого процесса возможно только при достаточном внесении удобрений, которые являются основным инструментом в регулировании питательного режима почвы.

Оптимизация питательного режима почвы достигается с помощью внесения органических и минеральных удобрений, которые: пополняют запасы питательных веществ почве; создают оптимальные условия для обеспечения жизнедеятельности почвенных микроорганизмов и бактерий; активизируют использование выработанных растениями и микроорганизмами питательных веществ; способствуют формированию водопрочной структуры, оптимизации водно-физических свойств в корнеобитаемом слое почвы; оптимизируют уровень кислотности почвенного раствора, тем самым, создавая условия для наилучшего усвоения растениями питательных веществ.

Важным критерием обоснованности системы удобрения севооборота является баланс питательных элементов, количественные показатели которого обеспечивают прогноз изменений обеспеченности почв питательными элементами. Это количественный и одновременно качественный показатель, выраженный в абсолютных (кг/га д.в.) и относительных (%) величинах. Качество баланса любого элемента при абсолютном выражении результатов определяется соответствующим знаком.

На основе полученных результатов составлен баланс питательных веществ в севообороте. Баланс питательных элементов – важнейшая агроэкологическая оценка продуктивности культур и плодородия почв любой системы удобрения. Баланс складывается из расходных (вынос питательных веществ планируемым урожаем и потери азота от денитрофикации) и приходных статей (поступило питательных веществ в почву с органическими и минеральными удобрениями, семенами и атмосферными) (табл. 3.1.13).

Коэффициент возврата (возмещение) выноса (КВВ). Если он больше 1,0, то баланс положительный количественно настолько, насколько КВВ больше 1,0; при КВВ меньше 1,0 – баланс отрицательный. Положительный баланс питательных веществ в севообороте выявлен по азоту при возделывании картофеля сорта Гала.

Таблица 3.1.8 – Расчет доз удобрений для получения урожая картофеля, т/га

Показатель	Сорт Гала средняя урожайность за 4 года фон			Сорт Гранада средняя урожайность за 4 года фон		
	51,3			54,1		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Вынос NPK на т урожая, кг (фон)	6,0	2,0	9,0	6,0	2,0	9,0
Общий вынос на за планируемую урожайность, кг/га	307,8	102,6	461,7	324,6	108,2	486,9
Содержание элементов питания в почве, мг/100г	5,5	5,80	26,0	5,5	5,8	26,0
Коэффициент перевода элементов питания от мг/100 г почвы в кг/га, (*30)	165,0	174,0	780,0	165,0	174,0	780,0
*Коэффициент использования NPK из почвы	0,35	0,12	0,40	0,35	0,12	0,40
Использование NPK из почвы, кг/га	57,8	20,9	312,0	57,8	20,9	312,0
Недостающее количество NPK в почве, кг/га	250,0	81,7	146,7	266,8	87,3	174,9
** Коэффициент использования NPK вносимых туков (в год внесения)	0,7	0,25	0,7	0,7	0,25	0,7
Необходимо внести NPK с туком, кг/га	357,0	327,0	210,0	381,0	349,0	250,0

Примечание: *Коэффициент использования питательных веществ из почвы (Кулаковская Т.Н., 1995) картофеля составляет: N – 0,20-0,35; P₂ O₅ 0,07-0,12; K₂ O – 0,09-0,40.

**Коэффициент использования элементов питания растениями из минеральных удобрений: N – 0,5-0,7; P₂ O₅ – 0,2-0,25; K₂ O – 0,5-0,7 первый год действия

Таблица 3.1.9 – Расчет потребности планируемой урожайности в элементах питания за ротацию севооборота с картофелем сорта Гала

№ п.п.	Культуры севооборота	Планируемая урожайность, т/га	Вынос 1 т урожая, кг			Вынос планируемым урожаем, кг/га		
			N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
1	Соя	2,50	74,5	18,9	26,9	189,9	48,2	68,6
2	Картофель	51,3	6,0	2,0	9,0	306,6	102,2	459,9
3	Фацелия	20,0	5,7	1,4	8,8	114,0	28,0	176,0
4	Соя	2,50	74,5	18,9	26,9	186,2	47,2	67,2
5	Лук	52,1	3,7	1,3	4,0	192,8	67,7	208,4
Вынос в целом за севооборот (S), кг						989,5	293,3	980,1
Вынос с 1 га, кг						197,9	58,7	196,1
Обеспеченность элементами питания (класс)						V	III	VI
Вносится с органическими удобрениями, кг/га (заданная насыщенность на 1 га пашни)						нет	нет	нет
Балансовые коэффициенты использования NPK из навоза за севооборот						70	80	120
Использование NPK из навоза за ротацию севооборота с учетом Кб, кг/га						-	-	-
Остаток N после бобовых (1/2 от выноса), кг/га						48,3	-	-
**Усвоено биологического азота, кг/га						27,5	-	-
Усвоено NPK в сумме (из навоза и биологического азота), кг/га						27,5	-	-
Должно быть усвоено NPK из минеральных удобрений, кг/га						170,4	58,7	196,1
***Балансовые коэффициенты использования NPK из минеральных удобрений за севооборот						105	70	140
Требуется минеральных удобрений с учетом Кб, кг/га						162,3	83,8	140,1
Насыщенность минеральными удобрениями, кг/га						162,3	83,8	140,1
Соотношение элементов питания						1,9	1,0	1,7
Потребность на площадь севооборота, кг						74 983	38 716	64 726

Примечание: * Расчет не проводился; **Азот в почве накапливается 50% от выноса, а используется 50% от того, что находилось в почве;

***Коэффициент использования NPK из минеральных удобрений за севооборот в зависимости от эффективного плодородия почв, % (Жуков Ю.П., 1986) в среднем за ротацию в зависимости от класса почвы по содержанию калия и фосфора равен: N – 95 -105; K₂ O – 120-140; P₂ O₅ – 60-70.

Таблица 3.1.10 – Расчет потребности планируемой урожайности в элементах питания за ротацию севооборота с картофелем сорта Гранада

№ п.п.	Культуры севооборота	Планируемая урожайность, т/га	Вынос 1 т урожая, кг			Вынос планируемым урожаем, кг/га		
			N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
1	Соя	2,55	74,5	18,9	26,9	189,9	48,2	68,6
2	Картофель	54,1	6,0	2,0	9,0	324,5	108,2	486,9
3	Фацелия	20,0	5,7	1,4	8,8	114,0	28,0	176,0
4	Соя	2,50	74,5	18,9	26,9	186,2	47,2	67,2
5	Лук	56,5	3,7	1,3	4,0	192,8	67,7	208,4
Вынос в целом за севооборот (S), кг						1007,4	299,3	1007,1
Вынос с 1 га, кг						201,5	59,9	201,4
Обеспеченность элементами питания (класс)						V	III	VI
Вносятся с органическими удобрениями, кг/га (заданная насыщенность на 1 га пашни)						нет	нет	нет
Балансовые коэффициенты использования NPK из навоза за севооборот						70	80	120
Использование NPK из навоза за ротацию севооборота с учетом Кб, кг/га						-	-	-
Остаток N после бобовых (1/2 от выноса), кг/га						48,3	-	-
**Усвоено биологического азота, кг/га						27,5	-	-
Усвоено NPK в сумме (из навоза и биологического азота), кг/га						27,5	-	-
Должно быть усвоено NPK из минеральных удобрений, кг/га						174,0	59,9	201,4
***Балансовые коэффициенты использования NPK из минеральных удобрений за севооборот						105	70	140
Требуется минеральных удобрений с учетом Кб, кг/га						165,7	85,6	143,8
Насыщенность минеральными удобрениями, кг/га						165,7	85,6	143,8
Соотношение элементов питания						1,9	1,0	1,7
Потребность на площадь севооборота, кг						76 553	39 547	66 436

Примечание: * Расчет не проводился; **Азот в почве накапливается 50% от выноса, а используется 50% от того, что находилось в почве;

***Коэффициент использования NPK из минеральных удобрений за севооборот в зависимости от эффективного плодородия почв, % (Жуков Ю.П., 1986) в среднем за ротацию в зависимости от класса почвы по содержанию калия и фосфора равен: N – 95 -105; K₂O – 120-140; P₂O₅ – 60-70.

Таблица 3.1.11 – Потребности растений в элементах питания на один год в севообороте с картофелем сорта Гала

Культура	Планируемая урожайность, т/га	Вынос элементов питания планируемым урожаем, кг/га			Содержание в почве				*Использование из почвы, кг/га			Следует донести с удобрениями, кг/га			
					мг/кг		кг/га								
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	P ₂ O ₅	K ₂ O	P ₂ O ₅	K ₂ O	N (нитр.)	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
1.Соя	2,50	189,9	48,2	68,6	58,0	260,0	174,0	780,0	-	76,6	109,2	-	-	-	
2. Картофель	51,3	306,6	102,2	459,9	58,0	260,0	174,0	780,0	57,8	20,9	312,0	248,8	81,3	147,9	
3.Фацелия	20,0	114,0	28,0	176,0	58,0	260,0	174,0	780,0	-	20,9	212,2	-	7,1	-	
4.Соя	2,50	186,2	47,2	67,2	58,0	260,0	174,0	780,0	-	76,6	109,2	-	-	-	
5. Лук репка	52,1	192,8	67,7	208,4	58,0	260,0	174,0	780,0	-	20,9	312,0	-	46,8	-	
Продолжение табл.															
Доза органических удобрений, т/га	Вносится с органическими удобрениями, кг/га			Используется из органических удобрений, кг/га			Требуется внести в виде минеральных удобрений, кг/га			Требуется минеральных удобрений с учетом** коэффициентов использования, кг/га			Требуется внести минеральных удобрений с учётом биологических особенностей культур, кг/га		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Органическое удобрение не вносилось							-248,8	-	-						
							-	81,3	147,9	124,4	16,3	103,5		-	-
							-	7,1	-		4,3				
							-	-	-		-				
							-	46,8	-		7,02				
Насыщенность 1 га пашни элементами питания												162,3	83,8	140,1	
Соотношение элементов питания (N: P ₂ O ₅ : K ₂ O)												1,9	1,0	1,7	

Примечание: *Коэффициент использования N, P, K из почвы (обобщенные данные) картофель - N – 0,20-0,35; K₂ O – 0,09-0,40; P₂ O₅ – 0,07-0,12; лук - N – 0,20-0,35; P₂ O₅ 0,07-0,12; K₂ O – 0,09-0,40; соя - N – 0,30-0,45; K₂ O – 0,065-0,12; P₂ O₅ – 0,09-0,14. **Коэффициент использования растениями питательных веществ из минеральных удобрений в первый год (Петухов М.П. и др., 1979) составляет%: картофель - N – 50; K₂ O – 70; P₂ O₅ – 20; овощи - N – 60; K₂ O – 60; P₂ O₅ – 15; соя (данных нет прим. Рапс) - N – 70; K₂ O – 20; P₂ O₅ – 60.

Таблица 3.1.12 – Потребности растений в элементах питания на один год в севообороте картофелем сорта Гранада

Культура	Планируемая урожайность, т/га	Вынос элементов питания планируемым урожаем, кг/га			Содержание в почве				*Использование из почвы, кг/га			Следует донести с удобрениями, кг/га			
					мг/кг		кг/га								
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	P ₂ O ₅	K ₂ O	P ₂ O ₅	K ₂ O	N (нитр)	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
1.Соя	2,55	189,9	48,2	68,6	58,0	260,0	174,0	780,0	-	76,6	109,2	-	-	-	
2.Картофель	54,1	324,5	108,2	486,9	58,0	260,0	174,0	780,0	57,8	20,9	312,0	266,7	87,3	174,9	
3. Фацелия	20,0	114,0	28,0	176,0	58,0	260,0	174,0	780,0	-	20,9	212,2	-	7,1	-	
4.Соя	2,50	186,2	47,2	67,2	58,0	260,0	174,0	780,0	-	76,6	109,2	-	-	-	
5. Лук репка	56,5	192,8	67,7	208,4	58,0	260,0	174,0	780,0	-	20,9	312,0	-	46,8	-	
Продолжение табл.															
Доза органических удобрений, т/га	Вносится с органическими удобрениями, кг/га			Используется из органических удобрений, кг/га			Требуется внести в виде минеральных удобрений, кг/га			Требуется минеральных удобрений с учетом** коэффициентов использования, кг/га			Требуется внести минеральных удобрений с учётом биологических особенностей культур, кг/га		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Органическое удобрение не вносилось											0,78	2,1			
							266,7	87,3	174,9	39,1	8,3	129,9		-	-
								7,1			12,7	158,3			
										-	-	-			
								46,8			0,78	2,1			
Насыщенность 1 га пашни элементами питания												165,7	85,6	143,8	
Соотношение элементов питания (N: P ₂ O ₅ : K ₂ O)												1,9	1,0	1,7	

Примечание: *Коэффициент использования N, P, K из почвы (обобщенные данные) картофель - N – 0,20-0,35; K₂O – 0,09-0,40; P₂O₅ – 0,07-0,12; лук - N – 0,20-0,35; P₂O₅ 0,07-0,12; K₂O – 0,09-0,40; соя - N – 0,30-0,45; K₂O – 0,065-0,12; P₂O₅ – 0,09-0,14.

Таблица 3.1.13 – Баланс питательных веществ в севообороте с картофелем

Показатели	Сорт Гала			Сорт Гранада		
	на 1 га д.в., кг					
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Вынос питательных веществ планируемым урожаем	197,9	58,7	196,1	201,5	59,9	201,4
Поступило в почву с минеральными удобрениями	124,4	9,2	103,5	39,1	5,64	73,1
с семенами	15	-	-	15	-	-
биологический азот	80	-	-	80	-	-
с атмосферными осадками	10	0,5	6	10	0,5	6
Коэффициент возврата (возмещение) выноса (КВВ)	1,16	0,16	0,56	0,72	0,10	0,39
Баланс, кг д.в. (±)	+32	-49	-87	-57	-54	-122
Интенсивность баланс, % к выносу (±)	116	16	56	72	10	39

Интенсивность баланса – отношение прихода элементов питания к их расходу выраженное в процентах.

Особенностью баланса азота в системе почва-удобрение-растение является подвижность его соединений. Азот – биогенный элемент, имеющий естественные источники пополнения запасов в почве. Источником пополнения азотом является биологическая фиксация симбиотическими и свободноживущими микроорганизмами.

Полученный *баланс азота отрицательный*. В приходной статье баланса учтено внесение азота с удобрением, не симбиотическая азотофиксация (поглощение атмосферного азота и превращение его в органическую форму осуществляется свободно живущими почвенными микроорганизмами), выпадение с осадками и поливной водой. В расходную статью баланса включено отчуждение азота с урожаем и потери азота от денитрификации (процесс восстановления окисленных соединений азота до молекулярного азота это приводит к потере почвенного азота).

Обеспеченность почв азотом характеризуется как высокая (V класс), при таком плодородии почв не допускается отрицательный баланс (+10-0), на исследуемом участке под сортом картофеля Гала баланс положительный и составил: +32 кг д.в., а на участке под сортом Гранада баланс отрицательный: -57,0 кг д.в., данный критерий подтверждается интенсивностью баланса на участке сорта Гала составил – 116% и сорт Гранада – 72% к выносу. Интенсивность баланса у сорта Гранада

выходит за пределы допуска и относится к отрицательному или дефицитному балансу (табл. 3.1.14).

Таблица 3.1.14 – Допустимые показатели баланса питательных элементов при плодородии почв, % к выносу (Агрохимия, 2003)

Элемент питания	Плодородие почв по всем элементам				
	Низкое (1-2 классы)	Среднее (3 класс)	Повышенное (4 класс)	Высокое (5 класс)	Очень высокое (6 класс)
N	+30-20	+30-20	+10-20	+10-0	-20-0*
P ₂ O ₅	+150-130	+100-70	+70-40	+40-0	-30-0*
K ₂ O	+50-30	+30-10	-20*-0	-20-40*	-50-40*

*- Допускается отрицательный баланс

Потребление фосфора из почвы восполняется практически только за счет внесения удобрений. Баланс фосфора формируется проще, чем азота – в него вовлечены лишь почва, вода и растения. Поступление фосфора с удобрениями и семенами определяется по химическому составу и нормам высева. Величина поступления от атмосферных осадков для фосфора не превышает 0,5 кг/га.

Обеспеченность почв фосфором характеризуется как средняя (III класс). Такое плодородие почв не допускает отрицательный баланс, а на исследуемом участке под сортом Гала баланс: -49 кг д.в., на участке под сортом Гранада баланс: -54 кг д.в., данный критерий подтверждается интенсивностью баланса на участках обоих сортов Гала и Гранада составляет 16 % и 10%, соответственно, к выносу, такая интенсивность выходит за пределы допуска (+70-40) и относится к отрицательному или дефицитному балансу (табл. 3.1.14).

Обеспеченность обменным калием характеризуется как очень высокая (VI класс). При таких критериях допускается отрицательный баланс. На исследуемых участках под сортом картофеля Гала баланс составил: -87 кг д.в., на участке под сортом Гранада баланс: -122 кг д.в., данный критерий подтверждает интенсивностью баланса на участке сортов Гала составляет 56% к выносу, который выходит за границу допуска (-20-40) и относится к отрицательному или дефицитному балансу. Однако интенсивность баланса на участке сорта Гранада составляет 39% к выносу, который не выходит за границу допуска (табл. 3.1.15).

Отрицательный баланс питательных элементов при разном плодородии почв обусловлен тем, что в почву недостаточно вносится минеральных удобрение,

что подтверждено расчетом баланса гумуса в почве, который по всем исследуемым годам отрицательный.

Поступление калия с удобрениями и семенами определяется по химическому составу и нормам высева. Величина поступления с атмосферными осадками для калия колеблется в пределах 2-6 кг/га. Баланс калия на исследуемых участках отрицательный. Для получения урожайности картофеля на уровне сорта Гала 51,3 т/га, сорта Гранада – 54,1 т/га, лука – 52,1 т/га, фацелии – 20,0 т/га (зеленой массы) и сои – 2,45-2,55 т/га и выше необходимо поддерживать бездефицитный баланс питательных веществ (табл. 3.1.14).

В условиях хорошей влагообеспеченности наиболее высокий урожай картофеля получают при включении в севооборот сои на 2-х полях, фацелии и фосфогипса в вариантах 2 т/га, 4 т/га, 6 т/га, 8 т/га на фоне минеральных ($N_{150}P_{150}K_{300}$) удобрений. Большое значение имеет внесение общего количества минеральных удобрений в подкормку [86].

В жизненном цикле картофеля можно выделить четыре основных периода роста и развития. Первый – от посадки до появления всходов; второй – период вегетативного роста надземной массы и корневой системы; третий – период бутонизации, цветения, интенсивного роста столонов и клубнеобразования; четвертый – период завершения роста клубней и накопления в них крахмала, от начала отмирания ботвы до физиологического созревания клубней.

Нормы удобрений при орошении должны быть более высокими, и, что особенно важно, необходимо более строго выдерживать оптимальные соотношения элементов питания. Эффективность применяемых удобрений в сочетании с орошением возрастает в 2-3 раза, а эффект от орошения на удобренном фоне на 30-40% выше, чем на фоне без удобрений. В этих условиях продуктивное столонообразование возрастает до 85%.

На оптимальную норму и сроки внесения удобрений влияет группа спелости картофеля и продолжительность вегетационного периода. У раннеспелых сортов он более короткий и они, как правило, имеют более высокие показатели поглоще-

ния питательных веществ. Для средне- и позднеспелых сортов нормы внесения питательных веществ должны быть на 20-30% ниже, чем для раннеспелых. Для картофеля наиболее пригодны легкие и средние суглинки, супеси, влагообеспеченные черноземы, серые лесные почвы и окультуренные торфяники. Влияет и низкая температура почвы. В начале вегетационного периода она уменьшает поглощение питательных веществ, что особенно значимо для фосфора. Высокая же температура почвы увеличивает потребность растений в питательных веществах и минерализацию азота. Однако при температуре почвы 29°C и более рост корневой системы и клубней приостанавливается.

Потенциальное плодородие почвы обуславливается запасами гумуса, в котором на долю азота приходится от 1,5 до 5%. Валовой запас азота в черноземах от 6 до 15 т/га. На долю подвижных азотистых соединений, таких, как нитраты и аммиак, которыми растения преимущественно питаются, приходится 1-2% от общего запаса азота в почве. Даже в богатых органическими веществами черноземах его доступное количество достигает лишь 200 кг/га пахотного слоя. Кроме того, необходимо учитывать процессы, способствующие снижению доступности азота для растений: вымывание с промывными водами, денитрификация, вынос растениями и закрепление азота в виде органического вещества – иммобилизация. Около 60% сезонной потребности в азоте растения поглощают в течение первых 60-75 дней после посадки. Следовательно, в начале сезона они должны быть обеспечены достаточным количеством азота, чтобы развить необходимый объем зеленой массы.

В то же время высокие дозы азотных удобрений при несбалансированном применении приводят к увеличению массы ботвы в ущерб массе клубней, оводненности их тканей, часто к дуплистости, концентрации нитратов, редуцирующих сахаров, а также к росту числа больных растений в потомстве. Это объясняется, прежде всего, характером действия азотного удобрения на рост и развитие растений картофеля. Известно, что при внесении высоких доз азота замедляется созревание растений, увеличивается прирост надземной массы и, тем самым, создаются благоприятные условия для контактных вирусов. Повышенные дозы азота способствуют ослаблению кутикулярного покрова листьев, что улучшает условия для питания тлей.

Азотные удобрения также влияют на степень проявления вирусных болезней. Растения на высоком азотном фоне часто маскируют внешние симптомы заболевания и также снижают урожай.

Любая почва способна поглощать и удерживать разнообразные вещества, приходящие с ней в соприкосновение. Важнейшую роль в этом процессе выполняет почвенный поглощающий комплекс (ППК). Ёмкость катионного обмена (ЕКО) является одной из основных характеристик почвенного поглощающего комплекса (ППК), чем выше количество ППК, тем больше удобрений задерживается в почве. По К.К. Гедройцу, емкость поглощения определяется как сумма всех обменных катионов, которые можно вытеснить из данной почвы. На свойства почвы и условия произрастания растений кроме обеспеченности элементами питания большое влияние оказывает состав обменных катионов, входящих в ППК. Емкость поглощения катионов почвой, или емкость поглощения, или емкость катионного обмена (ЕКО), – максимальное количество катионов, которые могут быть обменно поглощены почвой. Ёмкость поглощения выражают в миллимолях на 100 г почвы. В их составе всех почв присутствуют Ca^{2+} , Mg^{2+} и в небольших количествах K^{+} и NH_4^{+} . В черноземных почвах в составе обменных катионов доминируют Ca^{2+} и Mg^{2+} и отмечается высокая емкость поглощения. Этот показатель (ЕКО) указывает на то, какое количество питательных элементов из удобрений могут быть закреплены почвой. Все внесенное вне этого показателя будет вымываться и теряться. Этот показатель (ЕКО) зависит от гранулометрического состава почвы, чем она тяжелее, тем он выше, содержание органических веществ, тут тоже прямая зависимость, pH почвы, чем он выше, тем лучше показатель ЕКО.

Выделяют категории поглощающей способности почв по величине ЕКО: очень низкая ($\text{ЕКО} < 10$ мг-экв/100 г); низкая ($\text{ЕКО} = 10-15$ мг-экв/100 г); средняя ($\text{ЕКО} = 15-30$ мг-экв/100 г); высокая ($\text{ЕКО} > 30$ мг-экв/100 г), чем выше количество ППК, тем больше удобрений задерживается в почве. Катионы обеспечивают важнейшую функцию почвы – удержание питательных элементов, да сами они могут стать едой для растений.

Емкость катионного обмена на опытных полях меняется от средней до высокой. Поглощающая способность почв, по величине ЕКО установлена: на фоновом и фон+ФГ2 т/га – средняя, фоновых участках+ФГ 4, 6 т/га и 8 т/га – высокая (табл. 3.1.15).

К важной характеристике ППК относится степень насыщенности основаниями – суммарное количество обменных катионов Ca^{2+} и Mg^{2+} , выраженное в процентах от емкости поглощения. Кальций изменяет структуру почвы, отвечает за его плодородие. Достаточное содержание микроэлемента приводит к образованию почвенных коллоидов, скреплению пылеватых частиц глины. Мелкокомковатая структура гарантирует хорошие параметры водопроницаемости, аэрации грунтов. Также кальций неразрывно связан с биоактивностью почв. Он ускоряет процессы разложения органических веществ, активизирует окисление, способствует переводу сложно растворимых соединений фосфора и калия в подвижные структуры.

Таблица 3.1.15 – Физико-химические свойства почвы при выращивании картофеля

№	Вариант опыта	Обменные формы, ммоль/100 г почвы		Подвижная сера мг/кг	Плотный остаток водной вытяжки, %	Электропроводность, мСМ/см	Обменный натрий, ммоль /100 гр. почвы
		Ca^{2+}	Mg^{2+}				
1	N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	18,8	2,8	24,0	0,08	0,3	0,32
2	+ ФГ 2 т/га	18,8	2,8	42,0	0,12	0,1	0,33
3	+ ФГ 4 т/га	15,1	2,7	77,0	0,14	0,3	0,34
4	+ ФГ 6 т/га	18,3	2,6	117,0	0,30	0,7	0,26
5	+ ФГ 8 т/га	20,5	2,1	125,0	0,35	0,8	0,28

Это приводит к усилению активности бактерий и повышению качества питания растений. Ca^{2+} – считается катионом хранителем плодородия в связи с его многогранной значимостью. Он присутствует во всех без исключения почвах, но в разных количествах и в разных соотношениях с другими катионами. Оптимум его содержания – 80-90% от ЕКО. Mg^{2+} – магний всегда сопровождает кальций. Типичное соотношение $\text{Ca}^{2+} : \text{Mg}^{2+} = 5:1$. В таких количествах его действие аналогично действию кальция. Экологическая дисгармония почвенной среды может возникать в щелочных почвах при повышении количества магния в ППК за счет снижения содержания Ca^{2+} , т.е. при изменении соотношения Ca: Mg в сторону магния. В этом

случае сам магний вызывает повышение щелочности в связи с присутствием в почвенной среде карбонатов и бикарбонатов магния (табл. 3.1.16).

Таблица 3.1.16 – Соотношение микроэлементов Ca:Mg в почве, 2024 г.

№	Вариант опыта	ЕКО мг-экв/ 100 г почвы	% сод. Ca+Mg от ЕКО	Ca ²⁺ ммоль/ 100г почвы	Mg ²⁺ ммоль/ 100г почвы	Ca:Mg
1	N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	26,0	83	18,8	2,8	7:1
2	+ ФГ 2 т/га	30,0	72	18,8	2,8	7:1
3	+ ФГ 4 т/га	46,0	39	15,1	2,7	6:1
4	+ ФГ 6 т/га	36,0	58	18,3	2,6	7:1
5	+ ФГ 8 т/га	38,0	59	20,5	2,1	10:1

Содержание суммы кальция и магния от ЕКО во всех вариантах исследования ниже оптимума, с колебанием от 39 % в варианте опыта фон + ФГ 4 т/га до 72% в варианте опыта фон +ФГ 2 т/г, при этом выше оптимума только на фоновом участке. По группировке почв по содержанию кальция в почве относятся к 5 группе – высокое, по содержанию магния к 4 группе – повышенное. По содержанию кальция высокое установлено на фоновом и в вариантах опыта фон+ФГ 2 т/га, 4 т/га, 6 т/га (15,1-18,8 ммоль/100 г), однако в варианте опыта фон+ФГ 8 т/га – очень высокое (20,5 ммоль/100 г).

По содержанию магния на фоновом и на всех опытных участках – повышенное (2,1-2,8 ммоль/100 г). Близко к типичному соотношение Ca²⁺:Mg²⁺=5:1 отмечено с закладкой опытов Фон+ФГ 4 т/га, на остальных опытных участках фон +ФГ 2,6 т/га и фоне соотношение 7:1 и только на участке с опытом фон+ФГ 8 т/га соотношение составляет 10:1 (табл. 3.1.16).

Сера является важнейшим элементом, наряду с азотом, фосфором и калием, для питания растений, их развития, формирования дополнительных урожаев и улучшения качества продукции многих культур. Серу за своим многогранным значением невозможно заменить другими элементами минерального питания. Исследования показывают, что этот элемент оказывает значительное влияние на удельный вес, сухое вещество, содержание сахара и крахмала, а также на размер

клубней. Также оно включается в состав сложных удобрений. Дефицит серы в почвах или недостаточное применение серосодержащих удобрений под картофель являются одними из основных причин его вырождения. По уровню потребности в сере все культуры можно разделить на три группы: высоко требовательные, среднетребовательные и малотребовательные. Наши культуры в севообороте относятся к среднетребовательным к средам культурам (15-20 кг/га). Общее содержание серы в почве колеблется от 0,001 до 0,5%. Содержание серы на опытных участках находится в прямой зависимости от внесенного в почву фосфогипса, где его содержание колеблется от 38,0 мг/кг до 102,0 мг/кг почвы.

Механизм повышения урожая клубней и их качества состоит в том, что этот элемент способствует лучшему поступлению из почвы и удобрений N, P, K и других элементов. Поступление серы в почву происходит из 3-х основных источников: выветривание минералов, атмосферное осаждение и разложение органических веществ (растительных остатков и гумуса). В почве сера находится в 2-х формах – органической и неорганической. Большая часть серы в почве состоит из органических фракций (до 98%). Чтобы растение хорошо росло и развивалось, необходимо обеспечить оптимальное соотношение микроэлементов (табл. 3.1.17).

Таблица 3.1.17 – Потребность культур в сере и оптимальное соотношение N:S

Культура	Потребность растений в сере, кг/га	Оптимальное соотношение N:S
Картофель	15-20	10:1
Лук	20-30	5:1
Соя	25-35	5-8:1

Растения усваивают серу в виде сульфат-ионов, поглощение которых начинается в зоне корневых волосков. Содержание серы в вегетативных органах (соломе, ботве) обычно выше, чем в репродуктивных (зерне, корнях и клубнях). Содержание подвижных форм серы в почве: на фоне (24,0 мг/кг) – среднее, в вариантах опыта ФГ 2 т/га, 4 т/га (42-77 мг/га) – высокое и очень высокое содержание подвижной серы установлено в вариантах опыта ФГ 6 т/га и 8 т/га.

Концентрация доступной серы в среднем выше фонового значения, при сочетании с внесением различных доз фосфогипса на – 36-76%. Наименьшее содержание подвижной серы в почве на фоновом участке 24 мг/кг почвы, наибольшее на опытном участке фон+ФГ 8 т/га в количестве 102 мг/кг. Внесение фосфогипса существенно влияет на содержание серы подвижной в почве, которое полностью обеспечивает сельскохозяйственные культуры на опытных участках (табл. 3.1.17).

Количество общей и неорганической серы в биомассе, а также отношение содержания в ней азота к сере являются диагностическими признаками условий серного питания растений. Растительные протеины обычно содержат 1% серы и 17% азота. Если отношение азота к сере выше 17%, то образование белка задерживается, так как аккумулируются не протеиновые соединения и растение испытывает недостаток серы. Азот – сера должны соотноситься в пропорции 10:1, то есть на 10 кг азота мы обязательно должны дать 1 кг серы.

Полученные расчеты по соотношению азота и серы показали, что на фоновом участке данное соотношение не соблюдается получен отрицательный баланс, оптимальное соотношение N:S (10:1) выявлено только в варианте опыта 4 т/га, в вариантах опыта ФГ 2 т/га, 6 т/га соотношение ниже оптимального (4-9:1), в варианте опыта ФГ 8 т/га (14:1) выше оптимального, однако не критичное и не превышает 17:1 при котором задерживается образование белка и растения испытывают недостаток серы (табл. 3.1.17).

Плодородие орошаемой почвы в значительной мере зависит от ее водно-солевого режима. Содержание водорастворимых солей в почвах может являться лимитирующим фактором их использования в сельскохозяйственном производстве. По данным водной вытяжки можно оценить общее количество водорастворимых солей, аккумулирующихся в пределах любого почвенного горизонта или части почвенного профиля, то есть найти их степень засоления. Для этого используют величину сухого остатка и группировку почв по степени засоления [9].

Показателем засоленности почв служит значение сухого остатка водной вытяжки (табл. 3.1.18), а также сумма токсичных солей. Отмечается сезонная миграция их в корнеобитаемом слое. Количество солей уменьшается в холодную пору, когда усиливается их вынос вместе с током воды, и увеличивается в летние месяцы, за счет влаги, поднимающейся к испаряющей поверхности. Регулярное поступление оросительной воды снижает концентрацию почвенного раствора, способствуя тем самым растворению минеральных веществ.

Таблица 3.1.18 – Результаты почвенной водной вытяжки участков

№ п.п	Вариант опыта	Плотный остаток, %	Содержание, ммоль/100 г							
			SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	K ⁺	Na ⁺
1	N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	0,08	0,7	0,32	0,8	0,7	1,42	0,71	0,03	0,18
2	+ ФГ 2 т/га	0,12	0,4	0,41	0,7	0,5	1,0	0,50	0,30	0,14
3	+ ФГ 4 т/га	0,14	1,2	0,33	0,9	0,8	0,75	0,38	0,30	0,17
4	+ ФГ 6 т/га	0,30	6,5	0,35	3,4	0,9	1,15	0,48	0,50	0,15
5	+ ФГ 8 т/га	0,35	8,7	0,30	6,2	1,0	0,86	0,42	0,40	0,16

Степень и химизм засоления почвы устанавливаются на основании содержания токсичных ионов. Количество и состав токсичных солей чаще всего определяют путем связывания ионов в гипотетические соли.

Прежде чем установить степень засоления почвы, нужно определить тип засоления. Для этого находятся величины отношений доминирующих анионов, в данном случае Cl⁻ и SO₄²⁻. Согласно классификации почв по химизму засоления лежат принципы, предложенные В. А. Ковдой, где тип (химизм) засоления определяется как по анионному составу солей, так и по катионному. Во всех вариантах опыта согласно критериям: величина pH < 8,5, соотношение общей щелочности и суммы Ca²⁺+Mg²⁺ и доля общей щелочности < 20% от суммы анионов произошло засоление нейтральными солями. В названии химизма (типа) засоления преобладающий ион ставят на последнее место.

В таблице 3.2.19 приведен химизм засолений по анионному составу с отношением Cl⁻/SO₄²⁻ на опытных участках варьирует от хлоридно-сульфатного на фоновом и в варианте опыта ФГ 4 т/га, сульфатно-хлоридного в варианте ФГ 2 т/га до сульфатного в вариантах ФГ 6 т/га и 8 т/га в «с участием соды».

Таблица 3.1.19 – Химизм засоления по анионному составу участков почв выращивания картофеля

№ п.п	Вариант опыта	рН вод.	Плотный остаток, %	Отношение ммоль, анионов			Электропроводность, мСМ/см	Химизм (тип) засоления
				$\frac{\text{Cl}^-}{\text{SO}_4^{2-}}$	$\frac{\text{HCO}_3^-}{\text{Cl}^-}$	$\frac{\text{HCO}_3^-}{\text{SO}_4^{2-}}$		
1	N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	8,0	0,08	0,2-1,0	Более 2	Более 1	0,30	Слабозасоленное хлоридно-сульфатное «с участием соды»
2	+ФГ 2 т/га	7,1	0,12	Более 1	Более 1	Более 1	0,10	Слабозасоленное сульфатно-хлоридный «с участием соды»
3	+ФГ 4 т/га	7,0	0,14	0,2-1,0	Более 1	Менее 1	0,30	Слабозасоленное хлоридно-сульфатное «с участием соды»
4	+ФГ 6 т/га	7,4	0,30	Менее 0,2	Более 1	Менее 1	0,70	Среднезасоленное сульфатное «с участием соды»
5	+ФГ 8 т/га	7,1	0,35	Менее 0,2	Более 1	Менее 1	0,80	Среднезасоленное сульфатное «с участием соды»

Примечание: * ионы CO_3^{2-} - менее 20 % суммы мг-экв. анионов, но более 0,03 мг-экв. на 100 г почвы, засоление определяется по соотношению преобладающих ионов с добавлением в название «с участием соды».

Содержание ионы CO_3^{2-} во всех вариантах более 0,03 ммоль/100 г который является критерием при включении в название «с участием соды». Относительно катионного состава все варианты опыта включая фоновый характеризуются магни-ево-кальциевым типом засоления.

При агрономической оценке засоленных почв важнейшее значение приобретает учет качественного состава солей, которые подразделяются на токсичные и нетоксичные. Степень и химизм засоления почвы устанавливаются на основании содержания токсичных ионов. Количество и состав токсичных солей чаще всего определяют путем связывания ионов в гипотетические соли.

Предельное количество солей в почве, выше которого начинается угнетение роста и развития средне солеустойчивых растений называется *порогом токсичности*. Для отдельных ионов приняты следующие пороги токсичности: %/мг-экв. на 100 г почвы: CO_3^{2-} - 0,001/0,03; HCO_3^{2-} - 0,06/0,8; Cl^- - 0,01/0,3; SO_4^{2-} - 0,08/1,7. Метод расчета токсичных и нетоксичных солей основан на связывании ионов в определенной последовательности в гипотетические соли, начиная с менее растворимых солей к более растворимым [3]. Произведенный расчет токсичности солей установили: что по содержанию CO_3^{2-} и Cl^- превышен порог токсичности во всех вариантах опыта включая фон; по содержанию SO_4^{2-} превышен порог токсичности в вариантах опыта ФГ 6 т/га и 8 т/га; по содержанию HCO_3^- – нет превышения порога токсичности.

Степень засоления почв определена по оценке «суммарного эффекта» влияния токсичных ионов. В этом случае не учитывается тип засоления почвы, и используются данные только по содержанию токсичных анионов исходя из следующих соотношений: $1 \text{ Cl}^- = 0,1 \text{ CO}_3^{2-} = (2,5-3,0) \text{ HCO}_3^- = (5,0-6,0) \text{ SO}_4^{2-}$. Ионы обладают разной степенью токсичности, но «суммарный эффект» токсичных ионов принято выражать в эквивалентах хлора. Исходя из приведенного равенства следует, что 1 мг-экв Cl^- в 10 раз менее токсичен для растений чем 1 мг-экв CO_3^{2-} и наоборот, в 2,5-3 раза более токсичен чем ион HCO_3^- и в 5-6 раз токсичнее, чем ион SO_4^{2-} . Степень засоления с учетом «суммарного эффекта» (СЭ) токсичных ионов

определена по классификатору Н. И. Базилевича [3]. При оценке степени засоления по «суммарному эффекту» принимают, что все ионы CO_3^{2-} и Cl^- относятся к токсичным. Согласно равенству «суммарный эффект» (СЭ) токсичных ионов в мг-экв. изменяется на фоне и вариантах опыта ФГ 2 т/га, 4 т/га от 0,69 мг-экв. до 0,78 мг-экв. которые классифицируются как слабозасоленные, в вариантах опыта ФГ 6 т/га и 8 т/га где «суммарный эффект» составляет 1,84 мг-экв. и 2,21 мг-экв., соответственно, относятся к средnezасоленным.

3.2. Обменная и гидролитическая кислотность почвы опытного участка

Реакция среды в почве – один из основных показателей уровня плодородия почв для большинства сельскохозяйственных культур, так как она является своего рода интегральным показателем целого комплекса свойств почвы, от которого зависит формирование урожая: содержание доступных для растений форм азота, фосфора, калия, многих микроэлементов, в том числе такого важного, как молибден; подвижность алюминия, избыточное количество которого может оказывать большее отрицательное действие на растения, чем ионы водорода; количественный и качественный состав микробного сообщества, продукты метаболизма которого существенно влияют на продуктивность растений.

Рост и развитие растений зависят от соотношения в почве ионов водорода (H^+) и гидроксида (OH^-), т.е. от реакции почвенной среды. Если преобладают ионы водорода – почва кислая, ионы гидроксила – щелочная. Неблагоприятными для растений являются как сильнокислые, так и щелочные почвы. Кисотно-основное состояние обуславливает многие особенности поведения элементов в почве, с ним связаны режимы органического вещества и элементов минерального питания, подвижность соединений. Реакция почвенного раствора оказывает и прямое действие на культуры. Актуальная кислотность почвы ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$) – величина неустойчивая, сильно изменяющаяся в течение вегетационного периода, поэтому наиболее целесообразно определять, так и $\text{pH}_{\text{сол. (KCl)}}$. По полученным результатам исследования образцов почв установлено соотношение $\text{pH}_{\text{водн.}} > \text{pH}_{\text{сол.}}$, такое соотношение

указывает, что почва обладает обменной кислотностью. Различают следующие виды кислотности:

Актualityная кислотность – это рН почвенного раствора ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$) – обусловленная свободными ионами водорода минеральных и органических кислот.

Потенциальная кислотность (Скрытая) – кислотность, обусловленная наличием катионов H^+ или Al^{3+} в ППК. Потенциальная кислотность подразделяется на обменную и гидролитическую. *Обменная кислотность* – ионы H^+ Al^{3+} в поглощенном состоянии. (Актualityная + Обменная) – рН сол.

Актualityная кислотность почвы ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$) – величина неустойчивая, сильно изменяющаяся в течение вегетационного периода, поэтому наиболее целесообразно определять, как рН H_2O , так и рН сол. (KCL).

Если почва обладает обменной кислотностью, то $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}} > \text{pH}_{\text{сол}}$

Если почва не обладает обменной кислотностью, то $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}} \approx \text{pH}_{\text{сол}}$

Картофель предпочитает слабокислую почву. Культура хорошо адаптируется к разным значениям рН, но оптимальный диапазон для её роста и развития – 5,5-6,5. При отклонении рН от оптимального диапазона у картофеля могут возникать проблемы:

При рН менее 4,5 – сильное угнетение роста, хлороз листьев. Требуется срочное раскисление почвы.

При рН 4,5-5,0 – замедленный рост, снижение урожайности. Необходимо регулярное внесение извести.

При рН более 7,0 – затруднённое усвоение микроэлементов. Нужна кислотная коррекция.

При рассмотрении динамики изменения рН в зависимости от дозы внесения фосфогипса необходимо учесть, что исследуемые участки расположены при условии орошения поэтому большую роль играет качество поливной воды.

Поливные воды характеризуются бикарбонатной щелочностью с содержанием гидрокарбонатов 159 мг/дм^3 (табл. 3.2.1)

Таблица 3.2.1. – Физико-химические свойства поливной воды

Показатель												
Карбонаты, мг/дм ³	Гидрокарбонаты, мг/дм ³	Общая жесткость, ж	Водородный показатель, рН	Железо, мг/дм ³	Кальций, мг/дм ³	Магний, мг/дм ³	Нитрат-ион, мг/дм ³	Нитрит – ион, мг/дм ³	Сухой остаток, мг/дм ³	Сульфат-ионы, мг/дм ³	Фосфат-ион, мг/дм ³	Хлорид-ионы, мг/дм ³
26	159	4,0	8,2	0,32	64	10	0,74	0,038	316	60	<0,05	36

По уровню рН поливная вода среднещелочная – рН 8,2, данный показатель для выращивания сельскохозяйственных культур выше оптимума, по жесткости – средняя. Общая минерализация (общее содержание солей) 3,16 г/л и относится к IV классу опасности данный класс оросительной воды оказывает неблагоприятное влияние на плодородие почв, урожайность и качество сельскохозяйственной продукции, снижает урожайность культур слабой и средней солеустойчивости до 20-50%. Требуется мелиорация почв и воды или использование воды для орошения солеустойчивых культур на легких, песчаных почвах с предварительным обоснованием и оценкой эколого-экономического ущерба.

По степени опасности засоления почвы относится к IV₂ классу или условно пригодная на песках для культур средней и сильной солеустойчивости (определяется по соотношению Cl^-/SO_4^{2-} , где данный показатель составляет 0,6).

Оценка оросительной воды по опасности магниевое осланцевания и содообразования почв относится к безопасному I классу (определяется соотношением Mg/Ca (10/64) и составила 0,16).

Оценка оросительной воды по токсичности отдельных ионов, рекомендованных ФАО, предлагается учитывать содержание в водах ионов натрия, хлора, бора, нитратов, общую щелочность (HCO_3^-) и рН. Результаты исследования показали, что некоторые ионы по токсичности для сельскохозяйственных культур качество

воды характеризуется: хлорид –ион составляет 36мг/дм³ или 1,01мг-экв/л и нитрат-ион <0,2 мг/дм³ или 0,01мг-экв. /л – хорошее при любом поливе, по содержанию железа превышение не наблюдается; бикарбонат – иона составляет 159 мг/дм³ или 2,61 мг-экв/л – среднее.

Полученные результаты указывают на повышенную щелочность водной среды. При этом, необходимо учесть тот факт, что фосфогипс характеризуется кислой реакцией среды (рН 4,5-5). Попадая в почву фосфогипс как правило подкисляет ее, но в условиях орошения, где поливная вода щелочная, фосфогипс в первую очередь взаимодействует с водой снижая ее щелочность и только потом оказывает влияние на почву. Орошение полей после внесения фосфогипса следует выполнять по промывному типу: оросительные нормы для конкретных почвенно-климатических условий, рассчитываемые по дефициту почвенной влаги. Фосфогипс от компании «ФосАгро» – это побочный продукт производства фосфорной кислоты, который безопасен для окружающей среды. Он оптимизирует кислотность рН в первый год применения на 0,4-0,6 единиц блокирует фитотоксичность алюминия и железа, связывая эти ионы в нерастворимые соединения. Кроме того, улучшает структуру грунта и активизирует почвенную биоту.

Актуальная кислотность изменяется от средне щелочной на фоновом участке (рН 8,0) с уменьшением щелочности в вариантах опыта фон+ФГ 2 т/га, 4 т/га, 8 т/га до нейтральной рН 7,0-7,1 и в варианте ФГ 6 т/га – слабощелочной рН 7,4. Обменная кислотность варьирует от нейтральной рН 7,0-7,1 в вариантах опыта ФГ 2 т/га, 4 т/га, 8 т/га до слабощелочной на фоне и в варианте опыта ФГ 6 т/га (табл. 3.1.1).

3.3. Агрофизические свойства почв

Агрофизические свойства почвы (структура, плотность, пористость) играют важную роль в земледелии, так как определяют условия жизни растений и почвенных микроорганизмов.

При оценке агрофизических свойств исследования проводились на 2-х почвенных разностях различного механического состава черноземов обыкновенных малогумусных: поле 21-1 тяжелосуглинистый и поле 21-15 – среднесуглинистый.

Под структурой почвы понимают совокупность агрегатов или структурных отдельностей различной величины, формы, пористости, механической прочности и водопрочности. Агрегаты диаметром больше 0,25 мм называют макроагрегатами, мельче 0,25 мм – микроагрегатами и более 10 мм – макроагрегаты. Размер мезоагрегатов (10-0,25 мм) наиболее оптимален для равномерной их упаковки, обеспечивающий не только сохранение влаги, но и почвенного воздуха. Почвенные мезоагрегаты должны быть прочными не только против механических воздействий, но и против воздействия воды, поэтому принято в почвоведении называть их водопрочными. При оценке почвенной структуры необходимо учитывать, что это не только один из основных морфолого-генетических признаков почвы, но и важнейший показатель ее агрофизического состояния. Как морфологический признак структура любой формы и размера может быть хорошей или хорошо выраженной (комковато-зернистая, листоватая, столбчатая и т.д.), но не всегда представлять ценность с агрономической точки зрения.

В таблице 3.3.1. представлены результаты структурного состояния опытных участков.

Таблица 3.3.1 – Почвенные агрегаты на опытных участках выращивания картофеля, 2021-2024 гг.

Вариант опыта	Масса макроагрегатов, > 10 мм, г / %	Масса мезоагрегатов 0,25-10мм, г / %	Масса микроагрегатов, < 0,25 мм, г / %
Поле 21-1 тяжелосуглинистая			
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	85,5/34,2	160,8/64,3	3,7/1,5
+ФГ 2 т/га	81,7/33,7	165,5/63,5	2,8/1,1
+ФГ 4 т/га	69,1/27,6	178,2/71,3	2,7/1,1
+ФГ 6 т/га	67,1/26,8	180,2/72,1	2,7/1,1
+ФГ 8 т/га	64,7/25,9	182,8/73,1	2,5/1,0
Поле 21-15 среднесуглинистая			
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	82,8/33,1	164,0/65,6	3,2/1,3
+ФГ 2 т/га	78,9/31,6	168,5/67,4	2,6/1,0
+ФГ 4 т/га	67,2/26,9	180,5/72,1	2,6/1,0
+ФГ 6 т/га	65,4/26,2	182,2/72,9	2,4/0,9
+ФГ 8т/га	63,8/25,5	183,8/72,6	2,4/0,9

Примечание: в числителе содержание агрегатов в г.; в знаменателе – в %.

Полученные результаты исследований показали, что во всех вариантах опыта, включая фоновые участки в структурной группе, в процентном отношении преобладают мезоагрегаты с размером частиц 0,25-10 мм – агрономически ценная структура. Увеличение содержания данных почвенных частиц находится в прямой зависимости от варианта опыта, где с увеличением дозы внесения фосфогипса увеличивается процентное (%) содержание частиц агрономически ценной структуры с изменением от 64,3-65,6 % на фоновом участке до 73,1-72,6% в вариантах опыта ФГ 2,0 т/га, 4 т/га, 6 т/га и 8 т/га, такое содержание оценивается как хорошее (табл. 3.3.2).

Кроме размера, агрономическая ценность структуры определяется связностью (механической прочностью), водопрочностью и пористостью агрегатов. Агрономически ценной является комковато-зернистая структура с размером агрегатов от 0,25 до 10 мм, обладающих пористостью и водопрочностью. Такая структура обуславливает наиболее благоприятный водно-воздушный режим почвы. Водопрочными называются агрегаты, которые противостоят размывающему действию воды. В условиях орошения этот показатель играет важную роль, так как черноземы уплотняются, теряют в пахотном слое агрономически ценную структуру, одновременно усиливаются минерализация гумуса и вымывание кальция. Водопрочности зависит от качества материала, склеивающего механические элементы. Чаще всего такими коагулянтами являются катионы Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{3+} , Al^{3+} . При наличии одновалентных катионов Na^+ , необратимой коагуляции не происходит и прочной структуры не образуется. На исследуемых участках таким коагулятором является фосфогипс который содержит катионы Ca^{2+} и Mg^{2+} , а также отсутствие катионов Na^+ . Наиболее водопрочная структура образуется также при взаимодействии гуминовых кислот с минералами монтмориллонитовой группы гидрослюдами и менее водопрочная при взаимодействии с кварцем, кремнекислотой и каолинитом.

В таблице 3.3.2. приводятся данные по оценке структурного состояния сухого просеивания и водопрочности агрегатов 0,25-10 мм (агрономически ценных структур). Оценка водопрочности агрегатов приводится по шкале С. И. Долгова и П. У. Бахтина. Неудовлетворительная структура по водопрочности выявлена на фоновом участке и при внесении 2 т/га фосфогипса, и удовлетворительное состояние в вариантах опыта ФГ 4 т/га, 6 т/га, 8 т/га (табл. 3.3.2).

Таблица 3.3.2 – Оценка структурного состояния почвы на опытных участках выращивания картофеля

Вариант опыта	Содержание агрегатов 0,25-10 мм (в % от массы воздушно-сухой почвы)			
	Сухое просеивание (макроагрегаты)		Мокрое просеивание (водопрочность)	
	Содержание агрегатов 0,25-10мм, %	Оценка структурного состояния	Содержание агрегатов 0,25-10 мм, %	Оценка структурного состояния
Поле 21-1 тяжелосуглинистая				
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	64,3	хорошее	28,0	неудовлетворительное
+ФГ 2 т/га	63,5	хорошее	40,1	удовлетворительное
+ФГ 4 т/га	71,3	хорошее	42,1	удовлетворительное
+ФГ 6 т/га	72,1	хорошее	44,3	удовлетворительное
+ФГ 8 т/га	73,1	хорошее	44,8	удовлетворительное
Поле 21-15 среднесуглинистая				
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	65,6	хорошее	30,2	неудовлетворительное
+ФГ 2 т/га	67,4	хорошее	39,5	неудовлетворительное
+ФГ 4 т/га	72,1	хорошее	43,0	удовлетворительное
+ФГ 6 т/га	72,9	хорошее	44,9	удовлетворительное
+ФГ 8 т/га	73,5	хорошее	45,0	удовлетворительное

Для оценки достоинств (качества) агрономической структурности почв введено понятие коэффициента структурности (К). Он выражается как отношение количества мезоагрегатов к сумме макро- и микроагрегатов (табл. 3.3.3).

Таблица 3.3.3 – Оценка качества структуры почв на опытных участках выращивания картофеля, 2021-2024 гг.

Вариант опыта	Количество мезоагрегатов, %	Сумма микро- и макроагрегатов, %	К (структурности)	Оценка качества структуры
Поле 21-1 тяжелосуглинистая				
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	64,3	35,7	1,80	хорошая
+ФГ 2 т/га	63,5	34,8	1,82	хорошая
+ФГ 4 т/га	71,3	28,7	2,48	хорошая
+ФГ 6 т/га	72,1	27,9	2,56	хорошая
+ФГ 8 т/га	73,1	26,9	2,72	хорошая
Поле 21-15 среднесуглинистая				
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	65,6	34,4	1,90	хорошая
+ФГ 2 т/га	67,4	32,6	2,07	хорошая
+ФГ 4 т/га	72,1	27,9	2,58	хорошая
+ФГ 6 т/га	72,9	27,1	2,68	хорошая
+ФГ 8 т/га	73,5	26,4	2,78	хорошая

Примечание: * фон =N₁₅₀P₁₅₀K₃₀₀

Общая оценка качества структуры, во всех вариантах опыта включая фоновые участки, характеризуется как хорошая, однако, чем больше коэффициент структурности, тем лучше структура почвы по качеству. Качество структуры находится в прямой зависимости от варианта опыта. С увеличением внесения дозы фосфогипса происходит улучшение качественной характеристики структуры.

3.4. Физические свойства минеральной части почвы

В поставленных опытах рассмотрена характеристика физических свойств почв относительно плотности сложения почвы, плотности твердой фазы и пористости. Величина плотности выражается в г/см^3 .

Плотность сложения почвы – масса единицы объема абсолютно сухой почвы, взятой в естественном сложении (со всеми порами), плотность твердой фазы – масса сухой почвы в единице объема твердой фазы почвы без пор, пористость – процентное отношение объема пор к объему почвы.

Плотность почвы определялась как в полевых условиях, так и в лабораторных исследованиях. В полевых условиях отбор производился методом режущего кольца, который применяется для взятия проб на плотность из монолитов связанных почв. Пробы берутся стальным кольцом диаметром 50-70 мм и высотой 20-30 мм при толщине стенок 1,5-2 мм. в 3-х кратной повторности. Плотность сложения почвы – не основной, но довольно важный показатель, характеризующий ее плодородие. От нее зависят водные, воздушные и тепловые свойства, развитие корневых систем растений, интенсивность микробиологических процессов, а в конечном итоге – урожайность сельскохозяйственных культур. Плотность почвы зависит от механического состава, содержания органического вещества и структурного состояния почвы. Знание плотности почвы позволяет высчитывать запасы воды, питательных веществ в пахотном или любом другом горизонте почвы.

С уплотнением суглинистых и глинистых почв уменьшается общая пористость и объем пор аэрации, увеличивается объем неактивных пор, в которых вода

практически недоступна растениям, снижается скорость фильтрации, затрудняется распространение корней.

Плотность твердой фазы почвы определяют из образца почвы с нарушенной структурой (растертой в порошок и просеянной через сито 1 мм) пикнометрическим способом. Величина плотности твердой фазы зависит от минералогического и химического составов минеральных частиц, в наших опытах в минералогическую часть почвы входит гипс с плотностью 2,30-2,35 г/см³ который повышает плотность твердой фазы. Чем больше гумуса содержит почва, тем меньше плотность твердой фазы и на оборот.

В таблице 3.4.1. представлены результаты исследований участков в разрезе по вариантам опыта и дана характеристика растительных свойств почв по плотности почв с оценкой результатов общей пористости по шкале Н. А. Качинского для суглинистых и глинистых почв) полученных расчетным путем. В изменении плотности твердой фазы прослеживается некоторая закономерность по вариантам опыта, где с повышением количества вносимого фосфогипса 2 т/га, 4 т/га, 6 т/га и 8 т/га происходит увеличение плотности твердой фазы от 2,4 г/см³ на фоне до 3,1 г/см³ ФГ 8 т/га при условии, что содержание органического вещества оставалось неизменным, отсюда на плотность влияет количество вносимого фосфогипса.

Плотность почвы для большинства возделываемых культур по шкале А. Г. Бондарева (1985) для глинистых и суглинистых почв оптимальный показатель составляет 1,00-1,30. Полученные результаты указывают на превышение оптимальных показателей в вариантах опыта ФГ 2 т/га, 6 т/га, 8 т/га и на фоновом участке которая изменяется от 1,36 г/см³ до 1,54 г/см³, оптимальный показатель только в варианте опыта ФГ 4 т/га (1,24-1,30 т/га) (табл. 3.4.1).

Произведенный расчет общей пористости почвы показал, что пористость находится в прямой зависимости от плотности почвы.

Таблица 3.4.1 – Оценка плотности почвы и общей пористости на опытных участках выращивания картофеля, 2021 – 2024 гг.

Вариант опыта	Плотность твердой фазы почвы, г/см ³	Плотность почвы, г/см ³	Степень уплотнения пашни	Характеристика растительных свойств	Общая пористость, %	Качественная оценка пористости
Поле 21-1 тяжелосуглинистая						
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	2,4	1,39	Среднеуплотнена	Влияние на корневые системы незначительные	37	Чрезмерно низкая
+ФГ 2 т/га	2,3	1,36	Среднеуплотнена	Влияние на корневые системы незначительные	41	Чрезмерно низкая
+ФГ 4 т/га	2,8	1,24	уплотнена	Влияние на корневые системы незначительные	56	Отличная
+ФГ 6 т/га	3,3	1,46	Очень сильно уплотнена	Корневая система испытывает угнетение	56	Отличная
+ФГ 8 т/га	3,1	1,50	Очень сильно уплотнена	Корневая система испытывает угнетение	52	Удовлетворительная
Поле 21-15 среднесуглинистая						
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	2,4	1,54	Очень сильно уплотнена	Корневая система испытывает угнетение	36	Чрезмерно низкая
+ФГ 2 т/га	2,3	1,54	Очень сильно уплотнена	Корневая система испытывает угнетение	33	Чрезмерно низкая
+ФГ 4 т/га	3,6	1,30	Уплотнена	Влияние на корневые системы незначительные	64	Отличная
+ФГ 6 т/га	3,3	1,50	Очень сильно уплотнена	Корневая система испытывает угнетение	55	Удовлетворительная
+ФГ 8 т/га	3,1	1,54	Очень сильно уплотнена	Корневая система испытывает угнетение	50	Удовлетворительная

В вариантах опыта на фоне и с внесением 2 т/га фосфогипса по оценке качества пористость характеризуется на обоих участках с разным механическим составом характеризуется как чрезмерно низка и выражается в процентном отношении 33-41. Отличная качественная оценка выявлена в вариантах опыта, на тяжело-суглинистых почвах в ФГ 4 т/га и 6 т/га (56%) и на среднесуглинистых почвах только в варианте опыта ФГ 4 т/га (64%). Удовлетворительная качественная оценка пористости выявлена на тяжелосуглинистых в варианте опыта ФГ 8 т/га (52%), на среднесуглинистых в вариантах опыта ФГ 6 т/га и 8 т/га (50-55%).

В силу своих биологических особенностей каждая сельскохозяйственная культура требует оптимальной для своего развития плотности корнеобитаемого слоя: для зерновых и пропашных культур оптимальная плотность сложения составляет 1,2-1,35 г/см³; для овощных – 1,0-1,2 г/см³. У почв с небольшим содержанием гумуса плотность около 1,3-1,6 г/см³.

По-другому наблюдается картина при исследовании плотности почвы, в образцах с не нарушенной структурой, которая зависит от механического состава, содержания органического вещества и структурного состояния почвы. Четкой закономерности относительно дозы внесения фосфогипса по вариантам опыта не выявлено. Наблюдается зависимость от соотношений плотности почвы и плотности твердой фазы.

3.5. Влияние различных норм внесения мелиоранта на распространение фитопатогенов и антагонистов

При интенсивном земледелии снижаются регенеративные и биологические свойства почвы. Это зависит не только от отдельных химических или физических показателей, но и от функционирования почвенной биоты, цикличности процессов в системе «растение-почва». Смена естественного растительного покрова приводит к изменению состава почвенной биоты. Поэтому очень важно изучать не только

агрохимические процессы влияния мелиорантов, но и микробиологические процессы. Для ускорения процессов разложения органического вещества, а наших исследованиях использовались мелиоранты.

Так как предшественником для картофеля являлись сидераты с фосфогипсом, то необходимо изучить влияние мелиоранта на развитие микроорганизмов как патогенов, так и антагонистов (Табл. 3.5.1.).

Таблица 3.5.1 – Средняя концентрация антагонистов *Trichoderma sp* при внесении различных норм фосфогипса на опытных участках выращивания картофеля, КОЕ/г почвы

Вариант	Концентрация
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	1×10 ³
+ ФГ 2 т/га	4×10 ³
+ ФГ 4 т/га	4×10 ⁴
+ ФГ 6 т/га	6×10 ³
+ ФГ 8 т/га	6×10 ³

Из данных таблицы 3.5.1 можно утверждать, что внесение ФГ начиная от дозы 2 т/га способствует увеличению числа антагонистов *Trichoderma sp* в 4-40 раз, по сравнению с фоновым вариантом. Наибольшая концентрация грибов выявлена при применении 4 т/га ФГ – 4×10⁴ КОЕ/г почвы, что в 40 раз превышает фоновое значение. При внесении повышенных доз – 6-8 т/га, численность антагонистов *Trichoderma sp* снижается до 6×10³ КОЕ/г почвы, что в 6 раз больше фонового варианта. Выявлена прямая зависимость увеличения содержания антагонистов с применением фосфогипса. При этом и общее количество грибов увеличивается на контроле и фоне суммарно 10-14, а при внесении ФГ с 21-40, максимальное количество при внесении 6 т/га, что улучшает почвообразовательный процесс и как следствие питания растений. Почвенные грибы обладают ферментативным действием и представляют огромную активную поверхность, на которой с большой скоростью совершаются сложнейшие превращения органических и неорганических веществ, и при применении занятого пара данные условия являются благоприятными для почвообразующего процесса.

Количество грибов рода *Alternaria sp* при внесении 2 т/га и 8 т/га фосфогипса возросло в 8 и 2 раза, соответственно, по сравнению с фоном, а при применении 4 т/га и 6 т/га не изменилось, и составило 1×10^3 КОЕ/г почвы (табл. 3.5.2).

Таблица 3.5.2 – Влияние разных норм внесения фосфогипса на численность возбудителей болезней картофеля, КОЕ/г почвы

Вариант опыта	Болезнь/возбудитель					
	Альтерналиоз <i>Alternaria sp.</i>	Фузариоз <i>Fusarium sp.</i>	Кагатная гниль корнеплодов		Прочее	
			<i>Rhizopus sp</i>	<i>Aspergillus niger</i>		
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	1×10^3	2×10^3	3×10^3	4×10^3	4×10^3	39×10^4
+ ФГ 2 т/га	8×10^3	1×10^3	3×10^3	2×10^3	6×10^3	65×10^4
+ ФГ 4 т/га	1×10^3	1×10^3	1×10^3	1×10^3	6×10^4	70×10^4
+ ФГ 6 т/га	1×10^3	8×10^3	1×10^3	2×10^3	12×10^4	64×10^4
+ ФГ 8 т/га	2×10^3	2×10^3	1×10^3	1×10^3	16×10^4	60×10^4

Концентрация грибов *Fusarium sp.*, вызывающих фузариоз картофеля, равнялась от 1×10^3 до 8×10^3 КОЕ/г почвы. Наименьшее количество выявлено при применении ФГ в нормах 2 т/га и 4 т/га, что в 2 раза ниже фонового варианта. При внесении 6 т/га концентрация грибов увеличилась в 8 раз относительно фона.

Внесение фосфогипса способствует снижению концентрации в почве грибов, вызывающих кагатную гниль корнеплодов в 2-3 раза. Так при внесении 4-8 т/га количество *Rhizopus sp* уменьшилось в 3 раза относительно фона и составило 1×10^3 КОЕ/г почвы. При применении 2 и 6 т/га численность грибов рода *Aspergillus niger* снизилась вдвое и составила 2×10^3 КОЕ/г почвы, а при внесении 4 и 8 т/га – 1×10^3 КОЕ/г почвы, что в 4 раза меньше фонового значения.

Однако, численность прочих возбудителей болезней картофеля при внесении различных норм фосфогипса возрастает в 1,5-4 раза относительно фонового варианта.

Таким образом, наименьшее число возбудителей болезней картофеля выявлено при внесении 4 т/га ФГ. Концентрация грибов рода *Fusarium sp.*, *Rhizopus sp*

и Aspergillus niger составила 1×10^3 КОЕ/г, что в 2, 3 и 4 раза меньше, чем на фоновом варианте опыта соответственно. При этом количество грибов рода *Alternaria sp* остается неизменным. Внесение ФГ во всех нормах приводит к увеличению численности прочих возбудителей болезней картофеля в среднем в 2 раза, по сравнению с фоновым значением.

Содержание возбудителей кагатной гнили снижалось по отношению к ФОНу, так *Rhizopus sp.* на ФОНе и при внесении 2 т/га ФГ составлял 3×10^3 , а при внесении 4, 6 и 8 т/га составляло 1×10^3 кое/г почвы, что в 3 раза меньше ФОНа.

Возбудитель *Aspergillus niger* в образцах с внесением 2 и 6 т/га снижалось в 2 раза по сравнению с ФОНом, а с нормой внесения 4 и 8 т/га в четыре раза и составляло 1×10^3 кое/г почвы.

Содержание прочих микроорганизмов, не являющимися возбудителями заболеваний картофеля, увеличивалось по отношению к ФОНу: так при внесении 2 т/га увеличилось с 4×10^3 до 6×10^3 в 1,5 раза. При увеличении норм с 4-8 т/га так же и увеличилась степень с 3 до 4. Это говорит о улучшении благоприятных условий для развития микроорганизмов.

Из всего выше сказанного можно сделать вывод, что внесение ФГ ведет к снижению фитопатогенов в почве таких, как: *Alternaria sp.*, *Fusarium sp.*, *Rhizopus sp.*, *Aspergillus niger*.

3.6. Влияние разных норм применения фосфогипса на микробиологическую активность почвы

Микроорганизмы, усваивающие минеральный азот определяют на КАА, их содержание указывает на интенсивность процессов минерализации органического вещества и наличие минеральных форм азота. Соотношение численности микроорганизмов этих двух групп (КАА/МПА) дает возможность сделать выводы об интенсивности минерализационных процессов в образцах почвы (табл. 3.6.1).

Количество бактерий на МПА при внесении ФГ возрастает относительно фона на 6-33%, достигая наибольшего значения на варианте опыта ФОН + ФГ 6 т/га – 1532 тыс. КОЕ на 1 г почвы, 14-47%.

Аналогичным образом увеличивается численность микроорганизмов на ККА. При внесении ФГ увеличивается на 14-47%, при этом максимальное количество выявлено при внесении 6 т/га – 2374 тыс. КОЕ на 1 г, что в 1,5 раза выше фонового значения.

Таблица 3.6.1 – Биологические показатели почвы на посадках картофеля в почве 0-30 см, среднее 2022-2024 гг

Вариант	Численность микроорганизмов, тыс. КОЕ на 1 г почвы				K _{мин}
	Бактерии, на МПА	Микроорганизмы на КАА	Микромицеты	Общее количество микроорганизмов биогенность	
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	1155	1615	24	2794	1,40
+ФГ 2 т/га	1225	1834	42	3101	1,50
+ФГ 4 т/га	1486	1989	41	3516	1,34
+ФГ 6 т/га	1532	2374	39	3781	1,55
+ФГ 8 т/га	1486	1739	39	3264	1,17

При внесении ФГ количество микромицетов в почве увеличивается в 1,6-1,8 раз по сравнению с фоном. Наибольшая численность микромицетов вывалена при внесении 2 т/га ФГ – 42 тыс. КОЕ/г. Дальнейшее увеличение дозы ФГ несколько снижает данный показатель до 39 тыс. КОЕ/г при внесении мелиоранта в нормах 6 и 8 т/га.

Общее количество микроорганизмов в опыте составило от 2794 тыс. КОЕ/г почвы на фоне минеральных удобрений до 3781 тыс. КОЕ/г на варианте применения ФГ в норме 6 т/га, что превышает фон на 35%.

На всех вариантах опыта коэффициент минерализации был больше 1 и составил 1,17-1,55. При применении ФГ K_{мин} становится на 0,06-0,15 выше, чем на фоновом варианте. Максимальное значение отмечено при внесении фосфогипса в норме 6 т/га – 1,55, что на 0,15 больше фона. Применение повышенной нормы ФГ (8 т/га) коэффициент минерализации снижается до 1,17, что ниже фона на 0,23.

В целом, количество бактерий на МПА, микроорганизмов на КАА, общее количество микроорганизмов и коэффициент минерализации возрастают относительно фона при увеличении дозы ФГ с 2 до 6 т/га, достигая максимальных значений на варианте внесения ФГ 6 т/га. Применение же 8 т/га снижает данные показатели на 3-27% относительно варианта ФОН + ФГ 6 т/га.

Наибольшая численность бактерий отмечена в образцах почвы с внесением ФГ в нормах 4,6,8 т/га. Так, в образцах почвы с внесением фосфогипса с нормами: 2, 4, 6, 8 т/га количество данной группы микроорганизмов находилось на уровне 1225-1532 тыс. КОЕ на 1 г абс. сух. почвы, а в варианте с ФОНом – 1155 тыс. КОЕ на 1 г абс. сух. почвы. Наибольшее число бактерий (1532 КОЕ/1 г почвы) было выявлено с внесением 6 т/га мелиоранта, а внесение 4 и 8 т/га увеличивало содержание бактерий на 28,6% соответственно, а в образце с внесением ФГ в норме 6 т/га на 32,6%.

Проведенные исследования позволяют утверждать, что наиболее благоприятные условия для развития микромицетов были в образцах с использованием фосфогипса в норме 2 т/га и составило 42 КОЕ/1 гр., что больше по сравнению с контролем на 75%.

Внесение ФГ в норме 4 т/га увеличивало количество микромицетов на 70%, а при внесении норм 6 и 8 т/га на 62 %.

Содержание микроорганизмов, усваивающих минеральный азот, менялось в зависимости от норм внесения ФГ. Максимальное количество отмечалось при внесении 6 т/га и составляло 2374 КОЕ/ 1 гр, что больше на 47%. Внесение 2 и 4 т/га ФГ увеличивало содержание микроорганизмов на 13,6 и 23,2 %, но при внесении 8 т/га содержание микроорганизмов, усваивающих минеральный азот, увеличивалось не значительно и составляло лишь 7,6%.

Для оценки интенсивности и направленности микробиологических процессов в почве при внесении ФГ видимыми показателями являются коэффициент минерализации (ККА/МПА). Так при внесении 2 и 6 т/га ФГ коэффициент составил 1,5 и 1,55. Коэффициент минерализации характеризует скорость разложения органических остатков в почве. В наших исследованиях значение коэффициента минерализации говорит об интенсивном процессе минерализации. При этом при внесении 8 и 4 т/га прослеживается значительное уменьшение степени минерализации органического вещества на 16,4 и 4,3% по отношению к ФОНу.

3.7. Влияние применения фосфогипса на распространение заболеваний, фенологические фазы развития и качество клубней картофеля

Как известно картофель является одной из немногих культур, которая только при правильной обработке почвы (четкое соблюдение технологии с глубоким разрыхлением техникой нижних слоев почвы, обеспечение рыхлости пахотного слоя и накоплением влаги) и применении удобрений, дает хорошие урожаи. Но в условиях интенсивного выращивания на тяжелых и средних суглинках в специализированном севообороте мы отметили, что идет ухудшение качественных показателей клубней и снижается товарность. До 2016 года на предприятии ИП Цирулев Е. П. сохранялся севооборот с применением сидерального пара, что являлось лучшими предшественником картофеля. Удавалось избавиться от многолетних сорняков и в целом почистить поле.

Но дефицит органического вещества и увеличение патогенов сказывалось на качестве полученного урожая. Поэтому в хозяйстве заменили черный пар на занятый и появилась необходимость в быстром разложении стерни. Перед уборкой проводились исследование на клубнях картофеля Сорта Гранада на поражение внешними инфекциями, которые снижали товарность картофеля. Так было отмечено, что в варианте с ФОНом содержание клубней, зараженных паршой и внешними инфекциями, составляло 38,7%, а с внесением фосфогипса в норме 2 т/га уменьшалось 21,7% и составило 30,3 (табл. 3.7.1).

Таблица 3.7.1 – Влияние фосфогипса на зараженность паршой и внешними инфекциями картофеля сорта Гранада, %, 2021-2024 гг.

Год исследований	Варианты опыта				
	N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	+ ФГ 2 т/га	+ ФГ 4 т/га	+ ФГ 6 т/га	+ ФГ 8 т/га
2021	52	46	38	29	17
2022	28	21	17	15	13
2023	36	24	12	17	8
2024	38	24	17	17	12
Среднее по годам	38,7	30,3	22,3	20,3	12,7

При внесении ФГ отмечено снижение зараженности паршой и другими инфекциями картофеля сорта Гранада на 8-26% и сорта Гала на 19-30% в среднем за 2021-2024 гг. При этом минимальное поражение за весь период исследования на

картофеле Гранада отмечено при внесении ФГ в норме 8 т/га, что на 15-35% ниже фона. Наименьший процента зараженности паршой и внешними инфекциями картофеля сорта Гала за период 2021-2024 гг. (табл. 3.7.2). выявлен при применении 6 т/га мелиоранта, что на 26-35% ниже фонового показателя

Таблица 3.7.2 – Влияние фосфогипса на зараженность паршой и внешними инфекциями картофеля сорта Гала, %, 2021-2024 гг.

Год исследований	Варианты опыта				
	N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	+ ФГ 2 т/га	+ ФГ 4 т/га	+ ФГ 6 т/га	+ ФГ 8 т/га
2021	51,1	28,3	17,2	16,1	16,3
2022	43,6	22,6	17,1	15,8	16,6
2023	41,4	27,1	17,2	15,3	15,4
2024	45,5	27,1	17,2	15,6	16,2
Среднее по годам	45,4	26,0	17,2	15,7	16,1

В целом, можно отметить общее снижение поражения и заболеваемости картофеля в 2022 и 2024 годы по сравнению с 2021 в среднем на 46-68% для сорта Гранада и до 20% для сорта Гала.

Внесение 4 т/га ФГ снижало количество внешних инфекций на 42,4% и составляло 22,3%.

Норма внесения мелиоранта 6 т/га снижала степень поражения на 47,5%, а самой низкой нормой зараженных растений был отмечен опыт с внесением 8 т/га – 12,7%, что ниже фонового на 67%.

Согласно выше упомянутым данным применение ФГ вело к увеличению товарности картофеля. Наилучший результат был при внесении 8 т/га и составил 12,7%, что выше фонового значения на 67%.

На сорте картофеля Гала, так же отмечалось снижение заражений внешними инфекциями (табл. 3.7.3). На сорте Гала отмечалось, что основным патогенном ухудшавшим товарность клубней являлся ризоктониоз. Содержание пораженных клубней на ФОНе составляло 45,4%, минимальное распространение было на фоне с опытом внесения ФГ 6 т/га, сто меньше, чем на контроле на 65,4%. При внесении 4 и 6 т/га ФГ снижение распространения заболеваний снизилось на 62,1 и 64,5%, соответственно. При внесении 2 т/га, также отмечено улучшение товарного вида и снижение поражений внешними инфекциями на 42,7%.

Таблица 3.7.3 – Даты прохождения этапов органогенеза растений картофеля сорта Гала

№	Вариант опыта	Посадка-всходы			Бутонизация		Начало цветения		Клубнеобразование		Формирование ко-журы /уборка		Вегетация, дней
		Посадка	Полные всходы	Дней	Дата	Дней	Дата	Дней	Дата	Дней	Дата	Дней	
2021 год													
1	N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	25.04.	13.05.	18	19.06.	36	25.06.	6	25.06.	4	7.09.	72	136
2	+ ФГ 2 т/га	25.04.	13.05.	18	19.06.	36	25.06.	6	25.06.	4	7.09.	72	136
3	+ ФГ 4 т/га	25.04.	13.05.	18	19.06.	36	25.06.	6	25.06.	4	7.09.	72	136
4	+ ФГ 6 т/га	25.04.	13.05.	18	19.06.	36	25.06.	6	25.06.	4	7.09.	72	136
5	+ ФГ 8 т/га	25.04.	13.05.	18	19.06.	36	25.06.	6	25.06.	4	7.09.	72	136
2022 год													
1	N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	28.04.	21.05.	23	20.06.	30	27.06.	7	30.06.	3	15.09.	75	138
2	+ ФГ 2 т/га	28.04.	21.05.	23	20.06.	30	27.06.	7	30.06.	3	15.09.	75	138
3	+ ФГ 4 т/га	28.04.	21.05.	23	20.06.	30	27.06.	7	30.06.	3	15.09.	75	138
4	+ ФГ 6 т/га	28.04.	21.05.	23	20.06.	30	27.06.	7	30.06.	3	15.09.	75	138
5	+ ФГ 8 т/га	28.04.	21.05.	23	20.06.	30	27.06.	7	30.06.	3	15.09.	75	138
2023 год													
1	N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	24.04.	15.05.	21	21.06.	37	26.06.	5	29.06.	4	11.09.	71	138
2	+ ФГ 2 т/га	24.04.	15.05.	21	21.06.	37	26.06.	5	29.06.	4	11.09.	71	138
3	+ ФГ 4 т/га	24.04.	15.05.	21	21.06.	37	26.06.	5	29.06.	4	11.09.	71	138
4	+ ФГ 6 т/га	24.04.	15.05.	21	21.06.	37	26.06.	5	29.06.	4	11.09.	71	138
5	+ ФГ 8 т/га	24.04.	15.05.	21	21.06.	37	26.06.	5	29.06.	4	11.09.	71	138

Из всего выше изложенного можно сделать выводы, что внесение ФГ улучшает работу антагонистов и ведет к снижению распространения внешних инфекций и улучшению товарного вида на сорте Гала более, чем на 40%. Максимально низкое значение было отмечено при применении ФГ 6 т/га и составил 15,7%, что ниже ФОНового значения на 64,5%.

Посадка картофеля Сорта Гала на всех вариантах опыта в 2021 года производилась одновременно – 25 апреля, что является оптимальным агротехническим сроком. Фаза полных всходов в нашем опыте в условиях южной зоны Самарской области наступила одновременно на 18 день после прохождения посева – 13 мая. Особых различий в посадках не отмечалось нами и в фазу бутонизации, которая наступила во всех вариантах опыта 19 июня, или на 36 день после появления всходов. Дальнейшие фенологические наблюдения показали, что начало цветения наступает одновременно на всех вариантах опыта на 6 день после бутонизации – 25 июня или на 42 день с даты полных всходов картофеля. Через 4 дня отмечена фаза клубнеобразования. Формирование кожуры наступает одновременно на всех вариантах опыта – 7 сентября, или на 72 день после клубнеобразования, и вегетационный период составил 136 дней (табл. 3.7.4).

Фенологические наблюдения за развитием растений картофеля сорта Гала показали, что в сложившихся погодных условиях 2022 года посадка картофеля пришлась на 28 апреля. Всходы появляются 21 мая на всех вариантах опытов, а бутонизация наступает через 30 дней (20 июня). Через неделю (27.06.) отмечено начало цветения картофеля на всех вариантах опыта, а через 3 дня – клубнеобразование, которое пришлось календарно на 30 июня или на 40 день от появления полных всходов. Фаза формирования кожуры наступает через 75 дней клубнеобразования – 15 сентября или на 117 день после всходов. Длина вегетации составила 138 дней.

В условиях весны 2023 года посадка картофеля сорта Гала пришлась наиболее рано за период исследования – 24 апреля.

Таблица 3.7.4 – Даты прохождения этапов органогенеза растений картофеля сорта Гранада

№	Вариант опыта	Посадка-всходы			Бутонизация		начало цветения		Клубнеобразование		Формирование кожуры /уборка		Вегетация, дней
		Посадка	полные всходы	Дней	Дата	Дней	Дата	Дней	Дата	Дней	Дата	Дней	
2021 год													
1	N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	21.04.	16.05.	25	15.06.	29	21.06.	6	25.06.	4	20.08.	55	119
2	+ ФГ 2 т/га	21.04.	16.05.	25	15.06.	29	21.06.	6	25.06.	4	20.08.	55	119
3	+ ФГ 4 т/га	21.04.	16.05.	25	15.06.	29	21.06.	6	25.06.	4	20.08.	55	119
4	+ ФГ 6 т/га	21.04.	16.05.	25	15.06.	29	21.06.	6	25.06.	4	20.08.	55	119
5	+ ФГ 8 т/га	21.04.	16.05.	25	15.06.	29	21.06.	6	25.06.	4	20.08.	55	119
2022 год													
1	N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	26.04.	20.05.	24	20.06.	30	27.06.	7	30.06.	3	25.08.	55	119
2	+ ФГ 2 т/га	26.04.	20.05.	24	20.06.	30	27.06.	7	30.06.	3	25.08.	55	119
3	+ ФГ 4 т/га	26.04.	20.05.	24	20.06.	30	27.06.	7	30.06.	3	25.08.	55	119
4	+ ФГ 6 т/га	26.04.	20.05.	24	20.06.	30	27.06.	7	30.06.	3	25.08.	55	119
5	+ ФГ 8 т/га	26.04.	20.05.	24	20.06.	30	27.06.	7	30.06.	3	25.08.	55	119
2023 год													
1	N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	23.04.	19.05.	26	17.06.	28	26.06.	9	29.06.	3	23.08.	54	120
2	+ ФГ 2 т/га	23.04.	19.05.	26	17.06.	28	26.06.	9	29.06.	3	23.08.	54	120
3	+ ФГ 4 т/га	23.04.	19.05.	26	17.06.	28	26.06.	9	29.06.	3	23.08.	54	120
4	+ ФГ 6 т/га	23.04.	19.05.	26	17.06.	28	26.06.	9	29.06.	3	23.08.	54	120
5	+ ФГ 8 т/га	23.04.	19.05.	26	17.06.	28	26.06.	9	29.06.	3	23.08.	54	120

Полные всходы появляются через 21 день, или 15 мая. Бутонизация проходила независимо от варианта опыта 21 июня, или через 37 дней после прохождения фазы всходов – 21 июня. Наиболее быстро в 2023 году наступали и последующие фазы – цветение и клубнеобразование, которые пришлись календарно на 26 и 29 июня. Так начало цветения отмечено через 5 дней после бутонизации, а образование клубней – через 3 дня после цветения. Период клубнеобразование-формирование кожуры длился 71 день на всех вариантах опыта, а вегетационный период составил 138 дней.

Таким образом, анализируя данные 3-х летнего наблюдения, можно заключить (табл. 3.7.4), что наступление фенофаз у растений картофеля сортов Гала и Гранада наступает одновременно, независимо от нормы внесения фосфогипса.

За годы проведенных нами исследований применение фосфогипса положительно повлияло на повышение качества клубней (табл. 3.7.5).

Таблица 3.7.5 – Влияние различных норм фосфогипса на биохимический состав клубней картофеля перед закладкой на хранение, 2021-2024 гг.

№ п.п.	Вариант опыта	Показатель			
		Сухое вещество, %	Крахмал, %	Витамин С, мг	Нитраты, мг
Сорт Гранада					
1	N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	23,7	13,0	12,7	134
2	+ ФГ 2 т/га	24,3	14,2	13,8	127
3	+ ФГ 4 т/га	24,7	14,7	15,6	131
4	+ ФГ 6 т/га	24,7	14,3	15,8	128
5	+ ФГ 8 т/га	24,8	14,5	15,6	121
Сорт Гала					
1	N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	17,3	12,2	11,1	125
2	+ ФГ 2 т/га	18,6	12,4	12,3	104
3	+ ФГ 4 т/га	18,4	12,8	12,4	98
4	+ ФГ 6 т/га	18,6	12,8	12,8	90
5	+ ФГ 8 т/га	18,6	12,8	13	86

Содержание сухого вещества на сорте Гранада было в 1,33 раза выше, чем на сорте Гала. Внесение ФГ в норме 2, 4, 6, 8 т/га обеспечивал стабильный рост сухого вещества на 0,6-1,1% в клубнях сорта Гранада и на 1,1-1,3% в клубнях сорта Гала.

Увеличение крахмала на сорте Гранада было при внесении 2 т/га ФГ и составило 14,7%, а на фоне минеральных удобрений данный показатель был самым низким и имел значение 13,0%. При внесении ФГ в норме 2,6,8 т/га увеличивалось содержание крахмала больше фона на 1,2-1,5% и составлял: 14,2, 14,3, 14,5 % соответственно.

Содержание витамина С в зависимости от внесения мелиоранта увеличивалось по сравнению с фоном на обоих сортах. Самым высоким значением витамина С на сорте Граната было на варианте с применением ФГ в норме 6 т/га и составил 15,6 мг/100 г, а на сорте Гала с внесением ФГ в норме 8 т/га и составил 13,0 мг/100 г.

Ученым известно около 20 факторов, влияющих на поступление и накопление нитратов в растениях. Наиболее значимые из них это метеорологические условия, длина вегетационного периода, генетические особенности сорта, соотношение питательных элементов в почве и вносимых удобрениях. Содержание нитратов в клубнях картофеля обоих сортов снижалось в зависимости от норм внесения ФГ: минимальное содержание нитрат иона в сорте Гранада было при внесении 2 т/га ФГ, что ниже контроля на 5,2%, 6 т/га ФГ на 4,5%, а внесение 4 и 8 т/га уменьшало концентрацию нитратов в клубнях на 2,2%. На сорте картофеля Гала максимальное снижение нитрат-иона было отмечено при внесении 8 т/га ФГ, что ниже фона на 31%, а внесение 2, 4, 6 т/га ФГ снижало данный показатель на 16,8; 21; 28% соответственно.

4. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ДЕЙСТВИЯ ФОСФОГИПСА НА АККУМУЛЯЦИЮ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ ПОЧВОЙ И КАРТОФЕЛЕМ

4.1. Влияние фосфогипса на накопления тяжелых металлов почвой под растениями картофеля сорта Гранада

Обследование почвы на содержание ТМ выявило, что концентрация их подвижных и валовых форм в почве находится ниже норм ПДК и фоновых значений (табл. 4.1.1).

Таблица 4.1.1 – Валовое содержание тяжелых металлов в почве
под участками картофеля сорта Гранада по фазам развития, мг/кг

Вариант	Элемент						
	Cd	Pb	Cu	Zn	Mn	Fe	Ni
Полные всходы							
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	0,66	10,3	10,7	17,0	213	4112	16,0
+ ФГ 2 т/га	0,39	9,9	10,1	16,2	210	4110	15,0
+ ФГ 4 т/га	0,39	9,8	10,2	16,1	210	4110	15,0
+ ФГ 6 т/га	0,38	9,8	10,2	16,2	207	4110	15,0
+ ФГ 8 т/га	0,39	9,3	10,2	16,6	207	4122	15,0
Бутонизация							
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	0,67	9,9	11,4	16,2	208	4122	14,0
+ ФГ 2 т/га	0,39	9,9	10,0	15,4	203	4040	14,0
+ ФГ 4 т/га	0,39	9,8	10,1	15,2	204	4040	14,0
+ ФГ 6 т/га	0,39	9,8	10,1	15,2	204	4050	14,0
+ ФГ 8 т/га	0,39	9,3	10,1	15,4	206	4050	13,0
Начало цветения							
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	0,65	11,7	10,8	15,3	204	4118	15,0
+ ФГ 2 т/га	0,38	10,8	10,8	15,2	201	3981	14,0
+ ФГ 4 т/га	0,38	10,8	10,4	15,1	201	3900	14,0
+ ФГ 6 т/га	0,37	10,6	10,4	15,1	201	3900	14,0
+ ФГ 8 т/га	0,37	10,2	10,6	15,4	204	3900	13,5
Клубнеобразование							
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	0,65	11,4	10,6	14,2	201	4088	14,0
+ ФГ 2 т/га	0,37	10,3	9,4	14,4	191	3199	13,0
+ ФГ 4 т/га	0,37	9,7	9,2	14,4	191	3195	13,0
+ ФГ 6 т/га	0,37	10,5	9,4	14,8	192	3184	13,0
+ ФГ 8 т/га	0,38	10,0	9,4	14,8	195	3303	13,0
Формирование кожуры /уборка							
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	0,64	11,2	10,4	13,4	193	4044	13,0
+ ФГ 2 т/га	0,36	10,2	10,4	13,0	177	3098	13,0
+ ФГ 4 т/га	0,36	10,5	10,2	13,0	177	3098	13,0
+ ФГ 6 т/га	0,36	10,4	10,4	13,0	175	3098	13,0
+ ФГ 8 т/га	0,36	10,9	10,4	13,2	175	3098	13,0
ФОН [57]	0,66	13,40	26,5	75,5	687,7	33592	28,2
ПДК [45]	2	32	55	100	1500	-	85

Концентрация кадмия варьировала от 0,36 до 0,67 мг/кг, что в 3,0-5,5 раз ниже ПДК и не превосходит фоновое значение для почв Самарской области (за исключением фазы бутонизации на варианте внесения удобрений $N_{150}P_{150}K_{300}$). При дополнительном применении ФГ валовая концентрация кадмия снижается до 42-44% по сравнению с вариантом внесения только минеральных удобрений. Причем доза ФГ не влияет концентрацию кадмия в почве. Содержание кадмия практически не зависело от фазы развития картофеля, к моменту уборки концентрация металла снизилась незначительно (на 0,02 мг/кг) по отношению к фазе всходов.

Количество свинца в почве было в пределах 9,3-11,7 мг/кг, что в 2,7-3,4 раза ниже ПДК и меньше фонового значения на 1,7-4,1 мг/кг. Внесение ФГ совместно с минеральными удобрениями снижает концентрацию металла. При повышении дозы ФГ концентрация свинца в почве в основном снижается. В целом, при внесении ФГ содержание свинца уменьшается до 15 % по сравнению с вариантом применения минеральных удобрений $N_{150}P_{150}K_{300}$. Закономерности в распределении металла в почве в течение вегетации не выявлено.

Валовое содержание меди варьировало в пределах 9,2-11,4 мг/кг, что в 5-6 раз ниже ПДК и в 2-3 раза ниже фонового значения по Самарской области. Дополнительное внесение ФГ снижает концентрацию меди в почве на 3,7-12,3% по отношению к фоновому варианту. Концентрация меди снижается в процессе вегетации и достигает наименьших значений к стадии клубнеобразования. К моменту уборки содержание меди вновь возрастает до 1,0 мг/кг по сравнению с предыдущей стадией.

Количество цинка варьировало от 13,0 до 17,0 мг/кг. Значения в 5,9-7,7 раз ниже ПДК и в 4,4-5,8 раз меньше регионального фонового. Применение ФГ в качестве мелиоранта позволяет несколько снизить содержание цинка до 1 мг/кг (за исключением стадии клубнеобразования) по сравнению с вариантом применения минеральных удобрений $N_{150}P_{150}K_{300}$. В целом, в течение вегетации валовое содержание цинка снижается, достигая минимальных значений к уборке урожая. Значения на 14-21 % меньше по сравнению с фазой всходов.

Валовое содержание марганца в почве было 175-213 мг/кг, что ниже ПДК в 7,0-8,5 раз и в 3-4 раза меньше фонового регионального значения. Дополнительное

применение фосфогипса позволяет снизить концентрацию металла до 8,3% по сравнению с фоновым вариантом опыта. При увеличении дозы ФГ количество марганца повышается в среднем на 2% за исключением фазы всходов, где при внесении 6 и 8 т/га количество марганца меньше на 1,4% по сравнению с вариантами внесения 2-4 т/га. В течение вегетации валовое содержание марганца уменьшается и становится минимальным на стадии формирования кожуры. Показатели на 4-13% ниже, чем в фазу всходов.

Количество железа в почве варьировало от 3098 до 4122 мг/кг, что в 8-11 раз меньше регионального фонового значения. Наибольшее количество выявлено при применении минеральных удобрений $N_{150}P_{150}K_{300}$. При внесении фосфогипса количество железа снижается до 23% относительно фонового варианта. Однако, на стадии всходов концентрация железа на варианте внесения 8 т/га ФГ становится выше значения фонового варианта на 2,7%, на стадиях бутонизации и цветения сравнивается по значениям на фоновом варианте применения удобрений $N_{150}P_{150}K_{300}$. В течение вегетации валовое содержание железа в почве снижается до 23% относительно стадии всходов.

Количество никеля в почве опытного участка было равно 13,0-16,0 мг/кг, что в 6,5-7,1 раз меньше ПДК и в 2 раза ниже фонового значения. Дополнительное внесение ФГ совместно с минеральными удобрениями $N_{150}P_{150}K_{300}$ понижает количество никеля в среднем на 1 мг/кг по сравнению с фоновым вариантом. При этом доза ФГ в большинстве случаев не влияет на изменение концентрации металла в почве за исключением стадии бутонизации и цветения, где при внесении 8 т/га концентрация никеля ниже вариантов внесения 2-6 т/га на 7,1 и 3,6% соответственно. Валовое содержание никеля в основном снижается с течением вегетации на 13-19%.

Для изучаемых металлов в почве был рассчитан коэффициент концентрации или относительная концентрация химического элемента (K_c), который показывает, во сколько раз содержание химического элемента в исследуемом образце почвы отличается от его регионального фонового значения. Из данных таблицы 4.1.2 можно утверждать, что все металлы в почве содержатся в концентрациях ниже фонового регионального значения, так как их K_c меньше 1 (за исключением кадмия

на фоновом варианте в фазы полных всходов и бутонизации, где $K_c=1,00$ и $1,02$). В другие фазы развития картофеля содержание кадмия на фоне минеральных удобрений было также близко к его содержанию в почвах Самарской области, и K_c составил $0,97-0,98$. Причем в течение вегетации концентрация кадмия снижается, и его относительная концентрация (K_c) также становится меньше.

Таблица 4.1.2 – Коэффициенты накопления (K_c) тяжелых металлов при различных дозах внесения фосфогипса, 2021-2024 гг.

Вариант	Элемент						
	Cd	Pb	Cu	Zn	Mn	Fe	Ni
Полные всходы							
$N_{150}P_{150}K_{300}$	1,00	0,77	0,40	0,23	0,31	0,12	0,57
+ ФГ 2 т/га	0,59	0,74	0,38	0,21	0,31	0,12	0,53
+ ФГ 4 т/га	0,59	0,73	0,38	0,21	0,31	0,12	0,53
+ ФГ 6 т/га	0,58	0,73	0,38	0,21	0,30	0,12	0,53
+ ФГ 8 т/га	0,59	0,69	0,38	0,22	0,30	0,12	0,53
Бутонизация							
$N_{150}P_{150}K_{300}$	1,02	0,74	0,43	0,21	0,30	0,12	0,50
+ ФГ 2 т/га	0,59	0,74	0,38	0,20	0,30	0,12	0,50
+ ФГ 4 т/га	0,59	0,73	0,38	0,20	0,30	0,12	0,50
+ ФГ 6 т/га	0,59	0,73	0,38	0,20	0,30	0,12	0,50
+ ФГ 8 т/га	0,59	0,69	0,38	0,20	0,30	0,12	0,46
Начало цветения							
$N_{150}P_{150}K_{300}$	0,98	0,87	0,41	0,20	0,30	0,12	0,53
+ ФГ 2 т/га	0,58	0,81	0,41	0,20	0,29	0,12	0,50
+ ФГ 4 т/га	0,58	0,81	0,39	0,20	0,29	0,12	0,50
+ ФГ 6 т/га	0,56	0,79	0,39	0,20	0,29	0,12	0,50
+ ФГ 8 т/га	0,56	0,76	0,40	0,20	0,30	0,12	0,48
Клубнеобразование							
$N_{150}P_{150}K_{300}$	0,98	0,85	0,40	0,19	0,29	0,12	0,50
+ ФГ 2 т/га	0,56	0,77	0,35	0,19	0,28	0,10	0,46
+ ФГ 4 т/га	0,56	0,72	0,35	0,19	0,28	0,10	0,46
+ ФГ 6 т/га	0,56	0,78	0,35	0,20	0,28	0,09	0,46
+ ФГ 8 т/га	0,58	0,75	0,35	0,20	0,28	0,10	0,46
Формирование кожуры /уборка							
$N_{150}P_{150}K_{300}$	0,97	0,84	0,39	0,18	0,28	0,12	0,46
+ ФГ 2 т/га	0,55	0,76	0,39	0,17	0,26	0,09	0,46
+ ФГ 4 т/га	0,55	0,78	0,38	0,17	0,26	0,09	0,46
+ ФГ 6 т/га	0,55	0,78	0,39	0,17	0,25	0,09	0,46
+ ФГ 8 т/га	0,55	0,81	0,39	0,17	0,25	0,09	0,46

По предложению И. С. Михайлова с соавторами (1967) в ассоциацию рассеивающихся элементов следует отнести те, K_c которых ниже $0,5$, а в ассоциацию накапливающихся – с $K_c > 1,5$. Содержание элементов, относительная концентрация

которых колебалась в пределах 0,5-1,5, считается близким к фоновому содержанию. В целом по опыту Кс свинца составил от 0,69 до 0,87, кадмия – 0,55-1,02, никеля – от 0,46 до 0,57. По данной классификации – это элементы, концентрация которых оказалась близкой к фоновому региональному значению. Далее по убыванию относительной концентрации расположились: медь (Кс=0,35-0,43), марганец (Кс=0,25-0,31), цинк (Кс=0,17-0,23) и железо (Кс= 0,09-0,12). Эти металлы составляют группу рассеивающихся элементов, а накапливающихся элементов в нашем исследовании нет.

На варианте опыта с внесением минеральных удобрений N₁₅₀P₁₅₀K₃₀₀ наибольшее значение Кс выявлено у кадмия, далее следуют свинец и никель. Рассеивающиеся элементы – медь, марганец, цинк и железо. Геохимический ряд можно представить следующим образом:

$$Cd(0,99) Pb(0,81) Ni(0,51) \frac{1}{Cu(0,41) Mn(0,30) Zn(0,20) Fe(0,12)}$$

При применении ФГ относительная концентрация свинца становится больше, чем Кс кадмия и последовательность элементов по убыванию коэффициента концентрации следующая:



В среднем по вариантам опыта по фазам развития картофеля можно представить геохимические ряды.

Всходы:

$$Pb(0,73) Cd(0,67) Ni(0,54) \frac{1}{Cu(0,39) Mn(0,30) Zn(0,22) Fe(0,12)}$$

Бутонизация:

$$Pb(0,73) Cd(0,68) Ni(0,49) \frac{1}{Cu(0,39) Mn(0,30) Zn(0,20) Fe(0,12)}$$

Начало цветения:

$$Pb(0,81) \text{ } Cd(0,65) \text{ } Ni(0,50) \frac{1}{Cu(0,40) \text{ } Mn(0,29) \text{ } Zn(0,20) \text{ } Fe(0,12)}$$

С фазы клубнеобразования Кс никеля становится меньше 0,5, и металл переходит в ассоциацию рассеивающихся элементов (в знаменатель дроби):

$$Pb(0,78) \text{ } Cd(0,65) \frac{1}{Ni(0,47) \text{ } Cu(0,36) \text{ } Mn(0,28) \text{ } Zn(0,19) \text{ } Fe(0,10)}$$

Формирование кожуры:

$$Pb(0,79) \text{ } Cd(0,63) \frac{1}{Ni(0,46) \text{ } Cu(0,39) \text{ } Mn(0,26) \text{ } Zn(0,17) \text{ } Fe(0,10)}$$

Из данных таблицы и геохимических рядов можно сделать вывод, что концентрация большинства металлов в течение вегетации снижается, что ведет к уменьшению их Кс и, как следствие, отнесение никеля в группу рассеивающихся элементов с фаз клубнеобразования и о уборки картофеля. Коэффициент концентрации меди напротив, в основном увеличивался, а Кс свинца менялась неоднозначно.

Большинство вариантов опыта, независимо от фазы развития картофеля, по рассчитанным коэффициентам концентрации можно описать следующим геохимическим рядом, написанном на основании усредненных значений Кс металлов:

$$Pb(0,77) \text{ } Cd(0,66) \frac{1}{Ni(0,49) \text{ } Cu(0,39) \text{ } Mn(0,29) \text{ } Zn(0,20) \text{ } Fe(0,11)}$$

Из представленного ряда видно, что свинец и кадмий являются элементами с концентрациями близкими к фоновому значению, а никель, медь, марганец, цинк и железо – рассеивающиеся, при этом накапливающиеся элементы в исследуемых почвах не выявлено.

Концентрация подвижных форм всех изучаемых металлов находилась значительно ниже ПДК (табл. 4.1.3).

**Таблица 4.1.3 – Содержание подвижной формы тяжелых металлов
(экстрагент ацетатно-аммонийный буфер рН 4,8)
в почве под участками картофеля сорта Гранада по фазам развития, мг/кг**

Вариант	Элемент						
	Cd	Pb	Cu	Zn	Mn	Fe	Ni
Полные всходы							
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	0,052	0,35	0,22	0,60	19,0	7,44	0,46
+ФГ 2 т/га	0,048	0,33	0,26	0,90	24,0	7,22	0,44
+ФГ 4 т/га	0,046	0,33	0,26	0,90	24,0	7,20	0,44
+ФГ 6 т/га	0,046	0,33	0,26	0,90	24,0	7,20	0,44
+ФГ 8 т/га	0,046	0,33	0,26	0,91	29,0	7,45	0,43
Бутонизация							
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	0,046	0,33	0,16	0,50	18,0	6,42	0,45
+ ФГ 2 т/га	0,044	0,33	0,13	0,79	21,0	6,68	0,43
+ ФГ 4 т/га	0,044	0,33	0,13	0,78	21,0	6,68	0,43
+ ФГ 6 т/га	0,044	0,33	0,14	0,78	21,0	6,64	0,43
+ ФГ 8 т/га	0,044	0,33	0,16	0,77	28,0	6,66	0,40
Начало цветения							
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	0,046	0,30	0,14	0,85	17,5	4,86	0,42
+ ФГ 2 т/га	0,044	0,29	0,11	0,94	20,0	4,98	0,42
+ ФГ 4 т/га	0,044	0,29	0,11	0,94	20,0	4,93	0,42
+ ФГ 6 т/га	0,044	0,29	0,11	0,94	20,0	4,92	0,42
+ ФГ 8 т/га	0,044	0,28	0,13	0,95	25,0	4,98	0,41
Клубнеобразование							
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	0,040	0,29	0,13	0,81	17,0	4,64	0,38
+ ФГ 2 т/га	0,038	0,27	0,10	0,87	20,0	4,64	0,37
+ ФГ 4 т/га	0,038	0,27	0,10	0,88	20,0	4,62	0,36
+ ФГ 6 т/га	0,038	0,27	0,10	0,87	21,0	4,64	0,35
+ ФГ 8 т/га	0,038	0,27	0,10	0,85	24,0	4,71	0,34
Формирование кожуры /уборка							
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	0,040	0,27	0,13	0,78	14,0	4,32	0,35
+ ФГ 2 т/га	0,038	0,25	0,10	0,74	19,0	4,32	0,33
+ ФГ 4 т/га	0,038	0,25	0,10	0,74	19,0	4,36	0,33
+ ФГ 6 т/га	0,035	0,25	0,10	0,74	19,0	4,34	0,32
+ ФГ 8 т/га	0,035	0,25	0,10	0,75	20,0	4,58	0,32
ФОН	0,04	2,3	3	24,9	493,1	7,67	0,55
ПДК	2	6	3	23	100	-	4,0

Концентрация подвижных форм кадмия находилось в пределах 0,035-0,052 мг/кг, что ниже ПДК в 39-57 раз. Значения близки к региональному фоновому показателю, равному 0,04 мг/кг и в фазы полных всходов, бутонизации и начала цветения превышает его на 0,004-0,012 мг/кг. Наибольшее количество подвижного кадмия выявлено на фоновом варианте опыта – 0,040-0,052 мг/кг. Внесение ФГ снижает концентрацию тяжелого металла на 2,2-12,5% относительно варианта внесения только минеральных удобрений N₁₅₀P₁₅₀K₃₀₀. В целом с увеличением дозы

вносимого ФГ концентрация кадмия снижается до 0,003 мг/кг или остается неизменной. В течение вегетации количество подвижного кадмия в почве уменьшается, и к моменту уборки становится на 18-25 % меньше, чем в фазу всходов.

Содержание подвижных форм свинца в почве опытных участков варьировало от 0,25 до 0,35 мг/кг при ПДК равным 6 мг/кг. Показатели ниже предельно-допустимой концентрации в 17-24 раза и в 6,6-9,2 раза фонового значения. Наибольшая концентрация свинца на фоне минеральных удобрений $N_{150}P_{150}K_{300}$ (за исключение фазы бутонизации). Внесение ФГ способствует незначительному снижению количества подвижного свинца в почве до 0,02 мг/кг или 7,4%. В фазу бутонизации содержание металла было одинаковым для фонового варианта и при внесении ФГ во всех дозах (2-8 т/га). К наступлению фазы формирования кожуры значения концентрации металла не зависят от дозы применяемого мелиоранта и равняется 0,25 мг/кг, что является минимальными значениями в опыте. С прохождением фенофаз также отмечено уменьшение количества подвижного свинца в почве в среднем на 24%.

Концентрация подвижной меди в почве была в 11-30 раз ниже ПДК, а также фонового значения и колебалась в широких пределах от 0,10 до 0,26 мг/кг. Максимальные концентрации (за исключением фазы всходов) выявлены при внесении минеральных удобрений $N_{150}P_{150}K_{300}$ – 0,13-0,26 мг/кг. На стадии всходов количество меди при внесении ФГ больше, чем на фоне минеральных удобрений $N_{150}P_{150}K_{300}$ на 18%. в остальной период времени до уборки урожая ФГ способствовал снижению концентрации металла до 23%. при переходе от фазы всходов до бутонизации концентрация меди снижается в 1,5-2 раза. При дальнейшем развитии картофеля снижение концентрации меди не такое резкое и составляет до 9-15% на каждой стадии или 19-38 % за период бутонизация-формирование кожуры.

Концентрация цинка варьировала в пределах 0,50-0,95 мг/кг, что в 24-46 раз ниже ПДК и значительно ниже фоновых значений для почв Самарской области. Наименьшая концентрация металла выявлена на фоновом варианте во все стадии развития картофеля, кроме фазы образования кожуры, где минимальные значения

получены при внесении совместно с минеральными удобрениями 2-6 т/га фосфогипса. Концентрация цинка на этих вариантах опыта снизилась на 4-5%. В остальные фазы развития картофеля при внесении мелиоранта количество подвижного цинка возрастает на 50 % для фазы всходов, на 54-58% для фазы бутонизации, 11-13% в фазу начала цветения и 5-9% в период клубнеобразования. Причем с увеличением дозы ФГ в основном наблюдается рост концентрации подвижного цинка и достигая максимальных значений при 8 т/га (в фазу бутонизации при 2 т/га ФГ, а клубнеобразования – при внесении 4 т/га). В процессе вегетации происходит снижение содержания цинка в почве на 12-17% в период всходы-бутонизация, 5-18% в период с начала цветения до клубнеобразования и 4-16% с фазы клубнеобразования до формирования кожуры.

Подвижный марганец находился в почве опытного участка в пределах 14,0-29,0 мг/кг, что ниже ПДК в 3-7 раз и в 17-35 раз ниже региональной фоновой концентрации. Самая низкая концентрация металла выявлена на варианте внесения минеральных удобрений $N_{150}P_{150}K_{300}$ – 14,0-19,0 мг/кг. Дополнительное применение ФГ увеличивает данный показатель на 14-55%. Причем с повышением дозы вносимого мелиоранта концентрация марганца в почве возрастает, и максимальные значения, на 41-55% превышающие фоновый вариант, выявлены при внесении 8 т/га ФГ. С прохождением фенофаз марганца становится меньше в почве в среднем на 1,0-3,0 мг/кг относительно предыдущей фазы развития картофеля, что к концу вегетации приводит к снижению количества подвижных форм марганца на 21-31% по сравнению с фазой всходов.

Концентрация подвижных форм железа варьировала от 4,32 до 7,45 мг/кг. На стадии всходов значения приближались к региональному фону, равному 7,67 мг/кг. В остальной период вегетации концентрация была ниже фоновых значений на 11-44%. В основном, при внесении ФГ наблюдается рост концентрации подвижного железа, и максимальное содержание металла выявлено при внесении 8 т/га ФГ – 4,58-7,45 мг/кг, что в среднем на 2,5% выше фонового варианта (за исключением фазы бутонизации). Только на стадии всходов при внесении 2-6 т/га мелиоранта происходит незначительное уменьшение количества подвижных форм железа на

3% по сравнению с вариантом внесения минеральных удобрений $N_{150}P_{150}K_{300}$. В целом, за вегетационный период наблюдается снижение содержания подвижного железа в почве опытного участка. К моменту уборки концентрация железа стала на 39-42% по сравнению с фазой всходов.

Содержание подвижных форм никеля в почве находилось в диапазоне 0,32-0,46 мг/кг, что в 8,7-12,5 раз ниже ПДК и в 14,2-20,5 раз меньше фоновых значений для почв Самарской области. В фазу всходов, бутонизации, образования клубней и формирования кожуры наибольшая концентрация металла выявлена на варианте применения минеральных удобрений $N_{150}P_{150}K_{300}$. При внесении ФГ происходит снижение концентрации подвижного никеля на 2,4-11,0% по сравнению с фоновым вариантом опыта, достигая наименьших значений при внесении 8 т/га. В течение вегетации количество подвижных форм никеля в почве снижается, и наименьшие концентрации выявлены к моменту уборки урожая – 0,32-0,35 мг/кг, что на четверть ниже показателей в фазу всходов.

Подвижность кадмия составила от 6,15 до 12,31%. Наименее подвижен металл в почве при внесении удобрений $N_{150}P_{150}K_{300}$ (табл. 4.1.4). На стадии всходов наибольшая подвижность при внесении 2 и 4 т/га – на 4,23-4,43% выше, чем на фоновом варианте. В фазу начала цветения подвижность максимальна при внесении 6 и 8 т/га ФГ, что на 4,81 % выше фонового показателя. В фазы клубнеобразования и формирования кожуры – при внесении 2-6 и 2-4 т/га ФГ. Превышение составило 4,12 и 4,31% соответственно. В целом, внесение мелиоранта повышает подвижность кадмия на 3,47-4,81% по отношению к фоновому варианту опыта. В течение вегетационного периода подвижность металла снижается за исключением периода от бутонизации до начала цветения, где доля подвижной фазы относительно валового содержания возросла на 0,2-0,6%.

Подвижность свинца в опыте равнялась 2,29-3,55%, наименьшие значения выявлены на фоновом варианте ($N_{150}P_{150}K_{300}$) или при внесении 2 т/га ФГ – 2,54-3,33% на всех стадиях развития картофеля, кроме фазы формирования кожуры. При дополнительном использовании совместно с минеральными удобрениями ФГ и увеличение его дозы приводит к повышению подвижности металла на 0,03-0,24 %.

**Таблица 4.1.4 – Подвижность тяжелых металлов в почве
под участками картофеля сорта Гранада по фазам развития, %**

Вариант	Элемент						
	Cd	Pb	Cu	Zn	Mn	Fe	Ni
Полные всходы							
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	7,88	3,40	2,06	3,53	8,92	0,18	2,88
+ ФГ 2 т/га	12,31	3,33	2,57	5,56	11,43	0,18	2,93
+ ФГ 4 т/га	11,79	3,37	2,55	5,59	11,43	0,18	2,93
+ ФГ 6 т/га	12,11	3,37	2,55	5,56	11,59	0,18	2,93
+ ФГ 8 т/га	11,79	3,55	2,55	5,48	14,01	0,18	2,87
Бутонизация							
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	6,87	3,33	1,40	3,09	8,65	0,16	3,21
+ ФГ 2 т/га	11,28	3,33	1,30	5,13	10,34	0,17	3,07
+ ФГ 4 т/га	11,28	3,37	1,29	5,13	10,29	0,17	3,07
+ ФГ 6 т/га	11,28	3,37	1,39	5,13	10,29	0,16	3,07
+ ФГ 8 т/га	11,28	3,55	1,58	5,00	13,59	0,16	3,08
Начало цветения							
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	7,08	2,56	1,30	5,56	8,58	0,12	2,80
+ ФГ 2 т/га	11,58	2,69	1,02	6,18	9,95	0,13	3,00
+ ФГ 4 т/га	11,58	2,69	1,06	6,23	9,95	0,13	3,00
+ ФГ 6 т/га	11,89	2,74	1,06	6,23	9,95	0,13	3,00
+ ФГ 8 т/га	11,89	2,75	1,23	6,17	12,25	0,13	3,04
Клубнеобразование							
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	6,15	2,54	1,23	5,70	8,46	0,11	2,71
+ ФГ 2 т/га	10,27	2,62	1,06	6,04	10,47	0,15	2,85
+ ФГ 4 т/га	10,27	2,78	1,09	6,11	10,47	0,14	2,77
+ ФГ 6 т/га	10,27	2,57	1,06	5,88	10,94	0,15	2,69
+ ФГ 8 т/га	10,00	2,70	1,06	5,74	12,31	0,14	2,62
Формирование кожуры /уборка							
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	6,25	2,41	1,25	5,82	7,25	0,11	2,69
+ ФГ 2 т/га	10,56	2,45	0,96	5,69	10,73	0,14	2,54
+ ФГ 4 т/га	10,56	2,38	0,98	5,69	10,73	0,14	2,54
+ ФГ 6 т/га	9,72	2,40	0,96	5,69	10,86	0,14	2,46
+ ФГ 8 т/га	9,72	2,29	0,96	5,68	11,43	0,15	2,46

Так в период от всходов до начала цветения максимальная подвижность выявлена при внесении 8 т/га ФГ – 2,75-3,55 %, что на 0,15-0,22% выше фоновых значений. В фазу клубнеобразования максимальная подвижность свинца оказалась на варианте опыта с применением 4 т/га ФГ – 2,78 %, что на 0,24% превышает фон. К моменту уборки наиболее подвижным свинец был на варианте опыта 2 т/га ФГ – 2,45%. С увеличением дозы фосфогипса подвижность снижается и становится минимальной при внесении 8 т/га мелиоранта – 2,29% или на 0,12% меньше фонового показателя. В процессе вегетации подвижность свинца снижается, достигая

наименьших значений перед уборкой, в фазу формирования кожуры. Показатели на 0,59-0,99% ниже, чем в фазу всходов.

Относительная концентрация подвижной меди к валовому содержанию составила 0,96-2,57%. В фазу полных всходов внесение ФГ во всех применяемых дозах повышает подвижность в среднем на 0,5% относительно фонового варианта. На стадии бутонизации подвижность меди в почве была максимальной при внесении 8 т/га ФГ – 1,58%, что на 0,18% выше значения, полученного при внесении только минеральных удобрений $N_{150}P_{150}K_{300}$. С начала цветения закономерность подвижности меди меняется на противоположную: максимальные значения отмечены на фоновом варианте, а дополнительное применение ФГ снижает данный показатель на 0,07-0,29%. К концу вегетации подвижность меди снижается, достигая своих минимальных значений к моменту уборки урожая. Подвижность ниже, чем в фазу всходов на 0,81-0,61% или в 1,7-2,7 раз.

Подвижность цинка составила 3,09-6,23%. В период от полных всходов до клубнеобразования внесение фосфогипса увеличивало подвижность металла до 2 %, причем с течением вегетации данная разница сокращается. В данный период наименьшая подвижность выявлена на фоновом варианте. В фазу формирования кожуры подвижность цинка по вариантам опыта выравнивается и составляет от 5,82 на фоне минеральных удобрений $N_{150}P_{150}K_{300}$ до 5,68% на варианте опыта с внесением в почву 8 т/га фосфогипса. На данном этапе вегетационного периода картофеля ФГ способствует незначительному снижению подвижности металла по сравнению с фоновым значением на 0,13-0,14%. В целом, подвижность цинка заметно возрастает при переходе от фазы бутонизации к цветению в среднем на 1,0-2,5% по сравнению с предыдущей фазой. Далее к наступлению фаз клубнеобразования и формирования кожуры подвижность снижается на 0,06-0,43%.

Подвижность марганца была в пределах 7,25-14,01%. На всех стадиях развития картофеля выявлена закономерность увеличения подвижности металла при внесении в почву ФГ: на 1,37-3,61% при дозах фосфогипса 2-6 т/га и 3,67-5,09% при внесении 8 т/га ФГ относительно фонового варианта опыта. Таким образом,

наименее подвижен марганец при внесении только минеральных удобрений, значения подвижности равны 7,25-8,92%. В основном, подвижность марганца снижается во времени и к концу вегетации становится на 1,70-2,58% по сравнению с фазой всходов.

Процентное содержание подвижного железа относительно валового составило 0,11-0,18%. В начале вегетации в фазы всходов и бутонизации внесение ФГ не оказало влияние на изменение подвижности металла относительно фонового варианта. Значения были в пределах 0,16-0,18%, что было максимальным для всего периода развития картофеля. К началу цветения подвижность значительно снижается до 0,12-0,13%, что является минимальными показателями. Причем при внесении ФГ подвижность железа выше на 0,01% по сравнению с фоном минеральных удобрений $N_{150}P_{150}K_{300}$. В период клубнеобразования и формирования кожуры также отмечается повышение подвижности металла при внесении ФГ на 0,03-0,04% относительно фона. По сравнению с фазой начала цветения подвижность возросла в среднем на 0,02%, однако в целом за период вегетации подвижность снизилась на 0,03-0,07%.

Подвижность никеля была от 2,46 до 3,21%. В фазы всходов и начала цветения ФГ повышает подвижность никеля относительно фона на 0,05 -0,24%, а в фазы бутонизации и формирования кожуры наоборот повышает подвижность металла в среднем на 0,19%. На стадии клубнеобразования внесение ФГ влияет неоднозначно. При переходе от фазы всходов к бутонизации подвижность никеля возрастает в среднем на 0,23%, а после стадии бутонизации и до конца вегетации – снижается, достигая минимума к моменту уборки урожая.

По полученным значениям концентрации подвижных форм ТМ были рассчитаны коэффициенты K_c , которые позволяют установить, рассеивается или накапливается данный элемент в почве относительно его фонового содержания в почвах региона (табл. 4.1.5).

Таблица 4.1.5 – Коэффициенты накопления (Кс) тяжелых металлов
при различных дозах внесения фосфогипса, 2021-2024 гг.

Вариант	Элемент						
	Cd	Pb	Cu	Zn	Mn	Fe	Ni
Полные всходы							
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	1,30	0,15	0,07	0,02	0,04	0,97	0,84
+ФГ 2 т/га	1,20	0,14	0,09	0,04	0,05	0,94	0,80
+ФГ 4 т/га	1,15	0,14	0,09	0,04	0,05	0,94	0,80
+ФГ 6 т/га	1,15	0,14	0,09	0,04	0,05	0,94	0,80
+ФГ 8 т/га	1,15	0,14	0,09	0,04	0,06	0,97	0,78
Бутонизация							
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	1,15	0,14	0,05	0,02	0,04	0,84	0,84
+ФГ 2 т/га	1,10	0,14	0,04	0,03	0,04	0,87	0,80
+ФГ 4 т/га	1,10	0,14	0,04	0,03	0,04	0,87	0,80
+ФГ 6 т/га	1,10	0,14	0,05	0,03	0,04	0,87	0,80
+ФГ 8 т/га	1,10	0,14	0,05	0,03	0,06	0,87	0,78
Начало цветения							
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	1,15	0,13	0,05	0,03	0,04	0,63	0,76
+ФГ 2 т/га	1,10	0,13	0,04	0,04	0,04	0,65	0,76
+ФГ 4 т/га	1,10	0,13	0,04	0,04	0,04	0,64	0,76
+ФГ 6 т/га	1,10	0,13	0,04	0,04	0,04	0,64	0,76
+ФГ 8 т/га	1,10	0,12	0,04	0,04	0,05	0,65	0,75
Клубнеобразование							
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	1,00	0,13	0,04	0,03	0,03	0,60	0,69
+ФГ 2 т/га	0,95	0,12	0,03	0,03	0,04	0,60	0,67
+ФГ 4 т/га	0,95	0,12	0,03	0,04	0,04	0,60	0,65
+ФГ 6 т/га	0,95	0,12	0,03	0,03	0,04	0,60	0,64
+ФГ 8 т/га	0,95	0,12	0,03	0,03	0,05	0,61	0,62
Формирование кожуры /уборка							
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	1,00	0,12	0,04	0,03	0,03	0,56	0,64
+ФГ 2 т/га	0,95	0,11	0,03	0,03	0,04	0,56	0,60
+ФГ 4 т/га	0,95	0,11	0,03	0,03	0,04	0,57	0,60
+ФГ 6 т/га	0,88	0,11	0,03	0,03	0,04	0,57	0,58
+ФГ 8 т/га	0,88	0,11	0,03	0,03	0,04	0,60	0,58

Для кадмия значения Кс колебались в пределах 0,88-1,30, для железа – 0,56-0,97, для никеля – 0,58-0,84. Концентрация этих элементов оказалась наиболее близкой к региональному фоновому значению. Рассеивающимися элементами являются свинец (Кс=0,11-0,15), медь (Кс=0,03-0,09), марганец (Кс=0,03-0,06) и цинк (Кс=0,02-0,04), причем относительные концентрации меди, марганца и цинка во многих вариантах опыта были близки или равнялись.

При внесении фонового удобрения по значениям Кс элементов можно составить следующие геохимические индексы. В фазу всходов и бутонизации последовательность элементов: Cd-Fe-Ni-Pb-Cu-Mn-Zn. На стадии цветения последовательность меняется: Cd-Ni-Fe-Pb-Cu-Mn-Zn, в остальной период развития картофеля геохимический индекс можно описать выражением:

$$\text{Cd Ni Fe} \frac{1}{\text{Pb Mn Cu Zn}}$$

При внесении ФГ во всех дозах на начальных этапах развития картофеля распределение элементов по значениям их Кс одинаково. Геохимический индекс в этом случае представлен следующей дробью:

$$\text{Cd Fe Ni} \frac{1}{\text{Pb Cu Mn Zn}}$$

С начала цветения происходят изменения относительной концентрации железа и никеля, железо становится более рассеивающимся элементом и переходит на 3 позицию. В период с клубнеобразования и до формирования кожуры концентрация марганца становится выше, чем у меди. В этом случае геохимический индекс выглядит следующим образом:

$$\text{Cd Ni Fe} \frac{1}{\text{Pb Mn Cu Zn}}$$

В целом, можно отметить, что относительная концентрация кадмия, железа и никеля всегда превышает 0,5 и данные элементы не являются ни рассеивающимися, ни накапливающимися, концентрация подвижных форм близка к региональному фоновому значению. Свинец, медь, марганец и цинк имеют значения Кс меньше 0,5, следовательно, составляют ассоциацию рассеивающихся элементов. При этом наибольшая концентрация всегда у свинца, а относительные концентрации меди, марганца и цинка близки друг к другу. Однако, в фазы клубнеобразования и формирования кожуры последовательность трех элементов следующая: Mn - Cu - Zn. По средним значениям Кс элементов можно составить геохимический индекс:

$$\text{Cd}(1,06)\text{Fe}(0,73) \text{ Ni}(0,72) \frac{1}{\text{Pb}(0,13) \text{ Cu}(0,05) \text{ Mn}(0,04) \text{ Zn}(0,03)}$$

В некоторых вариантах опыта на разных стадиях развития картофеля последовательность этих элементов в геохимическом ряду меняется: в большинстве случаев при внесении минеральных удобрений и ФГ последовательность: Cu-Mn-Zn.

4.2. Влияние фосфогипса на накопления тяжелых металлов почвой под растениями картофеля сорта Гала

Валовое содержание всех изучаемых металлов в почве находилось в 2,8-7,3 раз ниже ПДК (табл. 4.2.1).

Таблица 4.2.1 – Валовое содержание тяжелых металлов в почве под участками картофеля сорта Гала по фазам развития, мг/кг

Вариант	Элемент						
	Cd	Pb	Cu	Zn	Mn	Fe	Ni
Полные всходы							
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	0,67	11,6	10,7	17,0	210	4120	17,0
+ ФГ 2 т/га	0,38	9,8	9,2	14,0	210	3330	15,0
+ ФГ 4 т/га	0,38	9,7	9,4	14,0	220	3890	15,0
+ ФГ 6 т/га	0,36	9,8	9,8	14,0	210	3120	15,0
+ ФГ 8 т/га	0,38	11,4	8,5	17,0	220	3890	15,0
Бутонизация							
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	0,69	11,4	10,3	17,0	208	4130	15,0
+ ФГ 2 т/га	0,39	9,8	9,3	14,0	208	3330	14,0
+ ФГ 4 т/га	0,39	9,7	9,4	14,0	218	3880	14,0
+ ФГ 6 т/га	0,38	9,8	9,9	14,0	209	3110	14,0
+ ФГ 8 т/га	0,39	11,4	8,8	17,0	218	3850	14,0
Начало цветения							
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	0,72	9,6	11,3	17,3	208	4100	15,0
+ ФГ 2 т/га	0,41	9,7	10,8	14,2	208	3200	14,0
+ ФГ 4 т/га	0,41	9,6	10,4	14,3	218	3600	14,0
+ ФГ 6 т/га	0,42	9,4	10,8	14,2	208	3000	16,0
+ ФГ 8 т/га	0,44	10,2	10,5	17,2	216	3600	16,0
Клубнеобразование							
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	0,67	11,2	10,3	17,0	212	4100	16,0
+ ФГ 2 т/га	0,38	10,8	9,8	14,0	211	3300	14,0
+ ФГ 4 т/га	0,38	10,4	9,4	14,0	222	3800	13,0
+ ФГ 6 т/га	0,36	9,9	9,8	14,0	212	3100	16,0
+ ФГ 8 т/га	0,38	10,4	8,5	17,0	222	3800	16,0
Формирование кожуры /уборка							
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	0,64	11,2	9,3	17,0	215	4100	15,0
+ ФГ 2 т/га	0,35	10,6	8,8	14,0	212	3300	13,0
+ ФГ 4 т/га	0,35	10,2	8,4	14,0	223	3800	13,0
+ ФГ 6 т/га	0,35	10,1	8,8	14,0	215	3100	15,0
+ ФГ 8 т/га	0,35	10,3	7,5	17,0	225	3800	15,0
ФОН	0,66	13,40	26,5	75,5	687,7	33592	28,2
ПДК	2	32	55	100	1500	-	85

Содержание кадмия в почве варьировало в пределах 0,35-0,72 мг/кг, что в 2,8-5,7 раз меньше ПДК. Наибольшая концентрация металла в почве была отмечена в фазу цветения (0,41-0,72 мг/кг), и содержание на варианте с применением минеральных удобрений. Превышение фонового значения кадмия в почвах Самарской области на 0,06 мг/кг отмечено на варианте с внесением $N_{150}P_{150}K_{300}$. На остальных вариантах опыта содержание кадмия ниже регионального значения в 2 раза. В целом, внесение ФГ снижало содержание кадмия на 43-46 % по сравнению с вариантом внесения минеральных удобрений $N_{150}P_{150}K_{300}$.

Валовое количество свинца в опыте колебалось от 9,4-11,6 мг/кг. Данные значения оказались ниже ПДК в 3 раза. Внесение фосфогипса снижало значение относительно фонового варианта до 3,0 мг/кг. Наименьшая концентрация свинца обнаружена при применении ФГ в дозе 4 и 6 т/га относительно фона $N_{150}P_{150}K_{300}$ значение снизилось на 2,1-16,4%. В период от всходов до цветения внесение 8 т/га ФГ повышает концентрацию металла в почве относительно предыдущих вариантов опыта и в фазу начала цветения превышает значение фонового варианта на 9%.

На посевах картофеля сорта Гала содержание в почве меди составляло от 7,5 до 11,3 мг/кг, наибольшие концентрации отмечены на фоне минеральных удобрений $N_{150}P_{150}K_{300}$, они равнялись 9,3-11,3 мг/кг. Внесение ФГ снижает содержание меди на 0,4-2,2 мг/кг относительно фонового варианта. Наибольшее снижение содержания меди – 23% в фазу всходов выявлено на варианте опыта ФОН + ФГ 8 т/га. Максимальное количество меди отмечено к началу цветения (10,4-11,3 мг/кг), а самое низкое перед уборкой урожая, в фазу формирования кожуры (7,5-9,3 мг/кг).

Цинк содержался в почвах в количестве 14,0-17,3 мг/кг, причем данное содержание не менялось в течение вегетационного периода картофеля сорта Гала. Только на стадии цветения количество цинка возросло на 0,1-0,3 мг/кг. Максимальное значение, равное 17,0-17,3 мг/кг, было характерно для фонового варианта и при внесении 8 т/га фосфогипса. Внесение ФГ в нормах 2-6 т/га снижает количество цинка в среднем на 3 мг/кг или 17%.

Концентрация марганца в почве варьировала от 208 до 225 мг/кг, что ниже ПДК в 7 раз. Наибольшая концентрация выявлена при внесении 4 и 8 т/га фосфогипса – 216-225 мг/кг, что на 3,7-9,5 % больше относительно фона. Применение 2 и 6 т/га не влияло на содержание марганца в почве.

Валовое содержание железа в исследуемой почве составило 3000-4130 мг/кг, что ниже регионального фонового значения в 8-11 раз. Наибольшие значения выявлены на фоне применения минеральных удобрений $N_{150}P_{150}K_{300}$, равные 4100-4130 мг/кг. ФГ способствует снижению концентрации железа на четверть относительно фонового варианта. Минимальные значения во все фазы развития картофеля выявлены при внесении 6 т/га ФГ, что на 24-27% ниже концентрации на фоновом варианте опыта.

Под участками картофеля сорта Гала содержание никеля составило от 13,0 до 17,0 мг/кг, наибольшие значения выявлены на фоновом варианте, а также на вариантах опыта с внесением фосфогипса в норме 6 и 8 т/га в фазы начала цветения и клубнеобразования. Превышение относительно фонового варианта составляет 6,7%. В целом, содержание никеля почти не меняется в течение вегетации, снижаясь в среднем на 2 мг/кг к моменту формирования кожуры относительно фазы всходов.

Применение фосфогипса одинаково влияет на валовое содержание кадмия в почве и составляет на всех вариантах в среднем 0,38 мг/кг, что отличается от фонового варианта в среднем на 0,30 мг/кг или на 45%. Происходит снижение концентрации свинца на 2,1-16,4%, меди до 7,9-20,5%, цинка до 17%, железа до 24-27%. Количество марганца выросло на 3,7-9,5% при внесении 4 и 8 т/га, а на вариантах применения 2 и 6 т/га количество марганца относительно фонового варианта не изменилось.

В течение вегетационного периода с фазы всходов и до начала цветения содержание кадмия в почве увеличивается на 0,03-0,06 мг/кг, а затем до формирования кожуры снижается на 0,05-0,08 мг/кг. В начальные фазы развития картофеля концентрация кадмия не меняется, а с момента бутонизации и до начала цветения уменьшается на 0,1-1,8 мг/кг. До клубнеобразования картофеля количество свинца

в почве увеличивается на 0,2-1,6 мг/кг, а к моменту наступления формирования кожуры вновь снижается до 0,2 мг/кг.

Содержание меди в почве возрастает с начала образования до периода цветения на 0,3-1,7 мг/кг, затем уменьшается и к фазе формирования кожуры составляет на 0,4-2 мг/кг меньше, чем в почве в момент всходов. До фазы бутонизации концентрация цинка в почве не изменялась. К началу цветения металла в почве становится на 0,1-0,3 мг/кг больше, чем на начальном этапе развития картофеля. В фазу клубнеобразования валовое содержание цинка в почве снижается до первоначального уровня на стадии всходов, и до момента формирования кожуры эти значения не меняются.

Содержание марганца в почве в фазу бутонизации уменьшилась в среднем до 6 мг/кг по сравнению со значениями, полученными в период всходов. Однако, с начала цветения и до уборки картофеля концентрация металла увеличилась и составила 185-225 мг/кг, что на 2-5 мг/кг больше от первоначальных значений.

В период от всходов до начала цветения валовое содержание железа в почве снижается на 20-290 мг/кг, а до клубнеобразования увеличивается на 100-200 мг/кг и до момента уборки не меняется.

Для никеля отмечена закономерность: с всходов до бутонизации концентрация металла в почве уменьшилась на 1-2 мг/кг. К началу цветения количество элемента в почве выросло только на вариантах Фон +ФГ 6 и 8 т/га. С клубнеобразования и до уборки происходит снижение концентрации никеля в почве на 1 мг/кг относительно предыдущей фазы и до 3 мг/кг по сравнению с начальной фазой развития растений.

Коэффициент концентрации или относительная концентрация химического элемента (K_c) позволяет судить о том, во сколько раз содержание химического элемента в исследуемом образце почвы отличается от его регионального фоновое содержания. Расчетами установлено, что коэффициенты концентрации всех изучаемых элементов не превышают 1 (за исключением кадмия на фоновом варианте, где $K_c=1,02-1,09$). Следовательно, металлы в почве содержатся в концентрациях ниже

фоновое региональное значение. Только концентрация кадмия оказалась наиболее близкой к фону и Кс равнялся от 0,67 до 1,09. Для свинца Кс составил от 0,70 до 0,87. Далее по убыванию относительной концентрации расположились: никель (Кс=0,46-0,60), медь (Кс=0,28-0,43), марганец (Кс= 0,30-0,33), цинк (Кс= 0,19-0,23) и железо (Кс= 0,09-0,12) (табл.4.2.2).

Таблица 4.2.2 – Коэффициенты концентрации тяжелых металлов в почве под участками картофеля сорта Гала по фазам развития

Вариант	Элемент						
	Cd	Pb	Cu	Zn	Mn	Fe	Ni
Полные всходы							
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	1,02	0,87	0,40	0,23	0,31	0,12	0,60
+ ФГ 2 т/га	0,58	0,73	0,35	0,19	0,31	0,10	0,53
+ ФГ 4 т/га	0,58	0,72	0,35	0,19	0,32	0,12	0,53
+ ФГ 6 т/га	0,55	0,73	0,37	0,19	0,31	0,09	0,53
+ ФГ 8 т/га	0,58	0,85	0,32	0,23	0,32	0,12	0,53
Бутонизация							
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	1,05	0,85	0,39	0,23	0,30	0,12	0,53
+ ФГ 2 т/га	0,59	0,73	0,35	0,19	0,30	0,10	0,50
+ ФГ 4 т/га	0,59	0,72	0,35	0,19	0,32	0,12	0,50
+ ФГ 6 т/га	0,58	0,73	0,37	0,19	0,30	0,09	0,50
+ ФГ 8 т/га	0,59	0,85	0,33	0,23	0,32	0,11	0,50
Начало цветения							
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	1,09	0,72	0,43	0,23	0,30	0,12	0,53
+ ФГ 2 т/га	0,62	0,72	0,41	0,19	0,30	0,10	0,50
+ ФГ 4 т/га	0,62	0,72	0,39	0,19	0,32	0,11	0,50
+ ФГ 6 т/га	0,64	0,70	0,41	0,19	0,30	0,09	0,57
+ ФГ 8 т/га	0,67	0,76	0,40	0,23	0,31	0,11	0,57
Клубнеобразование							
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	1,02	0,84	0,39	0,23	0,31	0,12	0,57
+ ФГ 2 т/га	0,58	0,81	0,37	0,19	0,31	0,10	0,50
+ ФГ 4 т/га	0,58	0,78	0,35	0,19	0,32	0,11	0,46
+ ФГ 6 т/га	0,55	0,74	0,37	0,19	0,31	0,09	0,57
+ ФГ 8 т/га	0,58	0,78	0,32	0,23	0,32	0,11	0,57
Формирование кожуры /уборка							
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	0,97	0,84	0,35	0,23	0,31	0,12	0,53
+ ФГ 2 т/га	0,53	0,79	0,33	0,19	0,31	0,10	0,46
+ ФГ 4 т/га	0,53	0,76	0,32	0,19	0,32	0,11	0,46
+ ФГ 6 т/га	0,53	0,75	0,33	0,19	0,31	0,09	0,53
+ ФГ 8 т/га	0,53	0,77	0,28	0,23	0,33	0,11	0,53

По усредненным значениям коэффициентов концентрации можно составить следующий геохимический индекс:

$$Pb(0,77) Cd(0,6)Ni(0,52) \frac{1}{Cu(0,36)Mn(0,31)Zn(0,20)Fe(0,11)},$$

из которого видно, что свинец, кадмий и никель являются элементами с концентрациями близкими к фоновому значению, а медь, марганец, цинк и железо – рассеивающиеся, при этом накапливающихся элементов в исследуемых почвах не выявлено. Большинство вариантов опыта, независимо от фазы развития картофеля, имеют данную последовательность элементов по убыванию их Кс.

Вариант с внесением в почву минеральных удобрений в дозе $N_{150}P_{150}K_{300}$ отличается последовательностью свинца и кадмия, и перед уборкой урожая (в фазу формирования кожуры) индекс описывается выражением:

$$Cd(0,97) Pb(0,84) Ni(0,53) \frac{1}{Cu(0,35) Mn(0,31) Zn(0,23) Fe(0,12)}$$

Таким образом, прослеживаются общие закономерности распределения металлов в почве по сравнению с фоновым содержанием черноземных почв Самарской области: накапливающийся элемент в основном – кадмий, потому что его близка по значениям к фоновому содержанию в почвах. Ассоциация накапливающихся и рассеивающихся элементов относительно регионального содержания в почвах под картофелем сорта Гала представлена убывающим рядом: свинец-кадмий-никель-медь-марганец-цинк-железо.

Концентрация подвижного кадмия в почве варьировала в пределах 0,033-0,046 мг/кг, что в 40-60 раз ниже ПДК (табл.4.2.3). Наибольшие значения характерны для фонового варианта на всех стадиях развития картофеля. В фазу всходов внесение ФГ в норме 2 т/га снизило содержание кадмия на 0,006 мг/кг относительно фона. Дальнейшее увеличение нормы ФГ увеличивало концентрацию металла на 0,001-0,003 мг/кг. Однако значения были ниже, чем на варианте применения минеральных удобрений $N_{150}P_{150}K_{300}$ на 6,5-10,9%.

В остальные периоды развития картофеля также происходило снижение количества подвижного кадмия в почве по сравнению с фоновым вариантом в среднем на 2,7-8,3%, причем при увеличении дозы вносимого ФГ происходило уменьшение концентрации Cd относительно варианта с применением только минеральных удобрений.

**Таблица 4.2.3 – Содержание подвижной формы тяжелых металлов в почве
под участками картофеля сорта Гала по фазам развития, мг/кг
(экстрагент ацетатно-аммонийный буфер рН 4,8)**

Вариант	Элемент						
	Cd	Pb	Cu	Zn	Mn	Fe	Ni
Полные всходы							
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	0,046	0,23	0,16	0,65	19,0	7,44	0,46
+ ФГ 2 т/га	0,040	0,24	0,18	0,94	26,0	6,55	0,43
+ ФГ 4 т/га	0,041	0,22	0,16	0,96	29,0	6,32	0,42
+ ФГ 6 т/га	0,041	0,23	0,14	0,96	29,0	6,36	0,42
+ ФГ 8 т/га	0,043	0,24	0,14	0,98	31,0	6,44	0,44
Бутонизация							
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	0,036	0,28	0,14	0,55	17,0	6,42	0,45
+ ФГ 2 т/га	0,035	0,22	0,17	0,73	22,0	5,51	0,41
+ ФГ 4 т/га	0,035	0,21	0,15	0,72	25,0	5,33	0,40
+ ФГ 6 т/га	0,034	0,22	0,13	0,73	24,0	5,34	0,39
+ ФГ 8 т/га	0,034	0,23	0,13	0,78	25,0	5,42	0,41
Начало цветения							
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	0,036	0,19	0,15	0,75	15,5	4,44	0,41
+ ФГ 2 т/га	0,035	0,17	0,21	0,83	19,0	4,42	0,40
+ ФГ 4 т/га	0,035	0,17	0,22	0,82	20,0	4,33	0,39
+ ФГ 6 т/га	0,033	0,18	0,23	0,83	21,0	4,32	0,37
+ ФГ 8 т/га	0,033	0,18	0,23	0,86	22,0	4,44	0,39
Клубнеобразование							
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	0,036	0,23	0,17	0,65	14,0	4,32	0,40
+ ФГ 2 т/га	0,035	0,21	0,22	0,73	20,0	4,12	0,39
+ ФГ 4 т/га	0,035	0,21	0,20	0,71	21,0	4,12	0,37
+ ФГ 6 т/га	0,033	0,23	0,20	0,72	20,0	4,00	0,36
+ ФГ 8 т/га	0,033	0,25	0,20	0,74	22,0	4,18	0,37
Формирование кожуры /уборка							
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	0,036	0,20	0,17	0,64	13,0	4,42	0,39
+ ФГ 2 т/га	0,035	0,21	0,19	0,69	20,0	3,53	0,37
+ ФГ 4 т/га	0,035	0,21	0,18	0,70	23,0	3,18	0,34
+ ФГ 6 т/га	0,033	0,20	0,19	0,70	24,0	3,36	0,34
+ ФГ 8 т/га	0,033	0,22	0,19	0,72	23,0	3,44	0,35
ФОН	0,04	2,3	3	24,9	493,1	7,67	0,55
ПДК	2	6	3	23	100	-	4,0

Содержание в почве подвижных форм свинца было 0,17-0,28 мг/кг, что в 21-35 раз меньше установленных норм (ПДК). Максимальные значения в фазы всходов, клубнеобразования и формирования кожуры выявлены на варианте применения 8 т/га ФГ (на 4-10% выше фонового варианта), а в фазу бутонизации и цветения – на фоне минеральных удобрений N₁₅₀P₁₅₀K₃₀₀. Внесение фосфогипса не зависимо от нормы применения способствовало снижению количества подвижного свинца до 25 % в фазу бутонизации и до 10 % в период цветения.

Значения концентрации подвижных форм меди варьировали от 0,13 до 0,23 и ниже ПДК в 13-23 раза. Наибольшее содержание подвижной меди в почве отмечено в фазу цветения на вариантах применения 6 и 8 т/га. В остальные фазы развития картофеля наибольшая концентрация меди выявлена при внесении 2 т/а ФГ. Значения превышали фоновый вариант на 12-29 %. Применение фосфогипса в дозах 6-8 т/га в начале вегетации привело к снижению содержания меди на 7,1-12,5% по отношению к фону. На стадии начала цветения отмечено превышение концентрации меди на 40-53% на всех вариантах применения ФГ.

Количество подвижного цинка было во 25-45 раз ниже значений ПДК и составило от 0,55 до 0,98 мг/кг. Применение фосфогипса увеличивает концентрацию подвижных форм цинка на 7,8-50,8% относительно фонового варианта. При этом с увеличением дозы фосфогипса концентрация металла в почве в основном возрастает, достигая наибольших значений на варианте применения ФГ в норме 8 т/га. Полученные концентрации отличаются от предыдущих вариантов на 0,01-0,05 мг/кг и выше фонового варианта опыта на 50,7 и 41,8 % в период всходов и бутонизации и на-14,7, 13,8 и 12,5% в фазы цветения, клубнеобразования и формирования кожуры соответственно.

Подвижные формы марганца находились в концентрациях 13,0-32,0 мг/кг почвы, что ниже ПДК в 3-7 раз. Дополнительное применение ФГ в сочетании с минеральными удобрениями $N_{150}P_{150}K_{300}$ увеличивает содержание металла в почве до 19-32 мг/кг, что в 1,2-1,9 раз превышает фоновый вариант. В целом, повышение дозы вносимого фосфогипса ведет к возрастанию концентрации подвижного марганца в почве. Максимальные значения выявлены при внесении повышенной нормы ФГ – 8 т/га. Концентрация марганца на 42-77% выше фонового варианта опыта.

Содержание подвижного железа в исследуемой почве находилось в пределах 3,18-7,44 мг/кг, максимальные концентрации выявлены в фазу всходов. В течение развития картофеля содержание железа в почве снижалось относительно предыдущей фазы. По всем фазам развития выявлены общие закономерности: наибольшая

концентрация подвижного железа была на фоновом варианте. Дополнительное внесение в почву ФГ снижает количество железа относительно фона на 3-28%. Наименьшая концентрация выявлена в течение всего вегетационного периода на вариантах с внесением фосфогипса в нормах 4-6 т/га меньше фона в среднем на 14%.

Количество подвижной формы никеля в почвах варьировало от 0,34 до 0,46 мг/кг и было ниже ПДК в 9-12 раз. Внесение фосфогипса по сравнению с фоновым минеральных удобрений $N_{150}P_{150}K_{300}$ снижает количество подвижных форм никеля на 0,01-0,07 мг/кг. С увеличением дозы фосфогипса до 6 т/га наблюдается снижение концентрации никеля в среднем на 7 % по отношению к вариантам ФОН + ФГ 2 т/га. Применение максимальной дозы мелиоранта (8 т/га) приводило во всех фазах развития картофеля к незначительному повышению концентрации металла в почве на 2,8-5,4% по сравнению с предыдущим вариантом (ФОН + ФГ 6 т/га).

Наибольшие концентрации подвижного кадмия, железа и никеля во все фазы развития выявлены на фоновом варианте. Максимальные значения подвижных форм цинка были на вариантах при внесении ФГ в дозе 8 т/га. В большинстве случаев минимальное содержание свинца в почве было в вариантах ФОН + ФГ в норме от 2 до 4 т/га. В период от появления всходов до бутонизации наименьшая концентрация меди выявлена при внесении 6-8 т/га фосфогипса, а с начала цветения – на фоновом варианте.

Анализируя динамику изменения концентрации подвижных форм металлов в почве в зависимости от фазы развития картофеля, можно отметить следующие закономерности. Количество кадмия снижается с момента всходов и до начала цветения. К фазе формирования кожуры концентрация металла в почве не меняется относительно предыдущих фаз.

На начальных этапах развития картофеля (до начала цветения) наблюдается снижение содержания свинца за исключением варианта ФОН в фазу всходов. С начала цветения до клубнеобразования происходит увеличение концентрации подвижного свинца, а к моменту уборки картофеля – количество металла в основном снижается или не меняется.

Концентрация подвижных форм меди увеличивается только с фазы бутонизации. С клубнеобразования и до уборки количество подвижных форм меди в основном снижается или остается неизменным. Аналогичная тенденция характерна для цинка.

Количество марганца в почве с фазы всходов до начала цветения снижается, а до клубнеобразования практически не меняется. До формирования кожуры также происходит уменьшение подвижного марганца на фоновом варианте, а при внесении фосфогипса наоборот, выявлено повышение концентрации относительно предыдущих фаз развития картофеля.

Для железа и никеля выявлена одинаковая закономерность в распределении металлов в почве по фазам развития картофеля: в течение вегетации происходит снижение концентрации металлов в почве, что вероятно связано с активным потреблением данных элементов питания картофелем в течении всего вегетационного периода. Исключением являлись только фоновый вариант в период клубнеобразования – формирования кожуры, где было увеличение содержания железа по сравнению с предыдущей фазой.

Таким образом, можно заключить, дополнительное внесение ФГ с минеральными удобрениями $N_{150}P_{150}K_{300}$ способствует снижению концентрации подвижных форм Cd, Pb, Fe, Ni по сравнению с фоном.

Подвижность кадмия составила от 5,00-11,39%, наибольшие значения отмечены в фазу всходов 6,87-11,39% (табл. 4.2.4). Минимальная подвижность кадмия – на фоновом варианте. Дополнительное применение фосфогипса увеличило подвижность кадмия относительно фона в среднем до 3,5-4,5%.

Значения концентрации подвижных форм свинца от валового содержания металла оказались практически одинаковыми в разные фазы развития картофеля и составила 1,75-2,46 %. Наибольшие значения в фазу бутонизации и цветения выявлены на фоновом варианте опыта, а в период от клубнеобразования до уборки – на варианте применения ФГ в дозе 8 т/га. Значения на 0,35 абс. % превышают фон. Внесение фосфогипса во всех дозах повышает значения подвижности свинца в

среднем на 0,1-0,4% за исключением фаз бутонизации и цветения, где фосфогипс дополнительно снизил значения на 0,1-0,5%.

Таблица 4.2.4 – Подвижность тяжелых металлов в почве под участками картофеля сорта Гала, %

Вариант	Элемент						
	Cd	Pb	Cu	Zn	Mn	Fe	Ni
Полные всходы							
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	6,87	1,98	1,50	3,82	9,05	0,18	2,71
+ ФГ 2 т/га	10,53	2,45	1,96	6,71	12,38	0,20	2,87
+ ФГ 4 т/га	10,79	2,27	1,70	6,86	13,18	0,16	2,80
+ ФГ 6 т/га	11,39	2,35	1,43	6,86	13,81	0,20	2,80
+ ФГ 8 т/га	11,32	2,11	1,65	5,76	14,09	0,17	2,93
Бутонизация							
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	5,22	2,46	1,36	3,24	8,17	0,16	3,00
+ ФГ 2 т/га	8,97	2,24	1,83	5,21	10,58	0,17	2,93
+ ФГ 4 т/га	8,97	2,16	1,60	5,14	11,47	0,14	2,86
+ ФГ 6 т/га	8,95	2,24	1,31	5,21	11,48	0,17	2,79
+ ФГ 8 т/га	8,72	2,02	1,48	4,59	11,47	0,14	2,93
Начало цветения							
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	5,00	1,98	1,33	4,34	7,45	0,11	2,73
+ ФГ 2 т/га	8,54	1,75	1,94	5,85	9,13	0,14	2,86
+ ФГ 4 т/га	8,54	1,77	2,12	5,73	9,17	0,12	2,79
+ ФГ 6 т/га	7,86	1,91	2,13	5,85	10,10	0,14	2,31
+ ФГ 8 т/га	7,50	1,76	2,19	5,00	10,19	0,12	2,44
Клубнеобразование							
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	5,37	2,05	1,65	3,82	6,60	0,11	2,50
+ ФГ 2 т/га	9,21	1,94	2,24	5,21	9,48	0,12	2,79
+ ФГ 4 т/га	9,21	2,02	2,13	5,07	9,46	0,11	2,85
+ ФГ 6 т/га	9,17	2,32	2,04	5,14	9,43	0,13	2,25
+ ФГ 8 т/га	8,68	2,40	2,35	4,35	9,91	0,11	2,31
Формирование кожуры /уборка							
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	5,63	1,79	1,83	3,76	6,05	0,11	2,60
+ ФГ 2 т/га	10,00	1,98	2,16	4,93	9,43	0,11	2,85
+ ФГ 4 т/га	10,00	2,06	2,14	5,00	10,31	0,08	2,62
+ ФГ 6 т/га	9,43	1,98	2,16	5,00	11,16	0,11	2,27
+ ФГ 8 т/га	9,43	2,14	2,53	4,24	10,22	0,09	2,33

Подвижность меди варьировала в пределах 1,31-2,53%, а максимальных значений достигает в фазу формирования кожуры (1,83-2,53%). Наименьшая концентрация подвижной меди относительно валового содержания металла в почве (1,33-1,83%) выявлена на фоновом варианте в фазы цветения, клубнеобразования и формирования кожуры, а на стадии всходов и бутонизации - при внесении ФГ в норме 6 т/га - 1,43 % и 1,31 % соответственно. Данные значения на 0,05-0,07 абс. % ниже фонового варианта.

Отношение подвижных форм цинка к валовому содержанию металла в почве варьировало в пределах 3,24-6,86%, наибольшие значения выявлены в фазу всходов – от 3,82% на фоновом варианте и до 6,86 % при внесении в почву ФГ в норме 4 и 6 т/га. Внесение в почву ФГ во всех применяемых дозах увеличивает подвижность металла до 3,1% относительно фона, наибольшая разница выявлена при внесении 2-6 т/га фосфогипса. Применение повышенной нормы мелиоранта (8 т/га) снижает данный показатель по сравнению с меньшими дозами ФГ, но превышает фоновый вариант на 0,35-1,94%.

Подвижность марганца в опыте равнялась 6,05-14,09%. Максимальные значения были в фазу всходов (9,05-14,09%), а по мере развития картофеля подвижность снижалась и достигла своих наименьших значений в фазу формирования кожуры – от 6,05 % на фоне минеральных удобрений $N_{150}P_{150}K_{300}$ до 11,16% на варианте ФОН + ФГ 6 т/га. В целом, внесение ФГ значительно увеличивало подвижность марганца на 1,6-5,2%, относительно варианта применения минерального удобрения. Причем увеличение дозы фосфогипса приводит к росту подвижности металла, а максимальные значения во все фазы развития были получены при внесении 8 т/га ФГ за исключением фазы формирования кожуры. Превышение относительно фона составило в среднем 2,7-5,1%.

Подвижность железа в опыте была очень низкой и составила 0,08 до 0,20%. В фазу всходов подвижность металла составила 0,16-0,20%. К началу бутонизации подвижность железа несколько снизилась на 0,02-0,03%. С начала цветения и до формирования кожуры подвижность составила 0,11-0,14%, что в 1,4 раза ниже, чем в начале вегетации. Внесение ФГ практически не повлияло на изменение подвижности металла (подвижность возрастала и убывала на 0,01-0,02%). Таким образом, подвижность железа зависела только от фазы развития картофеля.

Отношение подвижной формы никеля к валовому содержанию металла находилось в пределах 2,25-3,00%. В фазу всходов внесение ФГ во всех нормах увеличивает подвижность никеля на 0,1-0,2% по сравнению с фоновым вариантом. В фазу бутонизации наоборот, снижает подвижность на 0,09-0,22%. В период от цветения до формирования кожуры при внесении 2-4 т/га ФГ показатели подвижности металла были выше фонового значения на 0,06-0,35%, а на вариантах опыта

с внесением в почву ФГ в нормах 6-8 т/га — уменьшение на 0,25-0,42%. В целом прослеживается тенденция снижения подвижности никеля в почве в течение вегетационного периода до 0,6% по сравнению с фазой всходов.

Таким образом, можно отметить, что подвижность кадмия снижается с фазы всходов до начала цветения, а далее до уборки возрастает. Подвижность свинца в основном падает в период всходов — начала цветения. К фазе клубнеобразования подвижность свинца растет, а к формированию кожуры в основном снижается. Процентное отношение подвижных форм меди относительно валового содержания уменьшается от фазы всходов к бутонизации, а далее до формирования кожуры подвижность металла в основном увеличивается или не меняется. Значения подвижности цинка снижается с фазы всходов до бутонизации и от начала цветения до формирования кожуры. С момента бутонизации до начала цветения подвижность цинка уменьшилась. Концентрация подвижных форм марганца относительно валового содержания металла в почве в основном снижается в течение всего вегетационного периода картофеля. Аналогичная закономерность наблюдается и для железа. Подвижность никеля по фазам развития картофеля меняется неоднозначно: с момента всходов до бутонизации возрастает на всех вариантах опыта, с начала цветения и до формирования кожуры в основном снижается.

Рассчитанный нами коэффициент концентрации (K_c) показывает, во сколько раз концентрация подвижных форм тяжелых металлов в исследуемом образце почвы отличается от его регионального фонового содержания (табл. 4.2.5). Расчетами установлено, что коэффициенты концентрации всех изучаемых элементов не превышают 1 (за исключением кадмия в фазу полных всходов) и металлы в почве содержатся в концентрациях ниже фонового регионального значения.

Относительные концентрации кадмия, железа и никеля приближаются к фоновым значениям, их $K_c > 0,5$. По предложению И. С. Михайлова с соавторами (1967) содержание элементов, относительная концентрация которых колеблется в пределах 0,5-1,5, считается близким к фоновому содержанию и эти элементы записываются в части, предваряющей дробь.

Таблица 4.2.5 – Коэффициенты концентрации тяжелых металлов под участками картофеля сорта Гала при различных уровнях фосфогипса в почве

Вариант	Элемент						
	Cd	Pb	Cu	Zn	Mn	Fe	Ni
Полные всходы							
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	1,15	0,10	0,05	0,03	0,04	0,97	0,84
+ ФГ 2 т/га	1,00	0,10	0,06	0,04	0,05	0,85	0,78
+ ФГ 4 т/га	1,03	0,10	0,05	0,04	0,06	0,82	0,76
+ ФГ 6 т/га	1,03	0,10	0,05	0,04	0,06	0,83	0,76
+ ФГ 8 т/га	1,08	0,10	0,05	0,04	0,06	0,84	0,80
Бутонизация							
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	0,90	0,12	0,05	0,02	0,03	0,84	0,82
+ ФГ 2 т/га	0,88	0,10	0,06	0,03	0,04	0,72	0,75
+ ФГ 4 т/га	0,88	0,09	0,05	0,03	0,05	0,69	0,73
+ ФГ 6 т/га	0,85	0,10	0,04	0,03	0,05	0,70	0,71
+ ФГ 8 т/га	0,85	0,10	0,04	0,03	0,05	0,71	0,75
Начало цветения							
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	0,90	0,08	0,05	0,03	0,03	0,58	0,75
+ ФГ 2 т/га	0,88	0,07	0,07	0,03	0,04	0,58	0,73
+ ФГ 4 т/га	0,88	0,07	0,07	0,03	0,04	0,56	0,71
+ ФГ 6 т/га	0,83	0,08	0,08	0,03	0,04	0,56	0,67
+ ФГ 8 т/га	0,83	0,08	0,08	0,03	0,04	0,58	0,71
Клубнеобразование							
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	0,90	0,10	0,06	0,03	0,03	0,56	0,73
+ ФГ 2 т/га	0,88	0,09	0,07	0,03	0,04	0,54	0,71
+ ФГ 4 т/га	0,88	0,09	0,07	0,03	0,04	0,54	0,67
+ ФГ 6 т/га	0,83	0,10	0,07	0,03	0,04	0,52	0,65
+ ФГ 8 т/га	0,83	0,11	0,07	0,03	0,04	0,54	0,67
Формирование кожуры /уборка							
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	0,90	0,09	0,06	0,03	0,03	0,58	0,71
+ ФГ 2 т/га	0,88	0,09	0,06	0,03	0,04	0,46	0,67
+ ФГ 4 т/га	0,88	0,09	0,06	0,03	0,05	0,41	0,62
+ ФГ 6 т/га	0,83	0,09	0,06	0,03	0,05	0,44	0,62
+ ФГ 8 т/га	0,83	0,10	0,06	0,03	0,05	0,45	0,64

Остальные элементы (Pb, Cu, Zn, Mn) являются рассеивающимися, поэтому при написании геохимического ряда записываются в знаменателе дроби. Накапливающихся элементов, Кс которых превышает значение 1,5, в исследуемой почве не выявлено.

Для кадмия Кс= 0,83-1,15, для железа Кс составил от 0,41 до 0,97, для никеля – 0,62-0,84, поэтому концентрации данных элементов можно считать близкими к фоновым значениям. Далее по убыванию относительной концентрации расположились: свинец, Кс которого равнялся от 0,07 до 0,12, медь (Кс=0,04-0,08), марганец (Кс= 0,03-0,06) и цинк (Кс=0,02-0,04).

По средним значениям полученных коэффициентов концентрации был получен следующий геохимический ряд:

$$\text{Cd left (0,90 right) Ni(0,72) Fe(0,63)} \frac{1}{\text{Pb(0,09) Cu(0,06) Mn(0,04) Zn(0,03)}}$$

Полученные коэффициенты концентрации для подвижных форм металлов в почве позволяют выявить следующие закономерности в зависимости от фазы развития картофеля: на начальных этапах развития, самым накапливающимся элементом был кадмий, концентрация которого очень близка к фоновому содержанию, и Кс в фазу всходов равнялся от 1,00 до 1,15. Далее следует железо, Кс в фазу всходов равнялся от 0,82 до 0,97 и затем со значениями Кс, равными 0,76-0,84 находился никель. Намного меньше относительно фонового значения оказалась концентрация подвижных форм свинца, меди, марганца и цинка, который является самым рассеиваемым элементом на большинстве вариантах опыта, независимо от периода развития картофеля.

Для фазы всходов на большинстве вариантов опыта последовательность элементов по убыванию Кс:

$$\text{Cd (1,06) Fe (0,86) Ni(0,79)} \frac{1}{\text{Pb (0,10) Cu (0,05) ~ Mn (0,05) Zn (0,04)}}$$

С фазы бутонизации концентрация железа снижается, что повлияло на последовательность металлов в геохимическом ряду: никель становится более накапливающимся элементом, а железо перемещается на 3 место. На стадии бутонизации геохимический индекс описывается выражением:

$$\text{Cd (0,87) Ni(0,75) Fe(0,73)} \frac{1}{\text{Pb (0,10) Cu (0,05) Mn (0,04) Zn (0,03)}}$$

Период от начала цветения и до формирования кожуры характеризовался одинаковым распределением элементов по их накоплению и рассеянию. В целом геохимический ряд можно отразить следующим образом (по убыванию Кс элементов): близкие к фоновым значениям являются Cd, Ni, Fe, ассоциация рассеиваемых элементов: Pb, Cu, Mn, Zn.

С фазы формирования кожуры Кс железа меньше 0,5 (за исключением фонового варианта, где Кс=0,58), и данный элемент становится рассеивающимся, но последовательность элементов сохраняется. Учитывая средние значения коэффициентов концентрации для данной фазы развития картофеля, можно записать геохимический индекс:

$$\text{Cd (0,86)Ni(0,65)} \frac{1}{\text{Fe (0,47) Pb (0,09) Cu (0,06) Mn (0,04) Zn (0,03)}}$$

В целом, внесение в почву ФГ по сравнению с вариантом применения минеральных удобрений N₁₅₀P₁₅₀K₃₀₀ приводит к увеличению концентрации подвижных форм марганца на всех стадиях развития картофеля, и как следствие, в течение вегетационного периода его Кс больше, чем у цинка независимо от нормы фосфогипса. Цинк в свою очередь становится самым рассеивающимся элементом по значениям относительной концентрации подвижных форм металла. Также на протяжении всего вегетационного периода внесение ФГ понижает содержание кадмия, железа и никеля, что ведет к уменьшению их Кс в среднем на 0,1. Показатель относительной концентрации свинца в основном уменьшается при внесении ФГ, а Кс меди и цинка меняется незначительно или остается неизменным относительно фонового варианта опыта.

4.3. Накопление тяжелых металлов картофелем

Содержание кадмия в клубнях картофеля сорта Гала с внесением мелиоранта снижалось. При внесении 2 т/га фосфогипса имело минимальное значение и составляло 0,059 мг/кг почвы, а максимальное значение кадмия было на фоновом участке с внесением удобрений в норме N₁₅₀P₁₅₀K₃₀₀ составило 0,090 мг/кг почвы (табл. 4.3.1). Увеличение доз фосфогипса 4, 6, 8 т/га снижало содержания кадмия на 0,03 мг/кг. Сорт картофеля Гранада, так же снижал содержание кадмия в клубнях картофеля при внесении 2 г/га фосфогипса его содержание было минимальным – 0,064 мг/кг почвы, а при внесении фоновых доз удобрений имел повышенное содержание – 0,092 мг/кг.

Таблица 4.3.1 – Содержание тяжелых металлов в клубнях картофеля, мг/кг

№ п.п.	Вариант	Элемент, мг/кг						
		Cd	Pb	Zn	Cu	Mn	Fe	Ni
Сорт Гала								
1	N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	0,090	0,53	9,75	0,64	4,2	68,0	0,98
2	+ФГ 2 т/га	0,059	0,85	8,23	0,44	1,50	42,4	0,61
3	+ФГ 4 т/га	0,065	0,78	7,22	0,57	1,35	42,1	0,79
4	+ФГ 6 т/га	0,066	0,72	9,21	0,51	1,33	41,6	0,66
5	+ФГ 8 т/га	0,066	0,70	9,21	0,36	1,62	44,5	0,75
Сорт Гранада								
1	N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	0,092	0,80	9,94	0,72	4,8	72,1	0,99
2	+ФГ 2 т/га	0,064	0,64	8,75	0,94	1,80	54,2	0,75
3	+ФГ 4 т/га	0,073	0,91	7,78	0,67	1,65	54,1	0,73
4	+ФГ 6 т/га	0,074	0,86	9,89	0,61	1,64	52,3	0,69
5	+ФГ 8 т/га	0,076	0,78	9,91	0,47	1,72	53,6	0,82
ФОН		0,03	0,28	21,3	24,5	46,7	336,4	
Критическая концентрация		0,100	0,50	50,00	10,0	500	750	3,0
Нормальная концентрация		0,05-2	0,1-5	15-150	15-20	300	50-250	20-30
Фитотоксичная концентрация		100	60	400	20	300	-	80,0

Свинца в клубнях сорта Гала, от увеличения доз внесения фосфогипса, наблюдается повышение концентрации по сравнению с фоновыми значениями, так при внесении 2 т/га мелиоранта содержание свинца увеличилось на 0,3 мг/кг, а при внесении 4,6,8 т/га – увеличивалось на 0,2 мг/кг.

На сорте Гранада самое низкое значение свинца отмечено при внесении 2 т/га фосфогипса, что ниже фонового участка на 20%. Максимальное значение свинца в клубнях сорта Гранада – при внесении 4 т/га фосфогипса.

Накопление цинка в клубнях картофеля сорта гала максимальное значение имело при внесении фоновых удобрений, а минимальное значение при внесении ФГ 4 т/га, что на 25,9% ниже фонового значения. Содержание цинка в клубнях картофеля сорта Гранада имело такое же распределение максимальное значение – ФОН и составляло 9,94 мг/кг, а минимальное значение при внесении мелиоранта 4 т/га – 7,78 мг/кг, что на 21,7% ниже ФОНа

Содержание Mn, Fe, Ni при внесении фосфогипса снижалось по сравнению с ФОНом на всех вариантах сорта Гала и Гранада. Так при внесении удобрений

N₁₅₀P₁₅₀K₃₀₀ содержание элементов было; 4,2, 68,0, 0,98 мг/кг соответственно, внесение мелиоранта снижало содержание Mn от 1,33 мг/кг до 1,62 мг/кг на сорте Гала и на сорте Гранада от 1,62-1,8 мг/кг.

Минимальное значение марганца на обоих сортах было при внесении 4 и 6 т/га.

При внесении фосфогипса в нормах 2, 4, 6, 8 т/га снижалось содержание железа в клубнях сорта Гала в среднем на 38 %, а в сорте картофеля Гранада на 25%.

На ФОНовом участке содержание никеля в сортах Гала и Гранада было выше, чем при внесении мелиоранта и составило 0,98, 0,99 мг/кг соответственно. Самое низкое содержание данного тяжелого металла было на сорте Гала при внесении 2 т/га ФГ (0,61 мг/кг), а на сорте Гранада – 6 т/га и составило 0,69 мг/кг.

Коэффициент биологического поглощения клубнями Cd на сортах Гала и Гранада минимальное значение имел при внесении фоновых доз удобрений N₁₅₀P₁₅₀K₃₀₀ и составил 0,141, 0,144. При внесении ФГ наблюдается увеличение коэффициента биологического поглощения у Cd от 19 до 34 %, а Pb от 40 до 70% на сорте Гала и Cd от 23 до 46 %, на сорте Гранада (табл. 4.3.2).

Таблица 4.3.2 – Коэффициенты биологического поглощения тяжелых металлов клубнями картофеля сорта Гала и Гранада при различных уровнях внесения фосфогипса

№ п.п.	Вариант	Элемент						
		Cd	Pb	Zn	Cu	Mn	Fe	Ni
Сорт Гала								
1	N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	0,141	0,047	0,574	0,069	0,020	0,017	0,065
2	+ ФГ 2 т/га	0,169	0,080	0,588	0,050	0,007	0,013	0,047
3	+ ФГ 4 т/га	0,186	0,076	0,516	0,068	0,006	0,011	0,061
4	+ ФГ 6 т/га	0,189	0,071	0,658	0,058	0,006	0,013	0,044
5	+ ФГ 8 т/га	0,189	0,068	0,542	0,048	0,007	0,012	0,050
Сорт Гранада								
1	N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	0,144	0,071	0,742	0,077	0,025	0,018	0,071
2	+ ФГ 2 т/га	0,178	0,063	0,673	0,112	0,010	0,017	0,063
3	+ ФГ 4 т/га	0,203	0,087	0,598	0,082	0,009	0,017	0,061
4	+ ФГ 6 т/га	0,206	0,083	0,761	0,073	0,009	0,017	0,058
5	+ ФГ 8 т/га	0,211	0,078	0,708	0,059	0,009	0,015	0,059

Коэффициент биологического поглощения клубнями Cd на сортах Гала и Гранада минимальное значение имел при внесении фоновых доз удобрений

$N_{150}P_{150}K_{300}$ и составил 0,141, 0,144. При внесении ФГ наблюдается увеличение коэффициента биологического поглощения у Cd от 19 до 34 %, а Pb от 40 до 70% на сорте Гала и Cd от 23 до 46%, на сорте Гранада. Так же можно отметить, что КБК Pb на сорте Гранада при внесении 2 т/га снижалось на 11%, а внесение 4, 6, 8 т/га увеличивался на 9-16%.

Коэффициент биологического поглощения цинка на сорте Гала, по отношению к ФОНу изменялся не значительно и только при внесении ФГ в норме 6 т/га имел 0,658, что на 12% больше ФОНа.

На сорте Гранада внесение 6 т/га ФГ, КБК Zn имел максимальное значение – 0,761, а минимальным был при внесении 4 т/га и составил 0,598.

КБК Cu на сорте Гала при внесении 4 и 2 т/га снижался от 0,048 до 0,050, что на 30,4-27,5% ниже ФОНового значения, соответственно. Коэффициент поглощения Cu на сорте картофеля Гранада увеличивался относительно фонового значения при внесении 2 т/га мелиоранта и имел значение 0,112, что выше ФОНа на 45%, а минимальное значение коэффициента было при внесении максимальной нормы внесения ФГ-8 т/га и составил 0,059, что на 24% ниже фона

При различных нормах внесения ФГ, КБК марганца снижалось более 50% на всех вариантах опыта, по сравнению с ФОНом.

Коэффициент поглощения железа клубнями картофеля сорта Гала снижался, так при внесении 2 и 6 т/га его показатель составил 0,013, при внесении 8 т/га – 0,012 и самое низкое значение КБК железа имел при внесении 4 т/га ФГ и составил 0,011.

Для сорта Гранада КБК железа на фоновом варианте было максимальным и составило – 0,018, при внесении 2,4,6 т/га ФГ снижалось по отношению к фону на 0,001 и самое низкое значение КБК имело при внесении 8 т/га, составило 0,015, что на 0,003 меньше ФОНа.

Коэффициент биологического поглощения никеля для сорта Гала и Гранада увеличивался на фоне внесения минеральных удобрений, в норме $N_{150}P_{150}K_{300}$ и со-

ставил 0,065 и 0,071 соответственно (табл. 4.3.3). Минимальное значение КБК никеля было на обоих сортах при внесении 6 т/га ФГ в обоих вариантах и составил: 0,044 и 0,058.

Таблица 4.3.3 – Показатель биотичности тяжелых металлов клубнями картофеля сорта Гала и Гранада при различных уровнях внесения фосфогипса

№ п.п.	Вариант	ПБЭ						
		Cd	Pb	Zn	Cu	Mn	Fe	Ni
Сорт Гала								
1	N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	0,692	0,033	0,117	0,014	0,0042	0,0015	0,01690
2	+ ФГ 2 т/га	0,454	0,053	0,099	0,009	0,0015	0,0009	0,01052
3	+ ФГ 4 т/га	0,500	0,049	0,087	0,012	0,0014	0,0009	0,01362
4	+ ФГ 6 т/га	0,508	0,045	0,111	0,011	0,0013	0,0009	0,01138
5	+ ФГ 8 т/га	0,508	0,044	0,111	0,008	0,0016	0,0010	0,01293
Сорт Гранада								
1	N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	0,708	0,050	0,120	0,015	0,0048	0,0016	0,0171
2	+ ФГ 2 т/га	0,492	0,040	0,105	0,020	0,0018	0,0012	0,0129
3	+ ФГ 4 т/га	0,562	0,057	0,094	0,014	0,0017	0,0012	0,0126
4	+ ФГ 6 т/га	0,569	0,054	0,119	0,013	0,0016	0,0011	0,0119
5	+ ФГ 8 т/га	0,585	0,049	0,119	0,010	0,0017	0,0012	0,0141

Показатель биотичности тяжелых металлов сортов Гала и Гранада, при различных нормах внесения фосфогипса показал, что:

- фоновое внесение удобрений N₁₅₀P₁₅₀K₃₀₀ имело максимальное значение показателя биотичности Cd, Mn, Fe, Ni - 0,692, 0,0042, 0,0015, 0,01690 соответственно на сорте Гала. На сорте Гранада: 0,708, 0,0048, 0,0016, 0,0171 соответственно;

- минимальный показатель биотичности Cd был при внесении 2 т/га ФГ в клубнях картофеля сорта Гала и Гранада и составил – 0,454 и 0,492, соответственно;

- повышение значений показателя биотичности Cd на сорте Гала и Гранада отмечается с внесением 6, 8 т/га;

- в зависимости от норм внесения мелиоранта происходило снижение показателя биотичности Pb. На фоне применения минеральных удобрений на сорте Гала и Гранада значение показателя было самым низким и имело 0,033 и 0,050 соответственно. Самым высоким значением показателя на сорте Гала отмечалось при внесении ФГ в норме 2 т/га и составил 0,053, а на сорте Гранада максимальным значением показателя был при внесении ФГ в норме 4 т/га и составил 0,057.

- показатель биотичности цинка на сорте Гала и Гранада, снижался в зависимости от норм внесения фосфогипса, так минимальное значение цинка было при внесении 4 т/га ФГ и составило 0,087, 0,094 соответственно. Максимальное значение на обоих сортах было при внесении фоновых доз удобрений $N_{150}P_{150}K_{300}$ – 0,117-0,120 соответственно.

- значение ПБЭ меди на сорте картофеля Гала, относительно ФОНа снижалось на 15-42%. Максимальное значения ПБЭ было при использовании ударений (0,014), а минимальное значения ПБЭ 0,008 – при внесении фосфогипса в норме 8 т/га. На сорте картофеля Гранада БПЭ меди с максимальным значением был при внесении ФГ 2 т/га и составил 0,020, а минимальное значение показателя было при внесении 8 т/га ФГ, так же стоит отметить, что внесение ФГ, с шагом 2 т : 2, 4, 6, 8 т/га Данный показатель меди, снижался: 0,020, 0,014, 0,013, 0,010 соответственно.

- показатель биотичности марганца на сорте Гала в зависимости от норм внесения мелиоранта снижается в 2,6-3,5 раза. На сорте Гранада ПБЭ снижался в 2,7-3,0 раза.

- показатель биотичности железа на сорте Гала в зависимости от норм внесения мелиоранта снижается в 1,0-1,7 раза. На сорте Гранада ПБЭ железа снижался в 1,2-1,3 раза.

5. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФОСФОГИПСА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНОЙ ПРОДУКЦИИ КАРТОФЕЛЯ

5.1. Урожайность картофеля при использовании фосфогипса

Данные по урожайности картофеля сорта Гранада представлены в таблице 5.1.1 Урожайность, полученная с опытных вариантов, варьировала в 2021 году от 54,3 т/га на фоне до 64,7 т/га на варианте ФОН +ФГ 8 т/га. Дополнительное применение ФГ в качестве мелиоранта в дозах 6 и 8 т/га увеличило данный показатель на 9,9 и 8,1 т/га по сравнению с фоном и на 4,2 и 4 т/га с нормами внесения 2 и 4 т/га ФГ, соответственно. При внесении 8 т ФГ на 1 га наблюдается небольшое снижение урожайности относительно предыдущего варианта на 3,3%. При внесении 6 т/га фосфогипса был получен наибольший урожай, равный 64,0 т/га, что на 18,3% превышает значение, полученное на фоне (табл. 5.1.1).

Таблица 5.1.1 – Урожайность картофеля сорта Гранада, 2021-2024 гг., т/га

Вариант опыта	Год исследований					Отклонение от контроля	
	2021	2022	2023	2024	Среднее значение		
						т/га	%
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	54,3	58,4	52,1	51,6	54,1	0	0
+ ФГ 2 т/га	58,4	65,6	55,3	54,2	58,3	4,2	7,8
+ ФГ 4 т/га	60,1	58,0	57,4	57,3	58,1	4,0	7,4
+ ФГ 6 т/га	63,4	71,6	59,1	62,1	64,0	9,9	18,3
+ ФГ 8 т/га	64,7	62,1	60,1	61,9	62,2	8,1	15,0
<i>НСР 0,5</i>	<i>1,02</i>	<i>0,98</i>	<i>0,74</i>	<i>0,96</i>	<i>0,93</i>		

В более благоприятных погодных условиях 2022 года полученный урожай был выше, чем в 2021 году и составил от 58,4 до 71,6 т/га. Наибольшее значение было характерно на варианте опыта с применением фонового удобрения с ФГ в норме 6 т/га. Прибавка относительно фона составила 13,2 т/га или 22,6 %. Внесение ФГ в норме 8 т/га привело к снижению урожайности на 9,5 т/га относительно предыдущего варианта (ФОН +ФГ 6 т/га).

В целом по 2023 году произошло понижение урожайности относительно 2022 года, значение урожайности составило 52-60 т/га. Получение максимальной урожайности за 2023 год, обеспечил вариант опыта ФОН +ФГ 8 т/га. Применение повышенных норм мелиоранта (6 и 8 т/га) имели максимальное значение, относительно фоновых значений было увеличение на 7-8 т/га. Однако, все варианты с внесением ФГ превосходили фон в среднем на 5-15%.

2024 году результаты опыта показали, что значение урожайности составляло 51,6-62,1 т/га. Максимальное значение урожайности обеспечило внесение мелиоранта с нормами 6 и 8 т/га и дало прибавку относительно фона 10,5-10,3 т/га, соответственно. Все варианты с внесением фосфогипса увеличивали значение урожайности в среднем на 5,0-20,3%.

Обобщив полученные данные четырехлетнего опыта, были получены средние значения урожайности, а также подсчитана прибавка к контролю. В среднем урожайность картофеля сорта Гранада варьировала от 54,1 до 65,0 т/га, наибольший показатель выявлен на варианте опыта ФОН +ФГ 6 т/га, что превосходит фон на 9,9 т/га или на 18,3%.

Дополнительное внесение ФГ увеличивает данный показатель относительно фона на 4,0-9,9 т/га. В среднем за четыре года отклонение от фона составило 7,0-18,3%. Наибольшая прибавка урожая относительно фонового варианта выявлена при внесении 6 т ФГ на га. Дальнейшее увеличение дозы мелиоранта до 8 т/га привело к незначительному снижению урожайности (на 1,8 т/га относительно варианта ФОН +ФГ 6 т/га) и прибавка составила 15,0 % по сравнению с фоном.

По результатам исследований можно сделать заключение, что внесение в почву фосфогипса на фоне применения минерального удобрения в норме $N_{150}P_{150}K_{300}$ достоверно обеспечивает прибавку урожая картофеля сорта Гранада в пределах 7,4-18,3%, или 4-9,9 т с 1 га при его сборах на уровне 58,1-64,0 т/га. Наибольшую прибавку урожая относительно фона обеспечивает вариант опыта ФГ 6 т/га и 8 т/га. Данный показатель на 9,9-8,1 т/га превышает фон, соответственно равны 18,3% и 15,0%.

Данные четырехлетнего опыта возделыванию картофеля сорта Гала на черноземе обыкновенном в условиях южной агроклиматической зоны Самарской области представлены в таблице 5.1.2.

Таблица 5.1.2 – Урожайность картофеля сорта Гала, 2021-2024 гг., т/га

Вариант опыта	Год исследования				Среднее значение	Отклонение от контроля	
	2021	2022	2023	2024		т/га	%
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	52,1	50,7	50,3	51,2	51,1	0	0
+ФГ 2 т/га	52,8	56,4	53,6	53,6	54,1	3,0	5,9
+ФГ 4 т/га	54,1	57,3	57,0	57,2	56,4	5,3	10,4
+ФГ 6 т/га	57,4	58,7	59,2	59,4	58,7	7,6	14,9
+ФГ 8 т/га	58,6	59,4	59,7	59,3	59,3	8,2	16,0
<i>НСП 0,5</i>	<i>0,98</i>	<i>0,74</i>	<i>0,73</i>	<i>0,96</i>	<i>0,85</i>		

Подсчетами выявлено, что урожайность продовольственного картофеля, полученная с опытных вариантов в 2021 году, составила 52,1-58,6 т/га, максимальное значение получена на варианте с применением ФГ 8 т/га, что на 12,3% превосходит фон. Дополнительное применение ФГ в качестве мелиоранта в дозе 2 т/га увеличило данный показатель на 0,7 т/га. При внесении 4 т/га ФГ увеличивает урожайность еще на 2 т/га.

Повышение нормы ФГ до 6 т/га дало существенную прибавку урожая, равную 10,2% относительно фоновому варианту. При внесении 8 т/га ФГ на га урожайность продолжает увеличиваться, но не так значительно относительно предыдущего варианта.

Прибавка составила 1,2 т/га относительно варианта ФОН + ФГ 6 т/га или 2,1%. При применении повышенной дозы ФГ (8 т/га) был получен наибольший урожай, равный 58,6 т/га, что на 12,5%, полученного на фоне значения.

В сложившихся погодных условиях 2022 года полученный урожай был выше на опытных вариантах, чем в 2021 году, значения варьировали от 50,7 на фоне до 59,4 т/га на варианте опыта с применением фонового удобрения с ФГ в норме 8 т/га. Прибавка к фону составила 8,7 т/га или 17,2. В целом, применение ФГ способствует увеличению урожайности картофеля сорта Гала в 2022 году на 5,7-8,7 т/га, что составляет 11,2-17,2% от фона.

Анализируя результаты, полученные в 2023 году, можно отметить, что на большинстве вариантах опыта существенных изменений не выявлено относительно урожайности предыдущих двух лет, и значение урожайности составило 50,3-59,7 т/га. Максимальная урожайности за 2023 год выявлена на варианте опыта ФГ 8 т/га. Увеличение норм ФГ до 2, 4 и 6 т/га снижало урожайность относительно максимальной на 0,5-6,1 т/га. В целом все варианты с внесением ФГ превосходили фон в среднем на 6,6-18,7%.

Урожайность продовольственного картофеля, полученная на опытных вариантах в 2024 году, составила 51,2-59,3 т/га, максимальное значение получена на варианте с применением ФГ 6 т/га, что на 16,0 % превосходит фон. Дополнительное применение ФГ в качестве мелиоранта в дозе 2,4,8 т/га увеличило данный показатель на 2,4, 6,0, 8,1 т/га соответственно.

В среднем за 2021-2024 годы урожайность картофеля сорта Гала варьировала от 51,1 на фоне до 59,3 т/га при внесении 8 т/га ФГ совместно с фоновым удобрением.

Применение только минерального удобрения в дозе $N_{150}P_{150}K_{300}$ полученный урожай в среднем за 4 года составляет 51,1 т/га. Дополнительное внесение ФГ увеличивает данный показатель на 3,0-8,2 т/га относительно фонового варианта, соответственно. В среднем за три года при внесении ФГ значения урожайности картофеля составило 5,9-16,0% от фона. Наибольшая прибавка урожая (8,2 т/га) отмечена при внесении фосфогипса в норме 8 т/га совместно с фоновым удобрением.

Таким образом, внесение в почву удобрения в норме $N_{150}P_{150}K_{300}$ совместно с ФГ обеспечивает большую прибавку урожая картофеля сорта Гала. Отклонение от фона составляет 3,0-8,2 т/га или 5,9-16,0%. Наибольшую прибавку урожая (8,2 т/га) относительно фона обеспечивает вариант опыта ФОН + ФГ 8 т/га, что на 16,0% превышает фоновый вариант.

5.2. Экономическая оценка возделывания картофеля

Применение минеральных удобрений совместно с фосфогипсом способствовало увеличению сбора урожая картофеля с одного гектара и, соответственно, получению большей выручки от продажи продукции. Так, при внесении фосфогипса в дозе 2 т/га урожайность картофеля сорта Гала повысилась на 3,0 т/га или на 5,9% относительно фона. При внесении ФГ в дозе 4 т/га, произошло увеличение урожайности до 56,4 т/га, что на 10,4% превосходит фон. Дальнейшее повышение нормы ФГ до 6 и 8 т/га привело к росту урожайности картофеля сорта гала в среднем за период 2021-2024 гг. на 7,6 и 8,2 т/га соответственно, что на 14,9 и 16,1% больше фонового варианта (табл. 5.2.1).

Таблица 5.2.1 – Экономическая эффективность сортов картофеля, 2021-2024 гг.

Сорт/вариант	N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	+ФГ 2 т/га	+ФГ 4 т/га	+ФГ 6 т/га	+ФГ 8 т/га
<i>Сорт Гала</i>					
Средняя урожайность за 4 года, т/га	51,1	54,1	56,4	58,7	59,3
Рост в % от фона	-	5,9	10,4	14,9	16,1
Стоимость реализации урожая с 1 га, тыс. руб.	595,62	630,59	657,40	684,21	691,20
Производственные затраты на 1 га, тыс. руб.	436,67	443,22	445,84	448,68	451,82
Прибыль с 1га, тыс. руб.	158,95	187,37	211,56	235,53	239,38
Рентабельность, %	36,40	42,28	47,45	52,49	52,98
<i>Сорт Гранада</i>					
Средняя урожайность за 4 года, т/га	54,1	58,2	58,1	64,0	62,2
Рост в % от фона	-	7,6	7,4	18,3	15,0
Стоимость реализации урожая с 1 га, тыс. руб.	630,59	678,38	677,22	745,99	725,01
Производственные затраты на 1 га, тыс. руб.	436,67	443,22	445,84	448,68	451,82
Прибыль с 1га, тыс. руб.	193,92	235,16	231,38	297,31	273,18
Рентабельность, %	44,41	53,06	51,90	66,26	60,46

Экономическими расчетами в нашем опыте установлено, что за период 2021-2024 гг. стоимость полученного урожая в денежном выражении по вариантам опыта варьирует от 595,62 тыс. руб./га до 691,20 тыс. руб./га (по средней цене, сложившейся за 2021-2024 гг. – в расчете 11 656 руб. за 1 т картофеля).

Производственные затраты на выполнение всех технологических операций, покупку удобрений и мелиоранта равнялись 436,67-451,82 тыс. руб./га и полностью окупались стоимостью произведенной продукции, с получением условно чистого дохода в пределах 158,95-239,38 тыс. руб./га и уровнем рентабельности 36,40-52,98 %.

Внесение минеральных удобрений и мелиоранта потребовало дополнительных материальных и денежных затрат, которые составили в варианте с внесением фосфогипса в норме 2,0 т/га – 443,22 тыс. руб./га. От внесения даже сравнительно небольшой нормы мелиоранта заметна прибавка продукции, что характеризуется положительным показателем рентабельности, равным 42,28%. Тогда как на фоновом варианте он составил 36,40%.

По мере увеличения нормы применения фосфогипса – до 4,0 т/га увеличивался объем дополнительно произведенной продукции, а, следовательно, и общая стоимость продукции на 10,4% относительно фона. При этом производственные затраты, учитывая стоимость фосфогипса составили 445,84 тыс. руб./га, что на 2,1% больше фона. В результате уровень рентабельности составлял уже 47,45%.

ВЫВОДЫ

1. По содержанию органического вещества (гумуса) почвы исследуемых участков относятся к малогумусным (ниже среднего), характеризуются средним запасом гумуса; по степени гумификации на фоне и варианте опыта фон + ФГ 2 т/га – средняя, в варианте «фон + ФГ 4 т/га» – очень высокая и варианте «ФГ 6 т/га» и «ФГ 8 т/га» – высокая; тип гумуса по соотношению СГК: С_{ФК} на фоне и варианте «фон + ФГ 2 т/га» – фульватный, вариантах «фон + ФГ 4 т/га» – гуматно-фульватный и «ФГ 6 т/га» и «8 т/га» – фульватный. Степень гумификации в фоновом варианте и «фон + ФГ 2 т/га» – средняя, составляет 24% и 25%, соответственно.

2. Обогащенность почвы азотом гумуса составила С:N = 12-14, в варианте «фон + ФГ 4 т/га» (С:N=10) – средняя, что способствует развитию инертности гумуса и снижению активности процессов минерализации, ниже которого процессы, происходящие в почве, могут быть необратимыми.

Содержание подвижных форм серы в почве при внесении фосфогипса значительно повышается: в фоновом варианте 24,0 мг/кг – среднее, в вариантах «ФГ 2 т/га», «ФГ 4 т/га» – 42-77 мг/га – высокое и в вариантах «ФГ 6 т/га и 8 т/га» – 117-125 мг/кг – очень высокое.

Соотношение азота к сере в вариантах опыта составляет 18-87:1, что выше оптимального значения 10:1, при таком соотношении задерживается образование белка и растения испытывают недостаток серы.

3. Баланс гумуса в севообороте с картофелем сорта Гранада бездефицитный (компенсационный), во всех вариантах баланс отрицательный с колебанием от 0,20 т/га на фоне и до 0,12 т/га в варианте фон + ФГ 8 т/га. В пятипольном севообороте дефицит гумуса компенсируется за счет включения в севооборот выращивания сои на 2-х полях и фацелии. Расчет потребности в органических удобрениях в среднем по севообороту показал, что внесение органических удобрений не требуется.

4. Для получения картофеля сорта Гала при средней урожайности за 4 года 2021-2024 гг. 51,3 т/га потребуется внести (кг/га): 357 азота, 327 фосфора и 210 калия. Для сорта Гранада при средней урожайности за 4 года 2021-2024 гг. 54,1 т/га потребуется внести на 1 га: 381,0 кг азота, 349,0 кг – фосфора и 250,0 кг калия.

5. Расчет коэффициента возврата показал, что положительный баланс питательных веществ в севообороте выявлен только по азоту при возделывании картофеля сорта Гала по остальным элементам установлен отрицательный баланс. Наибольший дефицит установлен по калию при выращивании картофеля сортов Гала и Гранада.

Обеспеченность почв азотом характеризуется как высокая (V класс), при таком уровне плодородия не допускается отрицательный баланс (+10-0), под сортом картофеля Гала баланс положительный и составил: + 32 кг д.в., под сортом Гранада баланс отрицательный: -57,0 кг д.в. Данный критерий подтверждается интенсивностью баланса: на участке сорта Гала он составил – 116% и сорта Гранада – 72% к выносу. Интенсивность баланса у сорта Гранада выходит за допустимые пределы и относится к отрицательному или дефицитному балансу.

7. Обеспеченность почв фосфором характеризуется как средняя (III класс). Под сортом Гала баланс: - 49 кг д.в., под сортом Гранада - 54 кг д.в. Данный критерий подтверждается интенсивностью баланса на участках обоих сортов и составляет 16% и 10% соответственно к выносу, такая интенсивность выходит за пределы допуска (+70-40) и относится к отрицательному или дефицитному балансу.

Обеспеченность обменным калием характеризуется как очень высокая (VI класс). Под сортом картофеля Гала баланс составил: - 87 кг д.в., под сортом Гранаде - 122 кг д.в. Данный критерий подтверждается интенсивностью баланса: на участке сорта Гала он составляет 56% к выносу, который выходит за границу допуска (-20-40) и относится к отрицательному или дефицитному балансу. Интенсивность баланса на участке сорта Гранада составляет 39% к выносу, который не выходит за границу допуска.

8. Емкость катионного обмена в почве меняется от средней до высокой. Поглощающая способность почв, по величине ЕКО установлена: в варианте «фон + ФГ 2 т/га» – средняя, «фон + ФГ 4, 6 и 8 т/га» – высокая.

Актуальная кислотность изменяется от среднещелочной в фоновом варианте с уменьшением щелочности в вариантах «фон + ФГ 2, 4, 8 т/га» до нейтральной (рН 6,6-7,3) и в варианте «фон + ФГ 6 т/га» – слабощелочной. Обменная кислотность варьирует от нейтральной рН 7,0 в вариантах опыта ФГ 2, 4 и 8 т/га до слабощелочной в варианте ФГ 6 т/га.

Содержание суммы кальция и магния от ЕКО во всех вариантах исследования ниже оптимума, с колебанием от 39% в варианте фон + ФГ 4 т/га до 72% варианте фон + ФГ 2 т/га. Согласно группировке почв по содержанию кальция почвы опыта относятся к 5 группе – высокое, по содержанию магния к 4 группе - повышенное. Высокое содержание кальция 15,1-18,8 ммоль/100 г почвы определено в фоновом варианте и «фон + ФГ 2, 4, 6 т/га», в варианте фон + ФГ 8 т/га – очень высокое 20,5 ммоль/100 г почвы.

Содержание магния во всех опытных участках – повышенное 2,1-2,8 ммоль/100 г почвы. Близко к оптимальному соотношение $\text{Ca}^{2+} : \text{Mg}^{2+} = 5:1$ отмечено в варианте «Фон + ФГ 4 т/га», в остальных $\text{Ca}^{2+} : \text{Mg}^{2+} = 7:1$ и больше.

9. По катионному составу тип засоления во всех вариантах опыта характеризуется как магниево-кальциевый. Расчет токсичности солей определил: по содержанию CO_3^{2-} и Cl^- превышен порог токсичности во всех вариантах опыта включая фон; по содержанию SO_4^{2-} превышен порог токсичности в вариантах ФГ 6 и 8 т/га; по содержанию HCO_3^- – нет превышения порога токсичности.

Согласно равенству «суммарный эффект» (СЭ) токсичных ионов изменяется на фоне и вариантах ФГ 2 и 4 т/га 0,69 - 0,78 мг-экв, почва классифицируется как слабозасоленная, в вариантах ФГ 6 и 8 т/га при «суммарном эффекте» 1,84-2,21 мг-экв. – средnezасоленная.

10. Во всех вариантах опыта в структурной группе почв в процентном отношении преобладают мезоагрегаты с размером частиц 0,25-10 мм – агрономически ценная структура. Внесение фосфогипса способствует увеличению содержания

данных почвенных частиц с изменением от 64,3- 65,6% до 73,1-72,6% в вариантах ФГ 2,0, 4, 6 и 8 т/га соответственно.

Внесение фосфогипса в дозах 2, 4, 6 и 8 т/га обуславливает увеличение плотности твердой фазы от 2,4 до 3,1 г/см³. Расчет показал, что общая пористость почвы находится в прямой зависимости от плотности почвы и гранулометрического состава.

11. При внесении фосфогипса содержание всех изучаемых тяжелых металлов в почве находилось ниже ПДК в 2,5-6,0 раза. Накопление тяжелых металлов можно представить следующим геохимическим рядом сорт Гала/сорт Гранада: Cd - (1,02/1,02) - Pb - (0,83/0,80) - Ni (0,51/0,49) - Cu (0,36/0,37) - Mn (0,29/0,29) - Zn (0,20/0,19) - Fe (0,10/0,11). Применение фосфогипса повышает концентрацию Zn, Fe, Ni на 19,3%, 20%, 15,2%, соответственно, содержание Fe снижается на 3,3%.

12. Применение фосфогипса способствует увеличению концентрации в почве подвижных форм тяжелых металлов: под сортом Гала подвижность Cd возрастала на 16%, Mn – 90%, Fe, Ni – 19%, под сортом Гранада подвижность Pb, Cu, Zn, Mn, Ni увеличивалась на 23,5%, 30%, 15%, 20%, 26,5%, соответственно.

13. Геохимические ряды, характеризующие почвы под участками картофеля, отображены в виде ранжирования по убыванию Кс химических элементов:

сорт Гала
$$\text{Cd } 0,88 \text{ Ni } 0,69 \text{ Fe } 0,63 \frac{1}{\text{Pb } 0,10 \text{ Cu } 0,06 \text{ Mn } 0,04 \text{ Zn } 0,03}$$

сорт Гранада
$$\text{Cd } 0,88 \text{ Fe } 0,72 \text{ Ni } 0,69 \frac{1}{\text{Pb } 0,12 \text{ Cu } 0,06 \text{ Mn } 0,04 \text{ Zn } 0,03}$$

14. При внесении фосфогипса содержание тяжелых металлов в клубнях картофеля не превышает гигиенические нормативы и ниже фитотоксичной концентрации: Cd - в 140 раз, Pb - в 89,5, Zn - в 55,5, Cu - в 38,3, Mn - в 144, Ni - в 111,6 раза. Превышена допустимая концентрация по Pb в клубнях сорта Гала в 1,36 раза, сорта Гранада – в 1,5 раза. Фоновое значение в клубнях обоих сортов превышено в 2-3 раза

по содержанию Cd. Во всех вариантах опыта концентрация Pb оказалась выше фоновой в 2,5 раза и 2,8 раза для обоих сортов, соответственно. Остальные элементы находились в концентрациях, значительно ниже фоновых: Zn в 2,9 раз, Cu в 47 раз, Mn в 22,4 раза, Fe в 6,4 раза. Сравнительная оценка качества клубней выявила сортовые различия по содержанию изучаемых элементов: в клубнях сорта Гала оно в 1,0-1,1 раза превосходит клубни сорта Гранада, а по значениям Cu в 1,4 раза.

15. Исходя из потенциальной биогеохимической подвижности металлов, согласно рядам биологического поглощения, Cd, Pb, Cu, Zn, Mn, Fe, Ni являются элементами слабого накопления. Наиболее высокий КПБ у Zn, но его роль в общем круговороте веществ незначительна ($ПБЭ_{Zn} < 0,3$). Для кадмия $ПБЭ_{Cd} = 0,45-0,62$ для сорта Гала, $ПБЭ_{Cd} = 0,49-0,71$ для сорта Гранада, $КБП_{Cd} < 0,3$, что свидетельствует о его слабом поглощении растениями из почвы. Pb, Cu, Mn, Fe, Ni не проявились как биотичные элементами, их роль в биогеохимическом круговороте незначительна.

16. Максимальная урожайность у сортов картофеля Гала и Гранада получена при внесении 8 и 6 т/га фосфогипса. В сравнении с фоном, урожайность картофеля сорта Гала увеличивалось на 16,1%, прибыль составила 239,38 тыс. рублей с 1 га при рентабельности 52,98%; урожайность картофеля сорта Гранада возросла с 54,1 до 64,0 т/га и рентабельность составила 66,26%.

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВУ

С целью получения стабильно высоких, экологически безопасных урожаев картофеля сорта Гала на уровне 58,6-59,7 т/га и сорта Гранада в пределах 59,0-71,6 т/га и оптимизации кислотности орошаемого чернозема обыкновенного Самарского Заволжья с содержанием гумуса 4,5 и рН почвенного раствора 7,4-7,9 рекомендуется в качестве химического мелиоранта использовать фосфогипс с долевой концентрацией 70-80 % гипса ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), 1,5-2,0 % подвижного фосфора (P_2O_5), 15% оксида кремния (SiO_2) и 20-22 % кальция (Ca), в норме 8 т/га для сорта Гала и 6 т/га для сорта Гранада на фоне внесения минеральных удобрений в норме $\text{N}_{150}\text{P}_{150}\text{K}_{300}$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аканова, Н. И. Фосфогипс нейтрализованный-перспективное агрохимическое средство интенсификации земледелия // Плодородие. – 2013. – №. 1 (70). – С. 2-7.
2. Алексеенко, К. А. Геохимия ландшафта и окружающая среда / К. А. Алексеенко. – М.: Наука, 1990. – 142 с, Б. В. В мире картофеля 55 лет. – М.: Грани успеха, 2023. – 304 с.
3. Базилевич, Н.И. Учет засоленных почв. Методические рекомендации по мелиорации солонцов и учету засоленных почв / Н. И. Базилевич, Е. И. Панкова // Москва. 1970.С. 80-82.
4. Байрамбеков, Ш. Б. Некоторые элементы технологии возделывания картофеля в Нижнем Поволжье / Ш. Б. Байрамбеков // Научные основы эффективного использования орошаемых земель аридных территорий России. – Волгоград, 2007. – С. 70-77.
5. Банадысев, С. А. Семеноводство картофеля: организация, методы, технологии / С. А. Банадысев. – Минск: Беларусь, 2003. – 325 с.
6. Барановский, И. Н. Перспективы применения осадков сточных вод в Нечерноземной зоне РФ / И. Н. Барановский, Е. А. Подолян // Устойчивое развитие АПК регионов: ситуация и перспективы, Тверь, 02–04 июня 2015 года. Том 1. – Тверь: Тверская государственная сельскохозяйственная академия, 2015. – С. 115-117. – EDN VACTCP.
7. Безуглова, О.С. Гумусное состояние почв России / О.С. Безуглова // Ростов-на-Дону: СКНЦВШ. – 2001. – 224 с.
8. Бокова, А. А. Агроэкологическая эффективность проведения мелиоративных мероприятий на черноземных почвах в условиях лесостепи Самарского Заволжья / А. А. Бокова, Е. Е. Суворов // Вклад молодых ученых в аграрную науку: Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции, Кинель, 23 апреля 2025 года. – Кинель: Самарский государственный аграрный университет, 2025. – С. 6-11.

9. Владыченский С. А. Практические занятия по мелиорации почв. - М.: Изд-во Моск. ун-та, 1960. - 166 с.

10. Воробьев, Н. И. Экобиотехнология гумификации растительных остатков, использующая генно-метаболические сети почвенных микроорганизмов / Н. И. Воробьев, О. В. Свиридова, А. А. Попов [и др.] // Почвы России: современное состояние, перспективы изучения и использования : материалы докладов VI Съезда общества почвоведов им В.В. Докучаева, Петрозаводск, 13-18 августа 2012 года. Том Книга 1. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2012. – С. 320-322. EDN SBSBWT.

11. Гагарина, Э. И. Об использовании агроруд для улучшения свойств почв / Э. И. Гагарина, Е. В. Абакумов // Вестник Санкт-Петербургского университета. – 2003 – Т. 3. – № 1 – С. 91-97.

12. Гиль, Л. С. Современное промышленное производство овощей и картофеля с использованием систем капельного орошения / Л. С. Гиль, В. И. Дьяченко, А. И. Пашковский, Л. Т. Сулима. – Ж.: ЧП РУТА, 2007. – 390 с.

13. Глазовская, М. А. Геохимические основы типологии и методики исследования природных ландшафтов / М. А. Глазовская. – М.: Изд-во МГУ, 1964. – 230 с.

14. Гомес Экспозито Р., де Брюйн, И., Постма, Дж., Рааймакерс, Дж. М. Современные представления о роли ризосферных бактерий в почвах, подавляющих развитие болезней / Р. Гомес Экспозито, И. де Брюйн, Дж. Постма, Дж. М. Рааймакерс // Front. Microbiol. 2017. – № 8. doi: 10.3389/fmicb.2017.02529.

15. Горьковенко, В. С. Влияние условий окружающей среды на обилие супрессивных видов в агроценозе озимой пшеницы / В. С. Горьковенко, Н. А. Москалева, Л. А. Шадрина, Н. М. Смоляная // Биологическая защита растений – основа стабилизации агроэкосистем: материалы Международной науч.-практ. конф. «Биологическая защита растений, перспективы и роль в фитосанитарном оздоровлении агроценозов и получении экологически безопасной с.-х. продукции» Краснодар. – 23-25 сентября 2008. – С.107-109.

16. Гришина, Л. А., Орлов, Д. С. Система показателей гумусного состояния почв // Проблемы почвоведения. – М.: Наука, 1978. – С. 42-47.
17. Добровольский, В. В. Лабораторные работы по географии почв с основами почвоведения / В. В. Добровольский. – М.: Просвещение, 1973. – 143 с.
18. Добрыднєв Е. П. Использование нейтрализованного фосфогипса в качестве минерального грунта-рекультиванта в промышленных масштабах на примере ООО «ЕвроХим-БМУ» // Проблемы рекультивации отходов быта, промышленного и сельскохозяйственного производства: материалы I Всерос. науч. конф. – Краснодар: КубГАУ, 2009. – С. 14-19.
19. Докучаева, Л. М. Негативные процессы в орошаемых почвах и пути их устранения / Л. М. Докучаева [и др.] // Мелиорация и водное хозяйство. – 1993 – № 5 – С. 14-16.
20. Дорохов, Л. М. Минеральное питание как фактор повышения продуктивности фотосинтеза и урожая сельскохозяйственных растений / Л. М. Дорохов // Проблемы фотосинтеза. – М.: АН СССР, 1959. – С. 505-508.
21. Доспєхов, Б. А. Методика полевого опыта. 5 изд., перераб. и доп. – М.: Агропромиздат, 1985. – 351 с.
22. Дубєнок, Н. Н. Продуктивность картофеля при спринклерном орошении / Н. Н. Дубєнок, Р. А. Чєчко, А. Ф. Дружкин // Плодородие. – 2015. – № 1. – С. 35-37.
23. Ежкова, М. С. Влияние местных агроминералов (фосфоритов, глауконитов и цеолитов) на агрохимические свойства выщелоченного чернозема при возделывании яровой пшеницы / М. С. Ежкова, Л. М.-Х. Биккина, В. О. Ежков // Вестник Казанского технологического университета. – 2013 – Т. 16 – № 20 – С. 148-151.
24. Жанвьє, К. Здоровье почвы за счет подавления почвенных болезней: какая стратегия от описаний к индикаторам / К. Жанвьє, Ф. Вильньєв, К. Алабуєтт, В. Эдєль-Герман, Т. Матєй, К. Штєйнберг // Почвенная биология. Биохимия. – 2007. – № 39. – С. 1-23. Doi: 10.1016/j.soilbio.2006.07.001.

25. Жевора, С. В. Продовольственная безопасность: продуктовый аспект («второй хлеб») / С. В. Жевора // Вопросы экономики и права. – 2016. – № 98. – С. 40-44.
26. Жевора, С. В. Картофелеводство России: итоги, прогнозы, приоритеты развития отрасли / С. В. Жевора, Б. В. Анисимов, Е. В. Овэс, Н. А. Янюшкина // Сб. науч. тр. ВНИИКХ. – М., 2018. – С. 3-15.
27. Журавлева, Е. В. Картофелеводство как одно из приоритетных направлений Федеральной научно-технической программы развития сельского хозяйства на 2017-2025годы / Е. В. Журавлева, С. В. Фурсов // Картофель и овощи. – 2018. – № 5. – С. 6-9.
28. Звягинцев, Д. Г. Современные проблемы почвенной микробиологии / Д. Г. Звягинцев // Тезисы докладов III Всероссийской конференции. – М. : МГУ. – 1986. – С. 4.
29. Здоровая почва как необходимое условие жизни человека // Почвоведение. – 2010. – № 7. – С. 858-866.
30. Здоровье почвы // Сохранить и приумножить. ФАО. – 2011. – www.fao.org/icatalog/inter-e.htm.
31. Ильин, В. Б. Оценка буферности почв по отношению к тяжелым металлам / В. Б. Ильин // Агрохимия. – 1995. – № 10. – С. 109-113.
32. Исмагилов, Р. Р. Урожайность и качество клубней картофеля в условиях Республики Башкортостан / Р. Р. Исмагилов, А. Ш. Юсупов // Достижения науки и техники АПК. – 2007. – № 11. – С. 11-12.
33. Камел, Н. Х. М. Естественная радиоактивность и защита от радиации при использовании продуктов на основе отходов фосфогипса / Н. Х. М. Камел // Радиохимия. – 2012. – Том 54. – № 1. – С. 86-90.
34. Картофель / под ред. Н. Я. Чморы, В. В. Арнаутова. – М. : Гос. изд-во с.-х. литературы, 1953. – 567 с.
35. Кауричев, И.С., Гречин, И.П., Почвоведение. – Москва : Колос, 1969. – 543 с.

36. Кауричев, И. С. Почвоведение / И. С. Кауричев, Н. П. Панов, Н. Н. Розов, М. В. Стратович, А. Д. Фокин. – 4-е изд., переработанное и дополненное. – М.: Агропромиздат, 1989. – 719 с.
37. Каюмов, М.К. Программирование продуктивности полевых культур. Ленинград: Гидрометеиздат, 1977. – 200 с
38. Кудеяров, В. Н. Современное состояние углеродного баланса и предельная способность почв к поглощению углерода на территории России / В. Н. Кудеяров // Почвоведение. – 2015. – № 9. – С. 1049-1060.
39. Курбатова, А. С. Оценка состояния почв и грунтов при проведении инженерно-экологических изысканий / А. С. Курбатова, С.А. Герасимова, Т.В. Решетина, И.Д. Федоров, В.Н. Башкин, А.Б. Щербаков. Серия: Экологическое сопровождение градостроительной деятельности. – М. : Научный мир, 2005. – 180 с.
40. Комплексная переработка картофеля на крахмал и картофелепродукты // Картофелеводство : сб. науч. тр. – Мн., 2010. – Т.18. – 368 с.
41. Кожевин, П. А. Биотический компонент качества почвы и проблема устойчивости / П. А. Кожевин // Вестник МГУ. Серия 17. Почвоведение. – 2001. – № 4. – С. 45-47.
42. Коновалова, Г. И. Использование биотехнологических методов и приемов в современном семеноводстве картофеля / Г. И. Коновалова // Вопросы картофелеводства. Актуальные проблемы науки и практики: науч. тр. – М., 2006. – С. 332-336.
43. Косодуров, К. С. Эффективность применения фосфогипса в севообороте с картофелем / К. С. Косодуров, Л. С. Федотова, Н. И. Аканова, Е. В. Князева, Н. А. Тимошина // МСХ. – 2018. – № 3. – С. 18-23.
44. Куликова, А. Х. Содержание тяжелых металлов в почве в зависимости от способов ее основной обработки / А. Х. Куликова, М. И. Ходько, Н. Г. Захаров // Вестник УГСХА. – 2001. – № 5. – С. 22-30.
45. Кузнецов, А. В. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства. – М.: ЦИНАО, 1992. – 63 с.

46. Лабинская, А. С., Волина, Е. Г. Руководство по медицинской микробиологии. Общая санитарная микробиология. – БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. – 1080 с.

47. Максимов, Д. А. Научные принципы формирования биологизированной технологии возделывания картофеля / Д. А. Максимов, А. А. Устроев // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. – 2019. – №1(98). – С. 82-93.

48. Малышева, З. Г. Санитарно-микробиологическое исследование почвы / З. Г. Малышева, Н. В. Уголькова // Руководство по медицинской микробиологии. Общая и санитарная микробиология. Книга 1 / Под ред. Лабинской А.С., Волиной Е.Г. – М.: БИНОМ, 2008. – С. 868-890.

49. Муромцев, Г. С. Применение метода разведений для установления количества микробов-антагонистов в почве / Г. С. Муромцев Г. Н. Маршунов, Н. К. Черникова // Фитопатология. – 1976. – Т. 10. – Выпуск 2. – С. 150-153.

50. Ничипорович, А. А. Физиология фотосинтеза и продуктивность растений / А. А. Ничипорович // Физиология фотосинтеза. – М.: Изд-во Наука, 1982. – С. 7- 33.

51. Нортон, Миккелсен, Дженсен Дж. Р. Дистанционное зондирование окружающей среды // Ресурс Земли, 2014 – № 56. – С. 56-78.

52. Осипов, А.И., Сивкова, Д.М., Калинина, Е.В. Нетрадиционные известковые мелиоранты // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе: материалы конференции. – Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2018. – С. 69-99.

53. Патент № 2827217 С1 Российская Федерация, МПК А01С 21/00, А01В 79/02, С09К 17/06. Способ повышения плодородия почв и продуктивности сельскохозяйственных культур: № 2024105582 : заявл. 04.03.2024: опубл. 23.09.2024 / Н. М. Троц, Д. В. Виноградов, Я. А. Бахмуров [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный аграрный университет».

54. Патент № 2835185 С1 Российская Федерация, МПК А01С 21/00, А01В 79/02. Способ повышения агрофизических и биологических свойств черноземных почв: заявл. 15.02.2024: опубл. 24.02.2025 / Д. В. Виноградов, Н. М. Троц, Н. И. Аканова [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Самарский государственный аграрный университет". – EDN MMWFDY.

55. Постановление П. Р. Ф. от 14 мая 2021 г. № 731 «О Государственной программе эффективного вовлечения в оборот земель сельскохозяйственного назначения и развития мелиоративного комплекса Российской Федерации» // URL: <https://base.garant.ru/400773886/> (дата обращения: 18.10. 2024).

56. Попов, А. Д. Изучение антагонистических свойств штаммов *Trichoderma asperellum* в отношении токсинообразующих грибов рода *Fusarium* / А. Д. Попова, В. С. Садыкова // Молодой ученый. – 2014. – № 8 (67). – С. 328-330.

57. Прохорова, Н.В., Матвеев, Н.М. Распределение тяжелых металлов в посевах важнейших сельскохозяйственных культур в Самарской области. – Самара: Самарский университет, 2006. – 142 с.

58. Пындак, В. И, Новиков, А. Е. Природные мелиоранты на основе кремнезёмов и глинозёмов // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – 2015. – №2 (38). – С. 73-76.

59. Радов, А. С. Практикум по агрохимии: учебное пособие для студентов агрономических факультетов сельскохозяйственных вузов / А. С. Радов, И. В. Пустовой, А. В. Корольков. – М.: Колос, 1965. – 377 с.

60. Романова, И. Н. Роль удобрений при выращивании крахмалосодержащих культур на технологические цели / И. Н. Романова, С. Е. Терентьев, И. А. Карамулина, М. И. Перепичай, К.В. Мартынова // Высшему агрономическому образованию в Удмуртской Республике – 65 лет: материалы Национальной научно-практической конференции, посвященной 65-летию агрономического факультета ФГБОУ ВО Ижевская ГСХА. – 2019. – С. 149-152.

61. ГОСТ 12536-2014. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава – М.: Стандартинформ, 2015. – 22 с.

62. Санитарно-микробиологическое исследование почвы. Руководство по медицинской микробиологии. Общая и санитарная микробиология. Книга 1. Под ред. Лабинской А. С., Волиной Е. Г. – М.: БИНОМ, 2008. – С. 868-890.
63. Семенов, А. М. Диагностика здоровья и качества почвы / А. М. Семенов, В. М. Семенов, А. Х. К. Ван Бругген // Агрохимия. – 2011. – № 12. – С. 4-18.
64. Симаков, Е. А. Картофелеводство России: состояние и перспективы в новых условиях / Е. А. Симаков [и др.] // Картофель и овощи. – 2022. – № 4. – С. 3-6.
65. Симаков, Е. А. Селекция конкурентоспособных сортов картофеля для различного назначения / Е. А. Симаков, А. В. Митюшкин, А. А. Журавлев // Картофель и овощи. – 2023. – № 1. – С.35-40.
66. Соколов, М. С. Органическое удобрение – эффективный фактор оздоровления почвы и индуктор ее супрессивности / М. С. Соколов, Ю.Я. Спиридонов, А. П. Глинушкин, Е.Ю. Торопова // Достижение науки и техники АПК. – 2018. – № 1. – С. 3-9.
67. Соколов, М.С. Экологические и фитосанитарные функции почвенного органического вещества (проблемно аналитический обзор) / М. С. Соколов, Ю. Я. Спиридонов, Е. Ю. Торопова, А. П. Глинушкин, А. М. Семенов // Агрохимия. – 2018. – № 5. – С. 79-96.
68. Соколов, М. С. Здоровье почвы агроценозов как атрибут ее качества и устойчивости к биотическим и абиотическим стрессорам / М. С. Соколов, А. И. Марченко, С. С. Санин, Е. Ю. Торопова, В. А. Чулкина, А. Ф. // Известия ТСХА. – 2009. – Выпуск 1. – С. 13-22.
69. Соколов, М. С. Средообразующие функции здоровой почвы – фитосанитарные и социальные аспекты / М.С. Соколов, А.П. Глинушкин, Е.Ю. Торопова // Агрохимия. – 2015. – № 8. – С. 81-94.
70. Соловьев, А.А. Влияние различных норм внесения фосфогипса на агроэкологические параметры почвы и продуктивность лука репчатого: дисс. ... канд. с.-х. наук: 4.1.3. / Соловьев Анатолий Александрович. – Самара, 2024. – 222 с.

71. Смагин, А. В. Экологическая оценка почвенных ресурсов и технологии их воспроизводства (на примере г. Москвы) / А. В. Смагин, С.А. Шоба, О.А. Макаров. – М.: Моск. Ун-т, 2008. – 360 с.
72. Старовойтов, В. И. Пути повышения пищевой ценности картофеля / В. И. Старовойтов, О. А. Старовойтова, Н. В. Воронов, Г. С. Воронова, А.А. Манохина // Агротехнологии XXI века. Матер. Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, посвященной 85-летию основания Пермской ГСХА и 150-летию со дня рождения академика Д. Н. Прянишникова. – Пермь, 2015. – С. 48-53.
73. Сычев, В. Г. Проблемы гипсования солонцовых почв в Ставропольском крае / В. Г. Сычев, Ю. И. Гречишкина, В. П. Егоров, А. В. Матвиенко // Плодородие. – 2021. – № 5. – С. 37-43.
74. Торопова, Е. Ю. Фундаментальная роль агрометода в оздоровлении почвы в системах биологического земледелия / Е. Ю. Торопова, М. П. Селюк // Агротехн. метод защиты раст. от вредн. организмов: материалы VIII Международ. научн.-практ. конф. – Краснодар, 2017. – С. 420-424.
75. Торопова, Е. Ю. Фузариозные корневые гнили зерновых культур в Западной Сибири и Зауралье / Е. Ю. Торопова, О. А. Казакова, И. Г. Воробьева, М. П. Селюк // Защита и карантин растений – 2013. – № 9. – С. 23-26.
76. Торопова, Е. Ю. Экологические основы защиты растений от болезней в Сибири / Е. Ю. Торопова. – Новосибирск, 2005. – 272 с.
77. Федотова, Л. С. Роль адаптивно-биологизированного земледелия / Л. С. Федотова // Картофелеводство в регионах России: Актуальные проблемы науки и практики. – М., 2006. – С. 67-82.
78. Часовских, Н. П. Урожайность и качество картофеля в условиях орошения / Н.П. Часовских // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2012. – Т. 3. – № 35-1. – С. 69-71.
79. Шабельская, Н. П. Изучение режимов термообработки фосфогипса для получения ультрафиолетовых пигментов / О. А. Меденников, М. А. Егорова, Н. П. Шабельская, З. Д. Хлиян // Стекло и керамика. – 2025. – Т. 98, № 4(1168). – С. 44-52. – DOI 10.14489/glc.2025.04.pp.044-052. – EDN NTQEJO.

80. Шеуджен, А. Х. Использование фосфогипса нейтрализованного на посевах риса в качестве поликомпонентного удобрения / А. Х. Шеуджен, Т. Н. Бондарева // Научный журнал КубГАУ. – 2015. – № 09 (113). – С. 12.

81. Шеуджен, А. Х. Эффективность применения фосфогипса нейтрализованного в рисовом севообороте / А. Х. Шеуджен, Т. Н. Бондарева, П. Н. Хачмамук, Н. С. Галай, О. В. Зоз // МНИЖ. – 2016. – № 12-1 (54). – С. 163-167.

82. Шеуджен, А. Х. Агрохимия. Часть 3. Экспериментальная агрохимия / А. Х. Шеуджен – Краснодар : КубГАУ. – 2016. – 755 с.

83. Шитикова, А. В. Урожайность картофеля на дерново-подзолистых почвах Нечерноземья при применении регуляторов роста / А. В. Шитикова, А. С. Черных, А. А. Кузьмин, В. Н. Абакумов // Кормопроизводство. – 2015. – № 5. – 244 с.

84. Шпаар, Д. Выращивание картофеля / Д. Шпаар, П. Шумман. – М.: РАСХН, 1997. – 246 с.

85. Эль-Дидамони, Х. Радиологические характеристики и переработка радиоактивно загрязненных отходов фосфогипса / Х. Эль-Дидамони, М. М. Али, Н. С. Аввад, М. Ф. Атталла, М. М. Фавзи // Радиохимия. – 2013. – Том 55. – № 4. – С. 378-383.

86. Юлушев, И. Г. Почвенно-агрохимические основы адаптивно-ландшафтной организации систем земледелия ВКЗП: учебное пособие для студентов агрохимических специальностей / И. Г. Юлушев. - КонстантаАкадемический Проект, 2005. - 365, [2] с.

87. Alvarenga, P. Sewage sludge, compost and other representative organic wastes as agricultural soil amendments: Benefits versus limiting factors / P. Alvarenga, C. Mourinha, M. Farto, T. Santos P. , Palma J. , Sengo M. C. , Morais, C. Cunha Queda // Waste Manag, 2015 – Vol. 40 – Pp. 44-52. DOI: 10.1016/j.wasman.2015.01.027

88. Astrelin, I. M. Method of Phosphogypsum Processing in Complex Fertilizers with Production Semi Wet-Process Phosphoric Acid / I. M. Astrelin, H. V. Krymets, O. S. Fedorov, A. I. Moliuha // Ukraine Patent UA93253U. – 2014.

89. Belyuchenko, I. S. Ecological features of phosphogypsum and appropriateness of its use in agriculture / I. S. Belyuchenko, E. P. Dobrydnev, E. I. Muravev // Problems of recultivation of domestic, industrial and agricultural waste. – 2010. – Pp. 13-22.
90. Burns, R. G. Defining soil quality. Microbiological methods for assessing soil quality / R. G. Burns., P. Nannipieri, A. Benedetti, D. W. Hopkins // Eds. Bloem J. – Hopkins D. W., Benedetti A. USA: CAB Publishing UK, 2006. – P. 15.
91. Chuan, L. M. Phosphogypsum production and utilization in China / Chuan L. M. et al // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2018, 382, 022099 doi:10.1088/1757-899X/382/2/022099.
92. Ellis, B. Intrinsic bioremediation: an economic option for cleaning up contaminated land / B. Ellis, K. Gorder // Chem. and Ind. – 1997. – № 3. – P. 95-99.
93. Erayzer, L.M.; Udovenko, O.H.; Smalii, M.I.; Horniev, V.O. A Method for the Complex Reprocessing Phosphogypsum into Fertilizers / L. M. Erayzer, O. H. Udovenko, M. I. Smalii, V. O. Horniev // Ukraine Patent UA75743C2, 2006.
94. Florida Industrial and Phosphate Research Institute. Potential Phosphogypsum Uses <https://fipr.floridapoly.edu/about-us/phosphate-primer/potential-phosphogypsum-use.php>.
95. Gómez Expósito A. Two-level state estimation with local measurement preprocessing / A. Gómez Expósito, A. de la Villa Jaén // IEEE Trans. Power Syst. 24 May (2). – 2009. – 676-684.
96. Hawkesford, M., De Kok, L.J. Molecular physiology and ecophysiology of sulfur. Springer. – 2016. – 265 c.
97. Janvier, C. Soil health through disease suppression: Which strategy from description to indicators / C. Janvier, F. Villeneuve, C. Alabouvette, V. Edel-Hermann, T. Manteille, C. Steinberg // Soil Biol. Biochem. – 2007. – V. 39. – P. 1-23.
98. Kulczycka, J. et al. Evaluation of the recovery of Rare Earth Elements (REE) from phosphogypsum waste-case study of the WIZÓW Chemical Plant (Poland) // Journal of Cleaner Production. – 2016. – T. 113. – C. 345-354.
99. Karlen, D. L., Andrews S.S., Doran J.W. Soil quality: current concepts and applications // Adv. Agron. – 2001. – V. 74. – P. 1-39.

100. Manzhina, S. A Using of large-scale waste phosphogypsum to reduce emissions / S. A. Manzhina, V. V., Denisov, I. A. Denisova // Engineering Journal of Don. – 2014. – V. 28. – P. 77-87.
101. Malik, N. Y. Two-Stage chemical processing of phosphogypsum into ammonium nitrate / N. Y. Malik, M. S. Malovanyi, O. V. Malyk // Chem. Technol. Subst. Appl. 2005, 536, 207.
102. Nash, W. L. Long-term Effects of Rock Type on Appalachian Coal Mine Soil Properties / Nash W. L. et al. // Journal of environmental quality. – 2016. – T. 45. – № 5. – C. 1597-1606.
103. Oliveira, E. L. Control of soil acidity in no-tillage system for soybean production / E. L. Oliveira, M. A. Pavan // Soil and Tillage Research. – 1996. – № 38. – C. 47-57.
104. Onwueme, I. C. Influence of shade on stomatal density, leaf size and other leaf characteristics in the major tropical root crops, tannia, sweet potato, yam, cassava and taro / I. C. Onwueme, M. Johnston // Experimental Agriculture. – 2000. – Vol. 36. – № 4. – P. 509-516.
105. Pérez-López, R. Changes in mobility of toxic elements during the production of phosphoric acid in the fertilizer industry of Huelva (SW Spain) and environmental impact of phosphogypsum wastes / R. Pérez-López, A. M. Álvarez-Valero, J. M. Nieto // Journal of Hazardous Materials. – 2007. – № 148. – C. 745-750.
106. Silva, L. F. O. A review on the environmental impact of phosphogypsum and potential health impacts through the release of nanoparticles / L. F. O. Silva et al // Chemosphere, 2022, 286, 131513.
107. Sheudghen, A. H. Use of neutralized phosphogypsum as multicomponent fertilizer for rice crops are given / A. H. Sheudghen, T. N. Bondareva // KubSAU, 2015, 113(09), 1-19.
108. Saueia, C.H.R. Distribution of natural radionuclides in the production and use of phosphate fertilizers in Brazil / C. H. R. Saueia, B. P. Mazzilli // Journal of Environmental Radioactivity. – 2006. – № 89. – C. 229-239.

109. Schnug, E., Haneklaus, S. Contribution of uranium in drinking waters to the daily uranium intake of humans - a case study from Northern Germany // Institute of Plant Nutrition and Soil Science. – 2005. – 4(55). – 227-236.

110. Sharma, M., Joshi, P., Kumar, N., Joshi, S., Rohilla, R.K., Roy, N. and Rawat, D.S. (2011) Synthesis, Antimicrobial Activity and Structure – Activity Relationship Study of N, N-Dibenzyl-Cyclohexane-1,2-Diamine Derivatives. European Journal of Medicinal Chemistry. – 46. –478-480.

111. Stalham, M. A. Effect of variety, irrigation regime and planting date on depth, rate, duration and density of root growth in the potato (*Solanum tuberosum*) crop / M. A. Stalham, E. J. Allen // The Journal of Agricultural Science. – 2001. – Vol. 137. – № 3. – P. 251-270.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Таблица П.1.1 – Агрохимические показатели почв участков возделывания картофеля, 2021-2024 гг.

№	Вариант опыта	рН (сол) обменная кислотность				Гумус, %				Азот NO ₃ ⁻ , мг/кг	Азот ЛГ мг/кг	ЕКО (емкость катионного обмена) мг-экв/100г
		2021	2022	2023	2024	2021	2022	2023	2024	2021-2024	2021-2024	2021-2024
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	7,3	7,5	7,2	7,3	4,5	4,1	4,1	4,3	55,0	7,0	26,0
2	+ ФГ 2 т/га	7,1	7,0	7,1	7,2	4,8	4,9	4,6	4,9	10,7	96,0	30,0
3	+ ФГ 4 т/га	6,9	7,0	7,1	7,0	4,4	4,6	4,6	4,4	7,6	127,0	46,0
4	+ ФГ 6 т/га	7,2	7,3	7,3	7,4	4,5	4,8	4,5	4,7	11,0	128,0	36,0
5	+ ФГ 8 т/га	7,2	6,9	7,1	7,1	4,5	4,4	4,5	4,6	7,2	122,0	38,0

Продолжение таблицы П.1.1

№	Вариант опыта	рН (вод) актуальная кислотность				Подвижный P ₂ O ₅ ,мг/кг				Подвижный K ₂ O,мг/кг			
		2021	2022	2023	2024	2021	2022	2023	2024	2021	2022	2023	2024
1	2	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
1	N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	8,1	7,9	7,8	8,0	61	55	57	59	265	260	270	265
2	+ ФГ 2 т/га	7,1	7,0	7,1	7,2	200	220	217	214	155	165	170	152
3	+ ФГ 4 т/га	6,6	7,0	7,1	7,1	199	205	203	205	132	151	147	150
4	+ ФГ 6 т/га	7,3	7,4	7,5	7,4	58	54	60	52	271	321	301	306
5	+ ФГ 8 т/га	7,1	7,1	7,1	7,1	205	209	211	202	205	212	205	217

Окончание таблицы П.1.1

№	Вариант опыта	Подвижный Ca ⁺² , мг/кг				Подвижный Mg ⁺² , мг/кг				Подвижная сера, мг/кг			
		2021	2022	2023	2024	2021	2022	2023	2024	2021	2022	2023	2024
1	2	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37
1	N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₃₀₀	18,8	18,0	18,2	18,9	2,8	2,4	2,5	2,4	25	24	24	23
2	+ ФГ 2 т/га	18,8	19,3	19,8	20,4	2,8	2,5	2,6	2,5	44	44	38	43
3	+ ФГ 4 т/га	19,1	20,3	20,5	21,8	2,7	2,6	2,6	2,5	78	76	77	76
4	+ ФГ 6 т/га	19,6	21,2	21,0	22,9	2,6	2,6	2,5	2,4	119	115	118	117
5	+ ФГ 8 т/га	20,5	22,4	22,8	22,9	2,1	2,6	2,4	2,4	125	122	125	129

**Справка о внедрении
результатов научно-исследовательской работы**

в производство ООО «Скорпион» Безенчукского района Самарской области и использовании материалов научных исследований по изучению элементов технологии производства картофеля, выполненных аспирантом ФГБОУ ВО Самарский ГАУ Боровковой Натальей Владимировной, под руководством д.с.-х. наук, профессора Троц П. М.

ООО «Скорпион» Безенчукского района Самарской области подтверждает, что результаты исследований по изучению элементов технологии производства картофеля, разработанные Боровковой Н.В., были внедрены в производстве хозяйства в 2022, 2023, 2024, 2025 гг., на общей площади 150 га.

Проведено агрохимическое обследование территории хозяйства на площади 1532 га. Выявлены почвы, требующие проведения мелиоративных мероприятий, в частности установлено, что около 350 га пашни имеет значение рН в пределах 7,9-8,3. Для данной площади рассчитаны нормы внесения химического мелиоранта, определены способы заделки его в почву, выявлены наиболее оптимальные нормы внесения Фосфогипса как при естественном уровне плодородия, так и на удобренном фоне. Внесение мелиоранта в дозе 4,0 - 6,0 т/га обеспечивало существенную прибавку урожая по сравнению контрольным вариантом, при сравнительно небольших производственных затратах. В результате существенно возрастал условно чистый доход, а средняя рентабельность предлагаемой технологии находилась в пределах 53,3 – 61,4 % в зависимости от варианта внедрения.

При этом в отличие от контрольного варианта, действие фосфогипса пролонгировалось, как минимум на два последующих года, и будет обеспечивать прибавку урожая последующих культур севооборота.

Директор
ООО «Скорпион»
Безенчукского района
Самарской области



Калмыков С. Т.

10 октября 2025 года

**Справка о внедрении
результатов научно-исследовательской работы**

в производство ООО «Весна» Безенчукского района Самарской области и использовании материалов научных исследований по изучению элементов технологии производства картофеля, выполненных аспирантом ФГБОУ ВО Самарский ГАУ **Боровковой Натальей Владимировной**, под руководством д.с.-х. наук, профессора Троц Н. М.

ООО «Весна» Безенчукского района Самарской области подтверждает, что результаты исследований по изучению внесения фосфоринса посадку картофеля, разработанные Боровковой Н.В., были внедрены в производстве хозяйства в 2022, 2023, 2024, 2025 гг., на общей площади 120 га.

Внедрение элементов агротехники, таких как, внесение фосфоринса в дозе 4-6 т на га под посадку картофеля, позволило обеспечить оптимальный рост и развитие растений, сформировать более высокую продуктивность.

Предложенные элементы технологии картофеля обеспечивали урожайность 60,3 т/га, что на 3,2-3,3 т/га выше, чем средние показатели по предприятию.

Производственные испытания доказывают высокую агрономическую и экономическую эффективность предложенных элементов агротехнологии.

Директор
ООО «Весна»
Безенчукского района
Самарской области



Сараев Евгений Викторович

1 октября 2025 года

**Справка о внедрении
результатов научно-исследовательской работы**

в производство ИП Глава КФХ Цирулев Е. П. Приволжского района Самарской области и использовании материалов научных исследований по изучению элементов технологии производства лука репчатого, выполненных аспирантом ФГБОУ ВО Самарский ГАУ **Боровковой Натальей Владимировной**, под руководством д.с.-х. наук, профессора Трош П. М.

Результаты исследований и рекомендации, содержащиеся в диссертации Боровковой Н.В., прошли производственную проверку в 2021-2025 годах на полях ИП КФХ Глава Цирулев Е. П. Приволжского района Самарской области на общей площади 150 га.

В процессе работы было установлено положительное влияние фосфогипса в качестве мелиоранта и удобрения под картофель. От внедрения результатов и рекомендаций получен высокий урожай и экономический эффект.

Выявлено, что действие фосфогипса на развития растений, происходит как через оптимизацию почвенной среды обитания корневых систем, так и в виде дополнительного источника фосфора и микроэлементов, что способствует повышению длительности фотосинтетических процессов и синтеза органического вещества. На корнеплодах, выращенных на опытных делянках наблюдалось снижение распространения заболеваний, ускоренное созревание кожуры, что обеспечивает меньше механических повреждений и долгосрочное хранение.

При 6 т/га среднее значение pH уменьшалось до 7,0 единиц - оно приблизилось к показателю нейтральной среды почвенного раствора, а в верхнем слое почвы. Внесение фосфогипса практически вело к нейтрализации вредного действия солей в верхних слоях почвы (0-20 см). Учитывая высокий уровень щелочности поливной воды (pH выше 8,0) внесение ФГ способствовало ее некоторой нейтрализации, и балансировало pH почвенного раствора, не оставляя слабощелочную среду.

Внедрение данных элементов агротехнологии обеспечило сравнения с фоном, урожайность картофеля сорта Гала увеличивалась на 16,1 %, при рентабельности 52,98 %; урожайность картофеля сорта Гранда возросла с 54,1 т/га до 64,0 т/га и рентабельность равнялась 66,26 %. При внедрении своей разработки автор принимал непосредственное участие.

Глава ИП Глава КФХ Цирулев Е.
Приволжского района
Самарской области



Цирулев Е. П.

01 октября 2025 года